



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE GUAYAQUIL

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previa la obtención del Título de:

INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA

ANÁLISIS DE FLUJO DE CORRIENTE CONTINUA APLICADO A SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE POTENCIA

AUTORES

Jorge Venancio Potes Barre
Alessandro Paúl Rendón Toledo

DIRECTOR: MSc. Juan Carlos Lata García

GUAYAQUIL

2019

CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, ALESSANDRO PAUL RENDON TOLEDO y JORGE VENANCIO POTES BARRE autorizamos a la **Universidad Politécnica Salesiana** la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Además, declaramos que los conceptos, análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Guayaquil, 10 de Mayo del 2019

Alessandro Paúl Rendón Toledo

0927463612

Jorge Venancio Potes Barre

0923623052

CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS

Yo, **ALESSANDRO PAUL RENDON TOLEDO**, con documento de identificación N° **0927463612**, manifiesto mi voluntad y cedo a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado titulado “**ANÁLISIS DE FLUJO DE CORRIENTE CONTINUA APLICADO A SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 10 de Mayo del 2019

Alessandro Paúl Rendón Toledo

0927463612

CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS

Yo, **JORGE VENANCIO POTES BARRE**, con documento de identificación N° **0923623052**, manifiesto mi voluntad y cedo a la **UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA** la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado titulado “**ANÁLISIS DE FLUJO DE CORRIENTE CONTINUA APLICADO A SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**” mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de **INGENIERO ELÉCTRICO**, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la universidad facultada para ejercer plenamente los derechos antes cedidos. En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscrito este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 10 de Mayo del 2019

Jorge Venancio Potes Barre

0923623052

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR

Yo, **JUAN CARLOS LATA GARCIA**, director del proyecto de Titulación denominado “**ANÁLISIS DE FLUJO DE CORRIENTE CONTINUA APLICADO A SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**” realizado por los estudiantes, **ALESSANDRO PAUL RENDON TOLEDO** y **JORGE VENANCIO POTES BARRE**, certifico que ha sido orientado y revisado durante su desarrollo, por cuanto se aprueba la presentación del mismo ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, 05, 10, 2019

.....

Juan Carlos Lata García

MSc.

DEDICATORIA

El presente trabajo es dedicado a mi padre que fue quien me ayudo a lo largo de estos a llegar y concluir con esta meta trazada

Rendón Alessandro

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a quienes estuvieron presente colaborando con ideas consejos y recomendaciones a lo largo de estos más de 5 años y también a Sr(a). Leonor por sus aportes para que esta tesis sea cumplida.

Alessandro Rendón.

Agradezco a Dios por haberme dado la vida y permitido llegar a este momento, a mi madre, esposa e hijos por la motivación a alcanzar nuevas metas, tanto profesionales como personales

Jorge Potes

RESUMEN

Tema: ANÁLISIS DE FLUJO DE CORRIENTE CONTINUA APLICADO A SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Autores: Alessandro P. Rendón Toledo, Jorge V. Potes Barre.

Director de Tesis: Juan Carlos Lata García, MSc.

Palabras clave: flujo de carga, incertidumbre, linealizado, resistencia cero

El desarrollo de esta tesis se basa en el análisis del comportamiento y variación de los ángulos de voltajes en las barras además del flujo de carga que pasa por las líneas del sistema de potencia por tal razón se realizó dos prácticas experimentales para tomar datos y realizar la respectiva simulación en MATLAB®.

El flujo de CC o DC o también llamado linealizado nos proporcionara una respuesta no tan precisa pero considerable con respecto a otros métodos de resolución que son mucho más preciso además es mucho más convencional por la facilidad de uso a comparación de los métodos iterativos de resolución

Con el análisis DC se puede analizar cualquier sistema de potencia en este caso el sistema de esta tesis es para ámbitos conceptuales de sistemas eléctricos de potencia.

Según las prácticas de esta tesis se plantea manejar una incertidumbre o margen de error del 5-10%

Las magnitudes de tensión y corriente se eligieron arbitrariamente y ajustándose a condiciones ideales

SUMMARY

Topic: APPLIED CONTINUOUS CURRENT FLOW ANALYSIS ELECTRICAL POWER SYSTEMS

Authors: Alessandro P. Rendón Toledo, Jorge V. Potes Barre.

Thesis Director: Juan Carlos Lata García, MSc.

Keywords: linearized, load flow, zero resistance, uncertainty.

The development of this thesis is based on the analysis of the behavior and variation of the angles of voltages in the bars in addition to the load flow that passes through the lines of the power system for this reason two experimental practices were carried out to collect data and perform the respective simulation in MATLAB®.

The flow of DC or DC or also called linearized will provide us with a not so precise but considerable response with respect to other resolution methods that are much more precise, in addition it is much more conventional because of the ease of use compared to the iterative resolution methods

With the DC analysis we can analyze any power system in this case the system of this thesis is for conceptual areas of power electrical systems.

According to the practices of this thesis is to handle an uncertainty or margin of error of 5-10%

The magnitudes of voltage and current were chosen arbitrarily and adjusting to ideal conditions

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	i
CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS	ii
CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN.....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiv
ABREVIATURAS	xv
SIMBOLOGÍA.....	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
1. EL PROBLEMA	2
1.1. Descripción del Problema	2
1.2. Importancia y Alcances.....	3
1.3. Delimitación	3
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo General	3
1.4.2. Objetivo Específico	3
CAPÍTULO II	3
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Estado del Arte.....	3
2.1.1. Sistemas eléctricos de potencia	4
2.1.1.1. Generación	5
2.1.1.2. Transmisión.....	6
2.1.1.3. Distribución.....	6

2.1.1.4.	Carga	6
2.1.2.	Características de Líneas de Transmisión.	8
2.1.2.1.	Transmisión de Línea corta	10
2.1.2.2.	Transmisión de Línea media.	11
2.1.2.3.	Transmisión de Línea larga.	13
2.1.3.	Flujo de potencia.	18
2.1.4.	El Problema del Flujo de Potencia.	22
2.1.5.	Clasificación de los buses.	27
2.1.5.1.	Bus de carga.	27
2.1.5.2.	Bus controlado por Voltaje o bus de generador.	27
2.1.6.	Métodos para la Resolución de flujos de potencia	27
2.1.6.1.	Método de Gauss-Seidel.....	28
2.1.6.2.	Método de Newton-Raphson.....	31
2.1.6.3.	Desacoplado.	32
2.1.6.5.	Flujo de Potencia DC.	34
2.1.7.	Importancia de la utilización del flujo de carga CC.	37
CAPÍTULO III		38
3.	MATERIALES Y MÉTODOS.	38
3.1.	Construcción del Módulo de pruebas para Circuitos Eléctricos.	38
3.1.1.	Diseño mecánico	38
3.1.2.	Diseño Eléctrico	42
3.2.	Materiales.....	45
3.2.1.	Módulo de sincronismo.	45
3.2.2.	Módulo de circuitos eléctricos	46
3.2.3.	Dinamómetro.....	46
3.2.4.	Máquina Síncrona	47
3.3.	Practica general para el análisis de flujo de potencia DC	48
3.4.	Simulación en MATLAB®.....	52
CAPÍTULO IV		57
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	57
3.2.	PRÁCTICAS DEL MÓDULO DIDÁCTICO.....	57
4.1.1.	Práctica 1	57
3.3.	PRÁCTICAS DEL MÓDULO DIDÁCTICO.....	61
4.1.1.	Práctica 2.....	61

CONCLUSIONES	67
RECOMENDACIONES	68
BIBLIOGRAFÍA.....	69
ANEXOS.....	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Circuito Equivalente de un Sistema de Potencia.	4
Figura 2. Divisiones del Sistema Eléctrico.	8
Figura 3. Circuito Equivalente de una Línea de Transmisión Corta.	10
Figura 4. Circuito equivalente de una línea de transmisión media.....	12
Figura 5. Circuito Equivalente de una Línea de Transmisión Larga.....	13
Figura 6. Circuito para Buses Variables.....	22
Figura 7. Sistema Equivalente de un Sistema de Potencia de Barra n.	25
Figura 8 Sistema de Potencia de dos Generadores y cuatro cargas.....	28
Figura 9. Red de bus.....	37
Figura 10. Modelo de Flujo de Carga de corriente directa.....	37
Figura 11. Diagrama para el Calado y Diseño del vinilo para el Módulo.....	39
Figura 12 . Maqueta del Módulo con sus respectivos componentes.....	40
Figura 13. Calado de la estructura metálica.	41
Figura 14. Módulo de pruebas de circuitos eléctricos.....	42
Figura 15. Conexión de resistencias fusibles e inductores.....	43
Figura 16. Conexión de relés fuente de alimentación y parte rectificadora de 24V.....	44
Figura 17. Conexión de capacitores.	45
Figura 18. Banco de pruebas para máquina síncrona.....	46
Figura 19. Dinamómetro	47
Figura 20. Máquina Síncrona SM-300.....	48
Figura 21. Diagrama unifilar de la práctica, los autores.....	49
Figura 22. Diagrama principal práctica 1.....	58
Figura 23. Diagrama de conexión dinamómetro motor primario 1, práctica 1.	59
Figura 24. Diagrama de conexión dinamómetro motor primario 2, práctica 1.	60
Figura 25. Diagrama de conexiones módulo de circuitos eléctricos práctica 2.	61
Figura 26. Diagrama principal del sistema de potencia práctica 2.....	62
Figura 27. Diagrama de conexión dinamómetro motor primario práctica 2.	63
Figura 28. Diagrama de conexión dinamómetro motor primario 2 práctica 2.	64
Figura 29. Diagrama de conexiones módulo de circuitos eléctricos práctica 2.	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos de impedancia de las líneas.....	49
Tabla 2. Datos de Admitancia de las líneas.....	49
Tabla 3. Datos de potencia de los generadores y cargas	49
Tabla 4. Resultados del flujo de potencia por unidad (pu).....	51
Tabla 5. Resultados del flujo de potencia Real en W.....	51

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Autotransformador variable del bobinado de campo y armadura.....	71
Anexo 2. Conexión general de banco de prueba para maquina sincrónica.	72
Anexo 3. Conexiones de dinamómetro DYN-400 y máquina sincrónica SM-300 acoplados lado A.....	73
Anexo 4. Conexión de módulo de pruebas de circuitos eléctricos.....	74
Anexo 5. Mediciones de amperajes en líneas de transmisión en sincronismo con carga.....	75
Anexo 6. Mediciones de amperajes en las 3 líneas de transmisión sincronismo sin carga.	76
Anexo 7. Medición en línea de flujo de 1-3.	77
Anexo 8. Medición en línea de flujo de 2-3.	77
Anexo 9. Medición en línea de flujo de 1-2.	78
Anexo 10. Conexiones de dinamómetro DYN-400 y máquina sincrónica SM-300 acoplados lado B.	78
Anexo 11. Datos de analizadores de red en sincronismo.	79
Anexo 12. Datos de amperímetros de red en sincronismo.	80
Anexo 13. Resultados simulación MATLAB®.	81

ABREVIATURAS

CC	Corriente Continua
CA	Corriente Alterna
RPM	Revoluciones por minuto
LVK	Ley de voltaje de Kirchoff
LCK	Ley de corrientes de Kirchoff
Hz	Hertz
P	Potencia Activa
Q	Potencia Reactiva
A	Matriz de incidencia
Y	Matriz de impedancia
B	Es el equivalente a la matriz de impedancia
J	Matriz Jacobiana
I_s	Es la corriente de entrada del circuito equivalente de una línea de transmisión media
I_R	Es la corriente de salida del circuito equivalente de una línea de transmisión media.
V_R	Voltaje de salida del circuito equivalente de las líneas cortas medias y largas
V_s	Es el voltaje de entrada del circuito equivalente de una línea de transmisión
\vec{P}	Vector de las potencias netas inyectadas a las barras.
$\vec{\theta}$	Vector de los ángulos de voltaje de las barras. (Para los buses 1, ..., N)
P_L	Vector de flujo en los ramales
P_i	Potencia activa neta
Q_i	Potencia reactiva neta
V_i	Magnitud del voltaje
f	Función n-dimensional (no lineal).
x	Vector n-dimensional que contiene las variables de estado, o estados, como componentes. Estas son las magnitudes de voltaje y voltaje desconocidos ángulos de nodos en el sistema.

- u Es un vector con salidas de control (conocidas), voltajes en generadores con control de tensión.
- p Es un vector con los parámetros de los componentes de red, línea reactancias y resistencias.

SIMBOLOGÍA

S	Siemens
Ω	Ohmio
θ	Matriz de ángulo de voltajes
l	Longitud de la línea
δ	Ángulo de fase
%	Porcentaje

INTRODUCCIÓN

Existen varias condiciones de operación que deben cumplirse al proporcionar el servicio dadas de acuerdo a las inyecciones de potencia real y reactiva que representan la generación y la carga, en cada nodo del sistema, es posible determinar las condiciones y variables eléctricas en el estado estable para así realizar un análisis de su comportamiento.

La principal variable que se obtiene de un estudio de flujos de potencia es la magnitud y el ángulo de fase del voltaje en cada nodo, así como la potencia real y la potencia reactiva que se distribuye en cada línea del sistema.

En los análisis que se realizan frecuentemente requiere que los sistemas de potencia estén balanceados para evaluar cualquier resultado en las líneas del sistema.

En el estudio de flujos de potencia existen varios métodos para su resolución entre los principales son: Newton-Raphson, Gauss-Seidel, método desacoplado y el linealizado o DC.

En el análisis de flujo de potencia CC o linealizado algunas características de los otros métodos es que desprecia las resistencias de las líneas y asume para el cálculo las reactancias de las líneas. En consecuencia el flujo de potencia linealizado o CC convierte la solución AC como en los otros métodos en un problema de análisis de simple circuito lineal no utiliza un proceso iterativo además desprecia ciertos parámetros para el cálculo.

CAPÍTULO I

1. EL PROBLEMA

1.1. Descripción del Problema

Un sistema eléctrico tiene el objetivo de satisfacer la demanda de potencia eléctrica requerida por los usuarios que se benefician de ella, de forma continua sin fallas y de calidad. Existen varias normas y regulaciones que deben cumplirse al proporcionar el servicio siguiendo la operatividad del sistema de acuerdo a la entrada de potencia real y reactiva que representan la generación y carga, es posible determinar las condiciones eléctricas en estado estable para realizar un estudio de estado estable de la red eléctrica es llamado también estudio de flujos de potencia.

Las principales variables que se obtienen del estudio de flujos de carga CC es la magnitud y el ángulo de fase del voltaje para cada nodo, así también la potencia real y la potencia reactiva que se distribuye en cada línea del sistema.

El flujo de carga linealizado o también conocido como flujo de carga CC que plantea resolver ecuaciones no lineales en una manera de aproximación para encontrar una respuesta que con lleva a una relación entre flujo de potencia activa en la línea activa y el ángulo de fase por barra que se conecta con la línea de transmisión.

En la mayoría de problema que se establecen en los sistemas de transmisión cuyas variables no reflejan convergencia alguna con el flujo de carga no lineal.

En los análisis convencionales que se realizan a los sistemas eléctricos se debe tomar en consideración que el sistema opere de manera balanceada que a su vez brinda una estimación cercana para los sistemas eléctricos de potencia en cualquiera que sea su red de transmisión.

1.2. Importancia y Alcances

Con la realización de este proyecto se pondrá en práctica los conocimientos adquiridos en la materia de Sistemas Eléctricos de Potencia. Además, se reforzarán los conceptos de programación, funcionamiento de equipos y elementos pasivos.

El uso de los módulos didácticos permitirá a los estudiantes hacer análisis de flujo de potencia para la estabilidad de los sistemas eléctricos de potencia además servirá de herramienta a los profesores de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil con el fin de lograr que las clases sean prácticas.

1.3. Delimitación

En este caso el proyecto se enfocará en el laboratorio de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la UPS Sede Guayaquil para la elaboración de trabajos experimentales.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Analizar el flujo de potencia DC aplicado a sistemas eléctricos de potencia en el Laboratorio de motores de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil.

1.4.2. Objetivo Específico

- Diseñar un módulo de pruebas para el análisis de los flujos DC en los sistemas eléctricos de potencia.
- Preparar dos prácticas demostrativas para aplicar en el módulo didáctico.
- Realizar simulación en MATLAB® para comparar los análisis obtenidos de la práctica demostrativa.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Estado del Arte.

2.1.1. Sistemas eléctricos de potencia

Los sistemas de potencia son una red compleja interconectada como se puede observar en la figura 1. El sistema de energía eléctrica es una red compleja que consiste en generadores, cargas, transmisión líneas, transformadores, buses, disyuntores, etc. Para el análisis del funcionamiento de un sistema de potencia, se necesita un modelo adecuado. En consecuencia, pueden ser ecuaciones algebraicas, ecuaciones diferenciales, funciones de transferencia, etc. El sistema de alimentación nunca está en estado estable ya que las cargas cambian continuamente.

Sin embargo, es posible concebir un estado cuasiestático durante el cual las cargas podrían considerarse constantes. Este período podría ser de 15 a 30 minutos. En este estado los flujos de potencia de las ecuaciones no son lineales debido a la presencia de términos de variables de producto y trigonométricas. Las técnicas de solución implican métodos numéricos (iterativos) para resolver problemas ecuaciones algebraicas no lineales. El método Newton-Raphson es el método matemático más utilizado. El análisis del sistema para pequeñas variaciones de carga, en el que la velocidad o la frecuencia y el control de voltaje puede ser necesario para mantener los valores estándar, la función de transferencia y las variables de estado de los modelos son más adecuados para implementar controladores proporcionales, derivativos e integrales o controladores óptimos que usan los coeficientes de retroalimentación de Kalman. Para estudios de estabilidad transitoria involucrando cambios repentinos en la carga o condición del circuito debido a fallas, ecuaciones diferenciales se requiere describir el balance de energía en unos pocos medios ciclos de tiempo. Para estudiar el rendimiento en el estado estacionario es necesario un número de modelos de matriz.

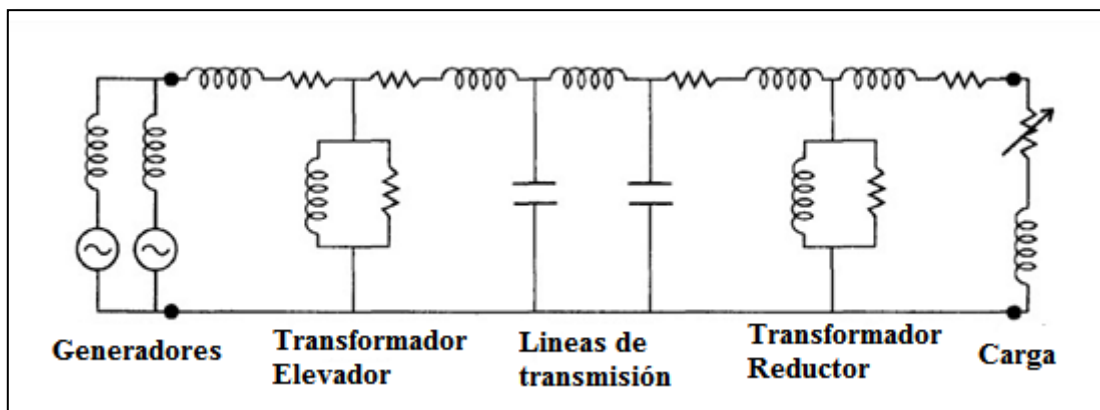


Figura 1. Circuito Equivalente de un Sistema de Potencia.

Los sistemas de potencia se pueden subdividir en cuatro partes principales:

- Generación.
- Transmisión y Subtransmisión.
- Distribución.
- Cargas.

2.1.1.1. Generación

Los componentes esenciales que se emplean en los sistemas de potencia es el generador de CA trifásico conocido como generador o alternador de sincronismo. Los generadores sincrónicos tienen dos campos rotatorios sincrónicos: un campo es producido por el rotor impulsado a velocidad síncrona y excitado por corriente continua. El otro campo se produce en los devanados del estator por las corrientes de armadura trifásicas. La corriente continua para los devanados del rotor es proporcionada por los sistemas de excitación.

Los sistemas de hoy usan generadores de CA con rectificadores rotativos, conocidos como sistemas de excitación sin escobillas.

La función del sistema de excitación del generador es de mantener el voltaje y el control del flujo de potencia reactiva del generador. Debido a que carecen del conmutador, los generadores de CA pueden generar alta potencia y alto voltaje.

La fuente de la potencia mecánica, comúnmente conocida como motor principal, puede ser turbinas hidráulicas en cascadas, turbinas de vapor cuya energía proviene de la quema de carbón, gas y combustible nuclear, turbinas de gas y motores de combustión interna que queman petróleo.

Las turbinas de vapor operan a velocidades relativamente altas de 3600 o 1800 RPM. El generador al que están acoplados es rotor cilíndrico, dos polos para 3600 RPM o cuatro polos para operación a 1800 RPM. Las turbinas hidráulicas, en particular las que funcionan con baja presión, funcionan a baja velocidad. Sus generadores suelen ser un rotor de tipo saliente con muchos polos.

En una central eléctrica existen varios generadores funcionan en paralelo en la red eléctrica para proporcionar la potencia total necesaria. Están conectados en un punto común llamado bus.

2.1.1.2. Transmisión

El propósito general función principal de una red de transmisión aérea es de transferir energía eléctrica de las unidades generadoras en diversas ubicaciones al sistema de distribución que finalmente suministra la carga. Las líneas de transmisión también interconectan las empresas vecinas lo que permite no solo el despacho económico de energía dentro de las regiones durante condiciones normales, sino también la transferencia de poder entre regiones durante emergencias. Los voltajes de transmisión estándar se establecen en el instituto estadounidense de estándares nacionales ANSI son: 69 kV, 115 kV, 138 kV 161 kV, 230 kV , 345 kV , 500 kV, 745 kV de línea a línea[5].

En Ecuador se maneja en la transmisión niveles de 230 kV, 138 kV, 69 kV, según datos del CELEC EP.

2.1.1.3. Distribución.

El sistema de distribución es la parte que conecta las subestaciones de distribución con los equipos de entrada del servicio del consumidor. Las líneas de distribución principales suelen estar en el rango de 4 a 34.5 kV AC y suministran la carga en un área geográfica bien definida. Algunos clientes industriales son atendidos directamente por los alimentadores primarios.

La red de distribución secundaria reduce los voltajes para su uso por consumidores comerciales y residenciales. La distribución secundaria sirve a la mayoría de los clientes con niveles de 240/120 V AC.

2.1.1.4. Carga

La demanda de carga total de un área depende de su población y los niveles de vida de las personas.

La producción general de carga se caracteriza por el factor de demanda, factor de carga factor de diversidad, factor de potencia y factor de utilización. En general, los tipos de carga se pueden dividir en las siguientes categorías:

- Doméstico.
- Comercial.
- Industrial.
- Agricultura.

Carga doméstica: la carga doméstica consiste principalmente en luces, ventiladores refrigeradores, acondicionadores de aire, amoladoras mezcladoras, hornos de calentadores pequeños motores de bombeo, etc.

Carga comercial: la carga comercial consiste principalmente en iluminación para tiendas, oficinas, anuncios, etc., ventiladores, calefacción, aire acondicionado y muchos otros aparatos eléctricos utilizados en establecimientos comerciales tales como mercados, restaurantes, etc.

Cargas industriales: las cargas industriales consisten en equipos en industrias de pequeña escala, industrias de mediana escala, industrias de gran escala, industrias pesadas e industrias artesanales.

Las agriculturas cargan este tipo de carga, principalmente las bombas de motor ajustan la carga para el riego. El factor de carga para esta carga es muy pequeño 0.15 a 0.20.

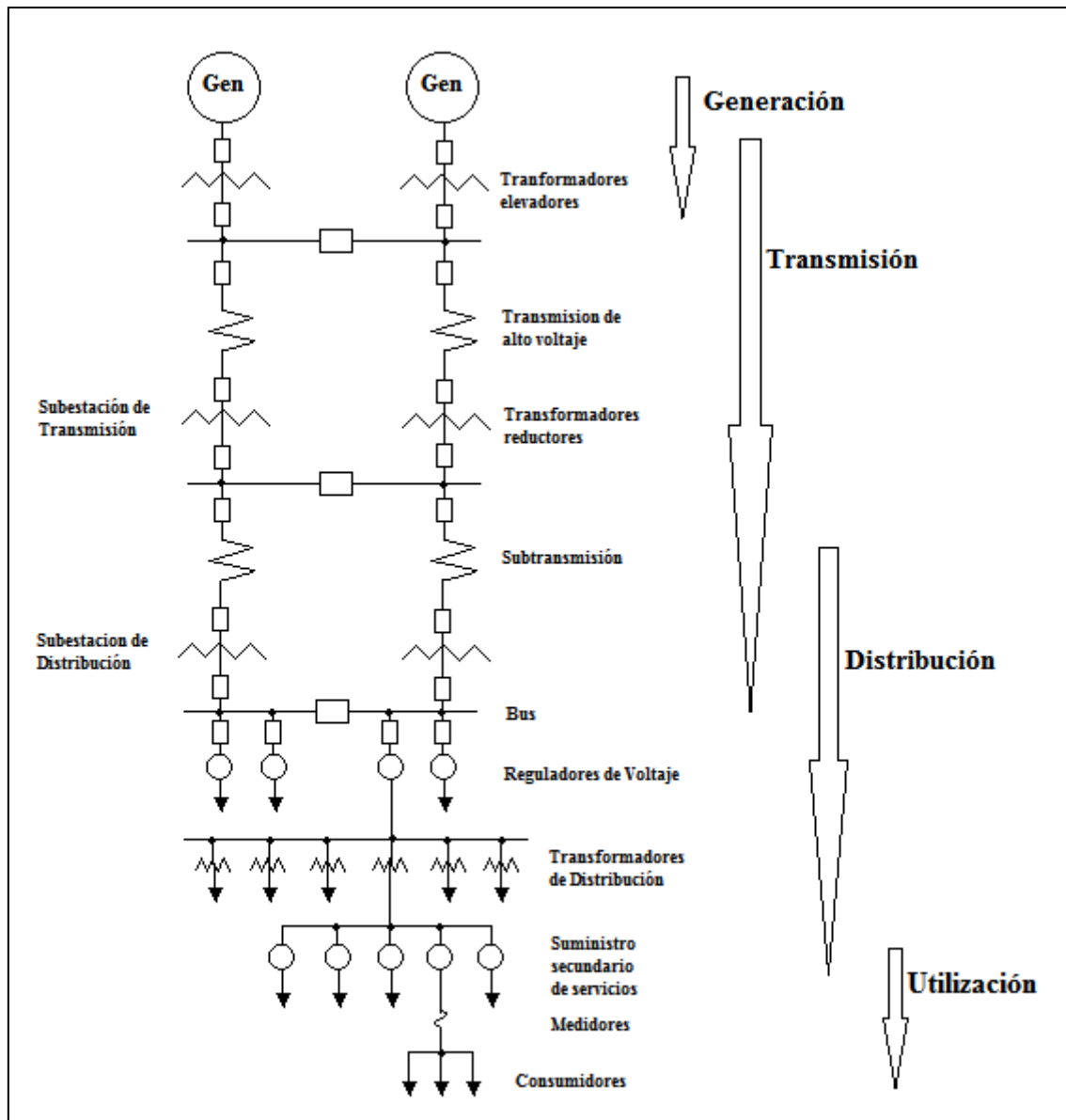


Figura 2. Divisiones del Sistema Eléctrico.

2.1.2. Características de Líneas de Transmisión.

Las aproximaciones de líneas de transmisión de corta y mediana longitud como un medio para introducir los parámetros ABCD, es conveniente representar una línea de transmisión por la red que está representada en el circuito equivalente de la Figura 3 donde V_s e I_s son la tensión del entrada del circuito, y V_r e I_r son la tensión y la corriente de salida del circuito [7].

$$V_S = A V_R + B I_R \text{ (Voltios)} \quad (1)$$

$$I_S = C V_R + D I_R \text{ (Amperios)} \quad (2)$$

I_S es la corriente de entrada del circuito equivalente de una línea de transmisión.

I_R es la corriente de salida del circuito equivalente de una línea de transmisión.

V_S es el voltaje de entrada del circuito equivalente de una línea de transmisión.

V_R es el voltaje de salida del circuito equivalente de una línea de transmisión.

En forma matricial se puede expresar de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde A, B, C y D son parámetros que dependen de la línea de transmisión constante R, L, C y G. Los parámetros ABCD son, en general, complejos números. A y D son adimensionales. B tiene unidades de ohmios, y C tiene unidades de siemens. Los textos de teoría de red [8] muestran que los parámetros ABCD se aplican a lineales, redes bilaterales pasivas de dos puertos, con la siguiente relación general:

$$AD - BC = 1 \quad (4)$$

El circuito en la figura 3 representa una línea de transmisión corta, por lo general aplicado a líneas aéreas de 60 Hz y que sea menor de 80 km de largo. Solo la resistencia en serie y reactancia están incluidos. La entrada a la derivación está descuidada. El circuito se aplica a una fase trifásica completamente transpuesta o monofásica en las líneas que funcionan bajo condiciones equilibradas por una transposición completa.

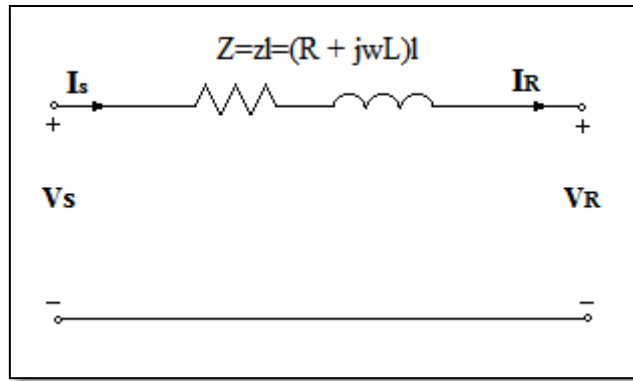


Figura 3. Circuito Equivalente de una Línea de Transmisión Corta.

2.1.2.1. Transmisión de Línea corta

La Línea trifásica, Z es la impedancia en serie, V_s y V_R son secuencia positiva Voltajes de línea a neutro e I_S e I_R son corrientes de línea de secuencia positiva. Para evitar alguna semejanza entre la impedancia total de la serie y la impedancia de la serie por unidad de longitud, se utiliza la siguiente notación:

Impedancia de la serie por unidad de longitud

$$z = R + j\omega L \quad (\Omega/m) \quad (5)$$

R es el valor resistencia

$j\omega L$ es la inductancia

L es el valor del inductor

Admitancia por unidad de longitud

$$y = G + j\omega C \quad (S/m)$$

Total de impedancias en serie

$$Z = z l \quad \Omega \quad (7)$$

l =Longitud de la línea m

Los parámetros ABCD para la línea corta en la figura 3. Se obtienen una ecuación LVK y LCK como:

$$V_S = V_R + ZI_R \quad (8)$$

Y respectivamente

$$I_S = I_R$$

I_S es la corriente de entrada del circuito equivalente de una línea de transmisión corta

I_R es la corriente de salida del circuito equivalente de una línea de transmisión corta.

V_S es el voltaje de entrada del circuito equivalente de una línea de transmisión corta.

V_R es el voltaje de salida del circuito equivalente de una línea de transmisión corta.

En forma matricial

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (9)$$

Comparando (9) y (3) los parámetros de ABCD para las líneas cortas son

$$A = D = 1 \quad \text{Por unidad}$$

$$B = Z \quad \Omega$$

$$C = 0 \quad S$$

2.1.2.2. Transmisión de Línea media.

Para líneas de longitud media, que normalmente oscilan entre 80 y 250 km con una frecuencia de 60 Hz, es muy común agrupar la capacitancia de derivación total y ubicar la mitad en cada extremo de la línea tal circuito, llamado circuito nominal π , como indica la Figura 4.

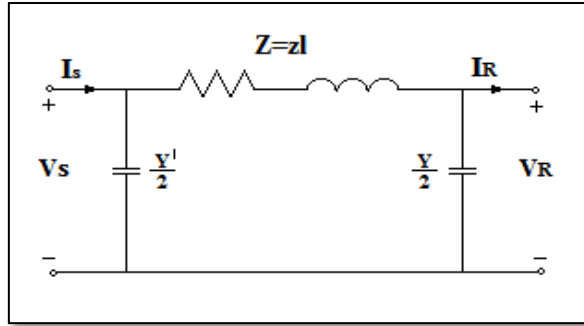


Figura 4. Circuito equivalente de una línea de transmisión media.

Para lograr obtener los parámetros ABCD del circuito nominal π , tenga en cuenta que la corriente en el circuito serie-paralelo en la Figura. 4 es igual $I_R + \frac{V_R Y}{2}$ entonces la ecuación de la ley de voltajes de kirchoff LVK.

$$V_S = V_R + Z \left(I_R + \frac{V_R}{2} \right) \quad (10)$$

$$= \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) V_R + Z I_R \quad (11)$$

La ley de corriente de Kirchoff corresponde a la siguiente forma.

$$I_S = I_R + \frac{V_R Y}{2} + \left[\left(1 + \frac{YZ}{2} \right) V_R + Z I_R \right] \frac{Y}{2} \quad (12)$$

$$= Y \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) V_R + \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) I_R \quad (13)$$

I_S Es la corriente de entrada del circuito equivalente de una línea de transmisión media

I_R Es la corriente de salida del circuito equivalente de una línea de transmisión media.

V_S Es el voltaje de entrada del circuito equivalente de una línea de transmisión media.

V_R Es el voltaje de salida del circuito equivalente de una línea de transmisión media.

Y Es la admitancia del circuito equivalente

Z Es la impedancia del circuito equivalente

En forma matricial la ecuación es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{YZ}{2} & Z \\ Y \left(1 + \frac{YZ}{4}\right) & 1 + \frac{YZ}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (14)$$

2.1.2.3. Transmisión de Línea larga.

Como se mencionaba anteriormente en las líneas de longitud corta y media, se obtuvieron modelos precisos suponiendo que los parámetros de línea se agrupan. En caso de que las líneas tengan más de 250 km de longitud, para obtener soluciones precisas, los parámetros deben tomarse como distribuidos uniformemente a lo largo de la longitud, como resultado de lo cual se derivan la tensión y la corriente en cualquier punto de la línea. Luego, con base en estas ecuaciones diferenciales en función $V(x)$ y $I(x)$, se obtiene un modelo π equivalente para la línea de transmisión larga. La figura 5 muestra una fase de una línea distribuida de longitud l km.

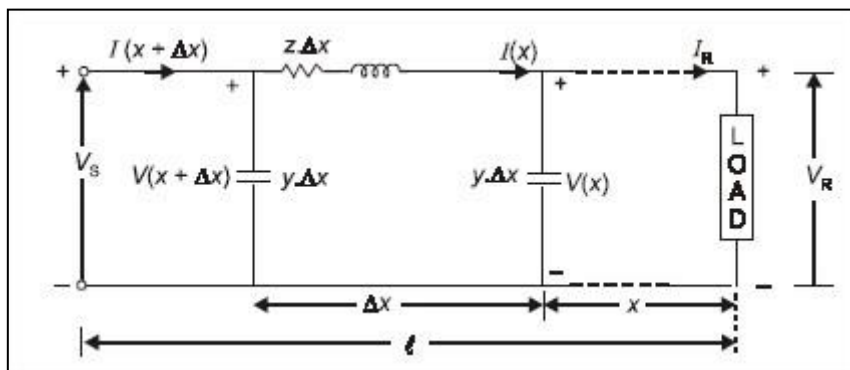


Figura 5. Circuito Equivalente de una Línea de Transmisión Larga.

Escribiendo la ecuación de la ley de voltaje de Kirchoff LVK para el circuito de la figura 5:

$$V(x + \Delta x) = V(x) + (z\Delta x)I(x) \text{ Voltios} \quad (15)$$

Reordenando la ecuación (15).

$$\frac{V(x+\Delta x) - V(x)}{\Delta x} = zI(x) \quad (16)$$

y tomando el límite cuando Δx se acerca a cero

$$\frac{dV(x)}{dx} = zI(x) \quad (17)$$

Del mismo modo, escribir una ecuación de la ley de corrientes de kirchoff LCK para el circuito,

$$I(x + \Delta x) = I(x) + (y\Delta x)V(x + \Delta x) \text{ Amperios} \quad (18)$$

Reordenando la ecuación,

$$\frac{I(x+\Delta x) - I(x)}{\Delta x} = yV(x) \quad (19)$$

y tomando el límite cuando Δx se acerca a cero,

$$\frac{dI(x)}{dx} = yV(x) \quad (20)$$

Las ecuaciones (17) y (20) son dos lineales de primer orden, homogéneas, diferenciales ecuaciones con dos incógnitas, $V(x)$ y $I(x)$ Podemos eliminar $I(x)$ al diferenciar (17) y usar (20) de la siguiente manera:

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = z \frac{dI(x)}{dx} = zyV(x) \quad (21)$$

Igualando a cero,

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} - zyV(x) = 0 \quad (22)$$

La ecuación (22) es una ecuación diferencial lineal de segunda orden homogénea con una variable desconocida $V(x)$ cuya solución por inspección es:

$$V(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \quad (23)$$

Donde A_1 y A_2 son constantes de integración y,

$$\gamma = \sqrt{zy} \quad m^{-1} \quad (24)$$

γ , cuyas unidades son m^{-1} , se llama constante de propagación. Al insertar (23) y (24) en (22), la solución a la ecuación diferencial puede ser verificada.

Usando la ecuación (23) en (17)

$$\frac{dV(x)}{dx} = \gamma A_1 e^{\gamma x} + \gamma A_2 e^{-\gamma x} = zI(x) \quad (25)$$

Despejando $I(x)$,

$$I(x) = \frac{A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x}}{z/\gamma} \quad (26)$$

Reemplazando la ecuación,

$$z/\gamma = z/\sqrt{zy} = \sqrt{z/y} \quad (27)$$

Se convierte en:

$$I(x) = \frac{A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x}}{Z_c} \quad (28)$$

Dónde:

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} \Omega \quad (29)$$

Z_c , cuyas unidades son Ω , se denomina impedancia característica. A continuación, las constantes de integración A_1 y A_2 se evalúan a partir de condiciones de frontera. En $x = 0$ el extremo receptor de la línea, el destinatario voltaje y corriente son

$$V_R = V(0) \quad (30)$$

$$I_R = I(0) \quad (31)$$

En la ecuación (23) y (28) también se reemplaza $x = 0$,

$$V_R = A_1 + A_2 \quad (32)$$

$$I_R = \frac{A_1 + A_2}{Z_c} \quad (33)$$

Despejando A_1 y A_2 ,

$$A_1 = \frac{V_R + Z_c I_R}{2} \quad (34)$$

$$A_2 = \frac{V_R - Z_c I_R}{2} \quad (35)$$

Sustituyendo A_1 y A_2 en (23) y (28), respectivamente,

$$V(x) = \left(\frac{V_R + Z_c I_R}{2} \right) e^{\gamma x} + \left(\frac{V_R - Z_c I_R}{2} \right) e^{-\gamma x} \quad (36)$$

$$I(x) = \left(\frac{V_R + Z_c I_R}{2Z_c}\right) e^{\gamma x} + \left(\frac{V_R - Z_c I_R}{2Z_c}\right) e^{-\gamma x} \quad (37)$$

Reordenando las ecuaciones (36) y (37),

$$V(x) = \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2}\right) V_R + Z_c \left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}\right) I_R \quad (38)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} \left(\frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2}\right) V_R + \left(\frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2}\right) I_R \quad (39)$$

Reemplazando las ecuaciones con funciones hiperbólicas

$$V(x) = \cosh(\gamma x) V_R + Z_c \sinh(\gamma x) I_R \quad (40)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x) V_R + \cosh(\gamma x) I_R \quad (41)$$

Las ecuaciones (40) y (41) se pueden establecer los parámetros ABCD de la línea. En formato de matriz,

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(x) & B(x) \\ C(x) & D(x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (42)$$

Donde

$$A(x) = D(x) = \cosh(\gamma x)$$

$$B(x) = Z_c \sinh(\gamma x)$$

$$C(x) = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma x)$$

La ecuación (42) permite calcular la tensión y también la corriente en cualquier instante

situado del punto x a lo largo de la línea en términos de la tensión y la corriente de salida del circuito. En la salida del circuito, donde $x=l$, $V(l) = V_s$ y $I(l) = I_s$. Es decir

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_c \sinh(\gamma l) \\ \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (43)$$

2.1.3. Flujo de potencia.

Los estudios de flujo de potencia se llevan a cabo por varias razones, algunas de las cuales son las siguientes:

1. Flujo en la línea
2. Voltajes del bus y ángulos de voltaje del sistema
3. El efecto del cambio en la configuración e incorporación de nuevos circuitos en el sistema cargando
4. El efecto de la pérdida temporal de su capacidad de transmisión y de generación del sistema carga y efectos acompañados.
5. El efecto de los voltajes de refuerzo en fase y cuadratura en la carga del sistema
6. Funcionamiento del despacho económico
7. Minimización de pérdida del sistema
8. Configuración del transformador para un funcionamiento económico
9. Posibles mejoras a un sistema existente por cambio de tamaño de los conductores y Voltajes del sistema.

Condiciones para el funcionamiento exitoso de un sistema de energía se establece lo siguiente:

1. Debería haber una generación de energía real adecuada para abastecer la demanda de energía en varios buses de carga y también las pérdidas
2. Las magnitudes de la tensión del bus se mantienen a valores muy cercanos a los valores máximos.
3. Los generadores, transformadores y líneas de transmisión no están sobrecargados en ningún punto de tiempo o la curva de carga.

En su mayoría, los estudios de flujo de potencia, se usa una representación monofásica de la red eléctrica, ya que el sistema generalmente está equilibrado, las redes se

simularon en analizadores de red para soluciones de flujo de carga. Estos analizadores son de tipo análogo, modelos miniatura reducida de sistemas de potencia con resistencias, reactancias, capacitancias, autotransformadores, transformadora, cargas y generadores. Los generadores son solo fuentes de suministro que operan a una frecuencia mucho más alta que 50 Hz para limitar el tamaño del componente. Las cargas están representadas por impedancias constantes. Los medidores se proporcionan en un panel para medir tensiones, corrientes y potencias. La solución de flujo de potencia es obtenido directamente de las mediciones para cualquier sistema simulado en el analizador.

Con el advenimiento de las computadoras digitales modernas que poseen un gran almacenamiento y una alta velocidad de respuesta, el modo en que los estudios de flujo de potencia han cambiado desde la simulación analógica a la digital.

Un gran número de algoritmos desarrollados para soluciones digitales de flujo de potencia. Los métodos básicamente se distinguen entre ellos en la tasa de convergencia, requisitos de almacenamiento y tiempo de cálculo. Las cargas están representadas generalmente por potencia constante.

Las ecuaciones de red se pueden resolver de varias formas de manera sistemática. El más método popular es el método nodo voltaje. Cuando las admitancias nodales o de los buses se utilizan complejas, se obtendrán ecuaciones simultáneas algebraicas lineales en términos de corrientes nodales o de bus.

Sin embargo, como en un sistema de potencia ya que las corrientes nodales no se conocen, pero las potencias son conocidas en casi todos los buses, las ecuaciones matemáticas resultantes se vuelven no lineales y se requieren para ser resuelto por métodos interactivos. Se requieren estudios de flujo de carga como ya se ha explicado para la planificación, operación y control del sistema de energía, así como para el análisis de contingencia. La matriz de admitancia se utiliza invariablemente en soluciones de flujo de potencia

Para una operación exitosa del sistema de potencia bajo y que sea trifásico balanceado normal las condiciones de estado estacionario se necesita que:

1. La generación suministra la carga o demanda más las pérdidas.
2. Las magnitudes de la tensión del bus permanecen cerca de los valores máximos.

3. Los generadores funcionan dentro de los límites especificados de potencia real y reactiva.
4. Las líneas de transmisión y los transformadores no estén con sobrecarga.

El programa de computadora de flujo de potencia (a veces llamado flujo de carga) es la herramienta básica para investigar estos requisitos. Este programa calcula la magnitud de voltaje y ángulo en cada bus de un sistema de baja potencia en condiciones balanceadas trifásicas de estado estacionario. También calcula la potencia real y reactiva flujos para todos los equipos que interconectan los buses, así como también las pérdidas de equipos.

El análisis convencional de nodos o bucles no es el correcto para el estudio del flujo de potencia porque los valores de entrada para las respectivas cargas se dan normalmente en términos de potencia y no de impedancia. Además, los generadores se consideran fuentes de alimentación y no de voltaje. Por lo tanto, la problemática del flujo de potencia formula un conjunto de ecuaciones no lineales adecuadas para la solución en alguna plataforma de programación.

Hoy, el sistema de transmisión es cada vez más llamado a servir como plataforma para habilitar sofisticadas transacciones energéticas.. Los sistemas de mayor complejidad y capacidad pueden permitir interconexiones y pronto acomodarán la capacidad de las entidades estatales y privados para prestar el servicio de carga (usuarios).

Para hacer esto de una manera satisfactoria, el estado del sistema, es decir, todos los voltajes (complejos) de todos los nodos en el sistema, deben ser conocidos.

Los flujos de potencia reactiva se pueden calcular, y otras cantidades relevantes pueden ser calculadas en general. El problema de con el flujo de carga es que se formula como un flujo no lineal de un conjunto de ecuaciones [7].

$$f(x, u, p) = 0 \tag{44}$$

Dónde

f es una función n-dimensional (no lineal).

x es un vector n-dimensional que contiene las variables de estado, o estados, como componentes. Estas son las magnitudes de voltaje y voltaje desconocidos ángulos de nodos en el sistema.

u es un vector con salidas de control (conocidas), voltajes en generadores con control de tensión.

p es un vector con los parámetros de los componentes de red, línea reactancias y resistencias.

El problema del flujo de carga CC consiste en formular las ecuaciones f en ecuación (44) y luego resolviendo con respecto a x .

Una condición necesaria para ecuación (44) tener una solución físicamente significativa es que f y x tienen la misma dimensión, es decir, que tenemos el mismo número de incógnitas que las ecuaciones. Pero en el En general, no existe una solución única, y también hay casos en que ninguna solución existe, si se conocen los estados x , todas las demás cantidades de interés del sistema pueden se puede calcular a partir de estas y las cantidades conocidas, es decir, u y p . Sistema cantidades de interés son activos y los flujos de potencia reactiva a través de líneas y transformadores, generación de energía reactiva a partir de máquinas sincrónicas, activos y consumo de potencia reactiva por cargas dependientes de voltaje, etc. Como se menciona anteriormente, las funciones f son no lineales, lo que hace que las ecuaciones sean más difíciles de resolver. En la solución de las ecuaciones se linealizan[8].

$$\frac{\partial f}{\partial x} \Delta x = \Delta y \quad (45)$$

Se usa y se soluciona bastante a menudo estas ecuaciones que brindan información muy útil sobre el sistema. La matriz Jacobiana $\frac{\partial f}{\partial x}$, cuyos elementos se dan por

$$\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} \quad (46)$$

Puede ser utilizado para muchos cálculos útiles, y es un indicador importante de las condiciones del sistema.

2.1.4.El Problema del Flujo de Potencia.

El problema del flujo de carga CC es el cálculo de la magnitud y la fase del voltaje ángulo en cada bus en un sistema de potencia en estado estacionario trifásico equilibrado condiciones Como subproducto de este cálculo, los flujos de potencia real y reactiva en equipos tales como generadores y transformadores, así como en equipos que estiman que las pérdidas sean elevadas.

El punto inicial para un problema de flujo de carga CC es el análisis del diagrama unifilar del sistema de poder, desde el cual los datos de entrada para soluciones de computadora pueden ser adquiridos. Los datos de entrada consisten en datos de bus, datos de línea de transmisión y transformador datos.

Como se muestra en la Figura 6, las siguientes cuatro variables se asocian con cada bus k: magnitud de tensión V_k , ángulo de fase δ_k , potencia real neta P_k y reactivo potencia Q_k suministrada al bus. En cada bus, dos de estas variables son especificados como datos de entrada, y los otros dos son incógnitas para ser calculados por el programa de flujo de potencia.

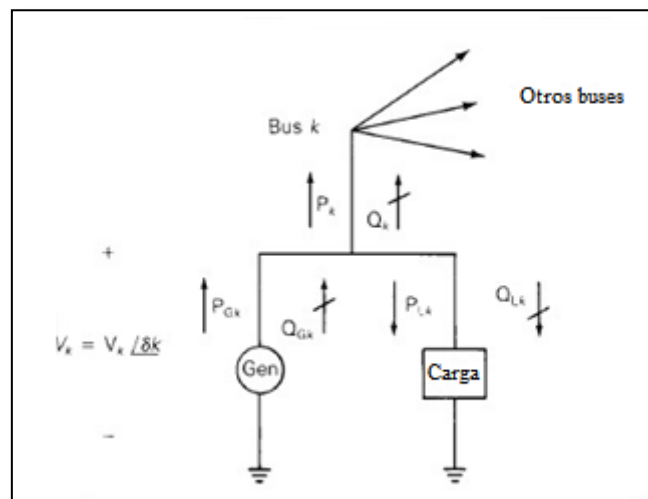


Figura 6. Circuito para Buses Variables.

Un problema en definir el tipo de bus (clasificación según el tipo de bus) es garantizar que el conjunto resultante de ecuaciones de flujo de potencia contiene el mismo número de ecuaciones como de incógnitas, como normalmente son necesarias para su resolución, aunque no siempre es suficiente.

La formulación del problema del flujo de carga clásico requiere considerar cuatro variables en cada bus i del sistema de potencia. Estas variables son:

1. P_i (inyección de potencia activa neta.)
2. Q_i (inyección de potencia reactiva neta.)
3. V_i (magnitud del voltaje.)
4. θ_i (ángulo de voltaje) Las inyecciones de potencia activa y reactiva.

Las inyecciones de potencia activa y reactiva se calculan de la siguiente forma:

$$P_i = P_{Gi} + P_{Di} \quad (47)$$

$$Q_i = Q_{Gi} + Q_{Di} \quad (48)$$

En el que P_{Gi} y Q_{Gi} son generaciones de energía activa y reactiva en el bus i , respectivamente, mientras que P_{Di} y Q_{Di} son demandas de potencia activa y reactiva en el bus, respectivamente.

Basado en la aplicación de las leyes de Kirchhoff a cada bus

$$I = YV \quad (49)$$

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{|V_i|} e^{-j\theta_i} \quad (50)$$

Dónde

I_i Net inyectó corriente en el bus i

V Vector de voltajes de bus

I Vector de corrientes que se suministra en los buses

Y matriz de admitancia de bus del sistema

I, V y Y son complejos. Y V_i es vector

Ecuaciones fundamentales para el flujo de carga.

Considere un sistema n-bus que los voltajes del bus son dados por

$$V = \begin{bmatrix} v_1 \angle \delta_1 \\ \dots \dots \dots \\ v_n \angle \delta_n \end{bmatrix} \quad (51)$$

La matriz de admitancia y susceptancia

$$[Y] = [G] + j[B] \quad (52)$$

Y la matriz de admitancia

G la matriz de conductancia

B la matriz de susceptancia

Usando la conservación de energía compleja, también tenemos para el ith bus de la figura 6 definimos lo siguiente:

$$S_i = \sum_{k=1}^n S_{ik} \quad (53)$$

Donde i = 1,2,3,.....,n

Conectados los buses a las líneas de transmisión podemos definir la I_i de los buses de la siguiente manera:

$$I_i = I_{Gi} - I_{Di} = \sum_{k=1}^n I_{ik} \quad (54)$$

Donde i = 1,2,3,.....,n

I_i es el total de la corriente de fase a que ingresa al sistema de transmisión, Considere i -th bus de un sistema de potencia como indica la figura 7. Las líneas de transmisión están representadas por su equivalente

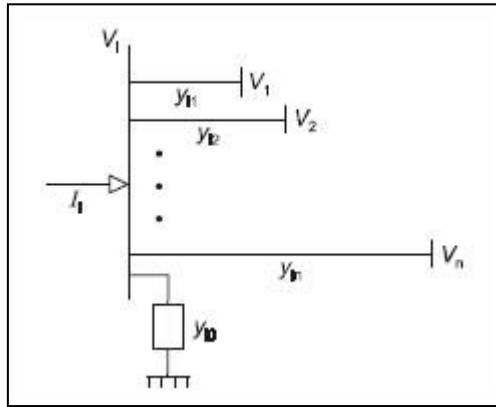


Figura 7. Sistema Equivalente de un Sistema de Potencia de Barra n.

Inyección neta de corriente I_i en el bus i se puede escribir como:

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \quad (55)$$

Simplificando

$$I_i = (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} \dots \dots) V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 \dots \dots \cdot y_{in}V_n \quad (56)$$

Definimos lo siguiente:

$$Y_{ii} = y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + y_{in} \quad (57)$$

$$Y_{i1} = -y_{i1}$$

$$Y_{i2} = -y_{i2}$$

•
•
•

$$Y_{in} = -y_{in}$$

Se obtiene,

$$I_i = Y_{ii}V_i + Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 \dots \dots Y_{in}V_n \quad (58)$$

O también puede ser representada de la siguiente manera:

$$I_i = Y_{ii}V_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik}V_k \quad (59)$$

La potencia real y reactiva inyectada en el bus i es

$$P_i - jQ_i = V_i \times I_i \quad (60)$$

Despejamos I_i

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i} \quad (61)$$

De la ecuación (59) y (61) tenemos lo siguiente:

$$Y_{ii}V_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik}V_k = \frac{P_i - jQ_i}{V_i} \quad (62)$$

Despejamos $Y_{ii}V_i$

$$Y_{ii}V_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik}V_k \quad (63)$$

Con lo que se concluye

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik}V_k \right] \quad (64)$$

2.1.5. Clasificación de los buses.

2.1.5.1. Bus de carga.

Un bus donde solo hay carga conectada y no existe generación es llamado un bus de carga. En este bus, la demanda de carga real y reactiva P_D y Q_D respectivamente del suministro. La demanda generalmente se estima o predice en el pronóstico de carga y medido desde instrumentos. Muy a menudo, la Potencia Reactiva es calculada a partir de la demanda real de potencia con un factor de potencia asumido. Un bus de carga es también llamado un bus P, Q . Dado que la carga demanda P_D y Q_D son valores conocidos en este bus. Las otras dos cantidades desconocidas en un bus de carga son la magnitud del voltaje y su ángulo de fase en el bus. En una ecuación de equilibrio de poder P_D y Q_D se tratan como cantidades negativas y las potencias generadas P_G y Q_G se asumen como positivas.

2.1.5.2. Bus controlado por Voltaje o bus de generador.

Un bus controlado por voltaje es cualquier bus en el sistema donde la magnitud del voltaje puede ser controlado por la potencia real desarrollada por un generador síncrono que puede ser variada cambiando la entrada del motor primario. Esto a su vez cambia el eje del rotor de la máquina posición con respecto a un eje de rotación o referencia síncrona o el bus de referencia. En otras palabras, el ángulo de fase del rotor está directamente relacionado con la potencia real generada por la máquina. La magnitud del voltaje, por otro lado, es influenciada principalmente por la corriente de excitación en el bobinado de campo. Por lo tanto, en un bus generador la generación de potencia real P por lo tanto se puede especificar la magnitud de tensión V . También es posible producir VARS utilizando bancos de condensadores o reactores. Para compensar los valores de retardo y adelanto consumidos y luego contribuya al voltaje controlado.

En un bus generador o bus controlado por voltaje, también llamado un bus PV, la potencia reactiva Q_G y Q_D son los valores que no se conocen y se deben calcular.

2.1.6. Métodos para la Resolución de flujos de potencia

En los sistemas de potencia existen varios métodos para resolver flujos de potencia entre los más importantes son:

- Gauss-Seidel.
- Newton-Raphson.
- Desacoplado.
- Flujo de potencia DC.

2.1.6.1. Método de Gauss-Seidel

Es un método iterativo muy simple. Sin embargo, cuando la solución inicial o punto de partida está muy cerca de la real la convergencia de solución generalmente se cumple.

En este método, se suponen los voltajes en todos los buses, excepto en el bus de referencia. El voltaje en el bus de referencia está especificado y permanece fijo. Las relaciones de tensión del bus (n-I).

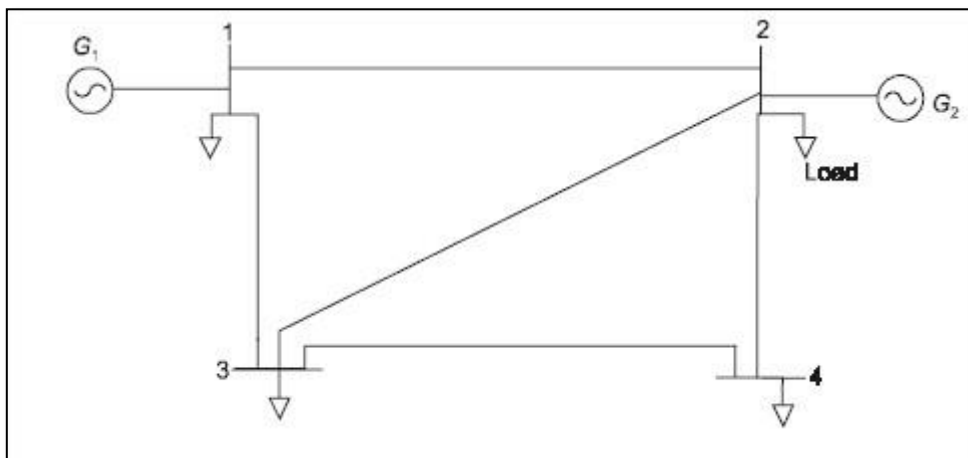


Figura 8 Sistema de Potencia de dos Generadores y cuatro cargas.

Para esta situación se tiene el siguiente sistema eléctrico de potencia dado $n=4$ bus de referencia $s=1$

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - \sum_{\substack{K=1 \\ K \neq i}}^n Y_{ik} V_k \right] \quad (65)$$

$i = 1, 2, 3, 4$

$i \neq s, y i \neq 1$

Entonces,

$$V_2 = \frac{1}{Y_{22}} \left[\frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} - \sum_{\substack{K=1 \\ K \neq 2}}^4 Y_{2K} V_K \right] \quad (66)$$

Se resuelve el sumatorio

$$V_2 = \frac{1}{Y_{22}} \left[\frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} - Y_{21} V_1 - Y_{23} V_3 - Y_{24} V_4 \right] \quad (67)$$

De igual manera,

$$V_3 = \frac{1}{Y_{33}} \left[\frac{P_3 - jQ_3}{V_3^*} - Y_{31} V_1 - Y_{32} V_2 - Y_{34} V_4 \right] \quad (68)$$

$$V_4 = \frac{1}{Y_{33}} \left[\frac{P_3 - jQ_3}{V_3^*} - Y_{41} V_1 - Y_{42} V_2 - Y_{43} V_3 \right] \quad (69)$$

En el método de Gauss-Seidel, el nuevo voltaje calculado será V_i^{p+1} que se reemplaza en V_i^p y se usa en las ecuaciones posteriores que pueden ser escritas en forma iterativa [5].

$$V_2^{p+1} = \frac{1}{Y_{22}} \left[\frac{P_2 - jQ_2}{(V_2^p)^*} - Y_{21} V_1 - Y_{23} V_3^p - Y_{24} V_4^p \right] \quad (70)$$

$$V_3^{p+1} = \frac{1}{Y_{33}} \left[\frac{P_3 - jQ_3}{(V_3^p)^*} - Y_{31} V_1 - Y_{32} V_2^{p+1} - Y_{34} V_4^p \right] \quad (71)$$

$$V_4^{p+1} = \frac{1}{Y_{44}} \left[\frac{P_4 - jQ_4}{(V_4^p)^*} - Y_{41} V_1 - Y_{42} V_2^{p+1} - Y_{43} V_3^{p+1} \right] \quad (72)$$

•
•
•

Calculo para la Potencia inyectada a la red

De la ecuación (62) se tiene,

$$Y_{ii}V_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik}V_k = \frac{P_i - jQ_i}{V_i} \quad (73)$$

Despejando la potencia activa y reactiva

$$P_i - jQ_i = V_i^* \left[Y_{ii}V_i + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik}V_k \right] \quad (74)$$

Dónde:

$$Y_{ii} = |Y_{ii}| \angle \theta_{ii}$$

$$Y_{ik} = |Y_{ik}| \angle \theta_{ik}$$

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i$$

$$V_i^* = |V_i| \angle -\delta_i$$

$$V_k = |V_k| \angle \delta_k$$

Se reemplaza en la ecuación (74) y obtenemos lo siguiente:

$$P_i - jQ_i = |V_i|^2 |Y_{ii}| \angle \theta_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \angle (\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (75)$$

$$P_i - jQ_i = |V_i|^2 |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + j |V_i|^2 |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) - \delta_i + j \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (76)$$

Separando la parte real y la parte imaginaria de la ecuación (76)

$$P_i = |V_i|^2 |Y_{ii}| \cos \theta_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (77)$$

Entonces,

$$\mathbf{P}_i = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (78)$$

Lo mismo para la parte imaginaria

$$-Q_i = |V_i|^2 |Y_{ii}| \sin \theta_{ii} + \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (79)$$

$$Q_i = - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (80)$$

2.1.6.2. Método de Newton-Raphson.

El método de Newton-Raphson es uno de los más eficientes para el sistema de potencias grandes, una ventaja de este método es el número de iteraciones para llegar a una solución independiente del tamaño del problema y en algoritmos computacionales es muy rápido. Los problemas de flujo de carga son formulados en forma polar.

Con las ecuaciones (78) y (80) se obtiene lo siguiente.

$$P_i = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \cos(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (81)$$

$$Q_i = - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |Y_{ik}| |V_i| |V_k| \sin(\theta_{ik} + \delta_k - \delta_i) \quad (82)$$

Las ecuaciones (81) y (82) constituyen ecuaciones algebraicas no lineales cuyas de las variables independientes son de magnitud de voltaje V en por unidad y ángulos de fase en radianes θ , se observa que ambas ecuaciones el voltaje del bus expandiendo la ecuación (81) y (82) en series de Taylor en términos de orden superior se obtiene:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^p \\ \vdots \\ \Delta P_n^p \\ \Delta Q_2^p \\ \vdots \\ \Delta Q_n^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_2}\right)^p & \left(\frac{\partial P_2}{\partial \delta_n}\right)^p & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|}\right)^p & \left(\frac{\partial P_2}{\partial |V_n|}\right)^p \\ \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_2}\right)^p & \left(\frac{\partial P_n}{\partial \delta_n}\right)^p & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_2|}\right)^p & \left(\frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}\right)^p \\ \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2}\right)^p & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n}\right)^p & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|}\right)^p & \left(\frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|}\right)^p \\ \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2}\right)^p & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n}\right)^p & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|}\right)^p & \left(\frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|}\right)^p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^p \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^p \\ \Delta |V_2|^p \\ \vdots \\ \Delta |V_n|^p \end{bmatrix} \quad (83)$$

En la ecuación anterior, el bus n-1 se supone que es el bus de referencia. La ecuación (83) puede ser escrita de una forma muy corta:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (84)$$

2.1.6.3.Desacoplado.

Las contingencias son una gran preocupación en las operaciones del sistema de energía. Por ejemplo, el personal operativo necesita saber qué cambios de flujo de energía ocurrirán debido a una interrupción del generador en particular o interrupción de la línea de transmisión. Información de contingencia cuando se obtiene en tiempo real, se puede usar para anticipar problemas causado por tales interrupciones, y puede ser utilizado para desarrollar estrategias operativas para superar los problemas.

Las líneas de transmisión de los sistemas de potencia tienen una relación R / X muy baja. Para dicho sistema, la falta de coincidencia de potencia real ΔP es menos sensible a los cambios en la magnitud del voltaje y muy sensible a los cambios en el ángulo de fase $\Delta \delta$. Similarmente, la diferencia de potencia reactiva ΔQ . Por lo tanto, es razonable establecer los elementos J2 y j3 de la matriz jacobiana reduce a:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_1 & 0 \\ 0 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} \quad (85)$$

$$\Delta P = J_1 \Delta \delta \quad (86)$$

$$\Delta Q = J_4 \Delta |V| \quad (87)$$

Para los buses controlados por voltaje, las magnitudes de voltaje son conocidas. Por lo tanto, si m buses del sistema están controlados por voltaje, \mathbf{J}_1 es del orden $(n-1) \times (n-1)$ y \mathbf{J}_4 es del orden $(n-1-m) \times (n-1-m)$.

Ahora los elementos diagonales de \mathbf{J}_1 son:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |V_i| |V_k| |V_{ik}| \sin(\theta_{ik} - \delta_i + \delta_k) \quad (88)$$

Los elementos fuera de diagonal de \mathbf{J}_1 son:

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_k} = -|V_i| |V_k| |V_{ik}| \sin(\theta_{ik} - \delta_i + \delta_k) \quad (89)$$

Donde $k \neq i$

Los elementos de la diagonal \mathbf{J}_4 son:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_i|} = -2|V_k| |V_{ik}| \sin(\theta_{ii}) - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n |V_k| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} - \delta_i + \delta_k) \quad (90)$$

Los elementos fuera de diagonal de \mathbf{J}_4 son:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_k|} = -|V_i| |Y_{ik}| \sin(\theta_{ik} - \delta_i + \delta_k) \quad (91)$$

Donde $k \neq i$

Los términos ΔP_i^p y ΔQ_i^p es la substracción entre los valores programados y valores calculados en el bus i conocidos como residuos de potencia dados por:

$$\Delta P_i^p = P_i^{programado} - P_{i(calculado)}^p \quad (92)$$

$$\Delta Q_i^p = Q_i^{programado} - Q_{i(calculado)}^p \quad (93)$$

Los nuevos voltajes de bus de magnitudes y ángulos son:

$$|V_i|^{p+1} = |V_i|^p + \Delta|V_k|^p \quad (94)$$

$$\delta_i^{p+1} = \delta_i^p + \Delta\delta_k^p \quad (95)$$

2.1.6.5. Flujo de Potencia DC.

El flujo de carga CC o flujo de potencia DC es una aproximación del flujo de potencia convencional que se conocen comúnmente.

Este tipo de flujo transforma las ecuaciones no lineales del flujo de potencia en ecuaciones lineales a través de ciertas suposiciones, que son las siguientes:

- Todas las barras que presenta el sistema, tienen una magnitud de voltaje 1.0 pu (por unidad)
- Las resistencias de todas líneas entre cada barra se desprecian.

Bajo estas circunstancias se conocerá un estimado de la distribución de la potencia activa por la red. Por lo tanto, se plantea únicamente la ecuación de potencias activas netas que se inyectan en las barras, se concluye que:

$$P_p = \sum_{i=1}^n V_p V_q (G_{pq} \cos \delta_{pq} + B_{pq} \sin \delta_{pq}) \quad (96)$$

$$P = 1, \dots, n$$

$$n = \# \text{ de barras}$$

$p \neq$ barra osc.

Según los valores estimados:

$$V_p = V_q = 1,0 \text{ y } G_{pq} \approx \emptyset$$

luego:

$$P_p = \sum_{q=1}^n B_{pq} \text{ sen } \delta_{pq} \quad (97)$$

$$\text{sen } \delta_{pq} = \delta_{pq} \text{ (rad)}$$

$$\delta_{pq} = \delta_p - \delta_q$$

Esto quiere decir, que se tiene un conjunto de ecuaciones lineales donde las variables desconocidas son los ángulos de voltaje de las barras del sistema. Si el conjunto de ecuaciones (97) es equivalente a:

$$P_p = \sum_{q=1}^n B_{pq} \delta_q \quad (98)$$

Expresando matricialmente se tiene:

$$\theta = [B]^{-1} P \quad (99)$$

$$P_L = (b \times A) \theta \quad (100)$$

Dónde:

[B] = matriz formada por la parte imaginaria de la matriz admitancia de barra donde $R=0$.

\vec{P} = vector de todas las potencias netas inyectadas a las barras.

$\vec{\theta}$ = vector de todos los ángulos de voltaje de las barras. (Para los buses 1, ..., N).

P_L = vector de flujo en los ramales (donde M es el número de ramales).

b = Matriz susceptancia.

A = Matriz de incidencia.

Para la resolución del sistema lineal (4) se encuentra el vector $\vec{\delta}$ y como consecuencia se puede calcular el flujo de potencia activa que circula por todos los elementos de interconexión:

$$P_{pq} = \frac{1}{x_{pq}} (\delta_p - \delta_q) \quad (101)$$

X_{pq} = Reactancia de la barra p y q

Puesto a que se establece que las líneas de transmisión no tienen resistencias, que considera un sistema ideal sin pérdidas, es decir [2].

$$\sum_{p=1}^n P_p = 0 \quad (102)$$

$$P_{osc} = -\sum_{p=1}^n P_p \quad (103)$$

$p \neq$ barra osc

El modelo linealizado $P = B' \theta$ se puede interpretar como el modelo para un red de resistencias alimentadas por fuentes de corriente continua donde P es el vector de nodal inyecciones actuales, θ es el vector nodal de voltajes de CC, y B es la matriz de conductancia, que se presenta en la Figura 9 [10].

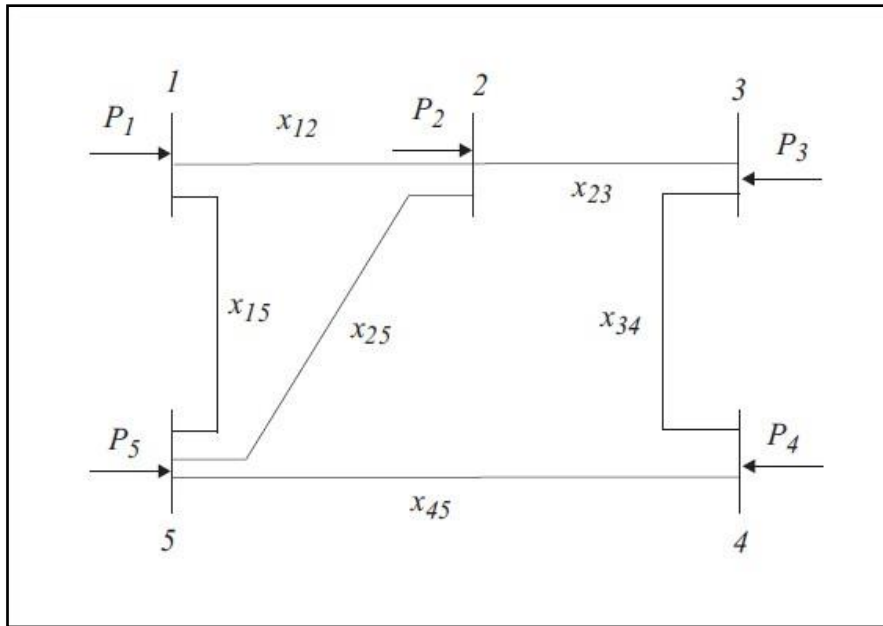


Figura 9. Red de bus.

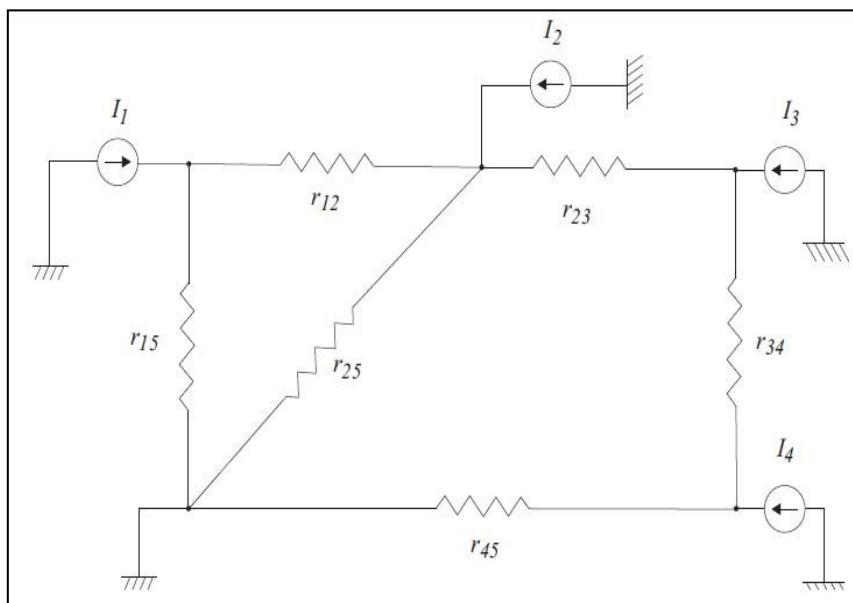


Figura 10. Modelo de Flujo de Carga de corriente directa.

2.1.7. Importancia de la utilización del flujo de carga CC.

- La información obtenida con este método presentan resultados de flujos de potencia activa en las líneas con valores cercanos a los obtenidos usando el modelo no lineal cuya aproximación es del 5 – 10%

- La Ejecución en programas es robusto y con poca codificación
- En determinados tipos de problemas, como en el planeamiento de sistemas de transmisión, la estructura de los datos lleva con frecuencia a la no convergencia del flujo de carga no lineal convencional. En estos casos es mejor una información de flujos de potencia activa que permitiría encontrar puntos de criticidad que entrega el sistema; en ciertos casos la linealidad se pierde puede no converger y todos los datos serían incongruentes.
- La aproximación es válida solamente para sistemas de transmisión; esto es, para niveles elevados de tensión. La aproximación es mejor cuanto mayor fuese el nivel de tensión.

El modelo de flujo de carga CC no tiene en cuenta las magnitudes de las tensiones nodales y el flujo de potencia [3].

CAPÍTULO III

3. MATERIALES Y MÉTODOS.

3.1. Construcción del Módulo de pruebas para Circuitos Eléctricos.

Para la construcción del módulo elaboro una planificación para esto se considera un diseño en la plataforma de AUTOCAD para los planos eléctricos y también para la parte mecánica y la obtención de los materiales.

Se plantea para facilidad del lector dos partes de diseño:

- Diseño mecánico
- Diseño eléctrico

3.1.1. Diseño mecánico

Se realiza los planos topológicos del módulo de circuitos eléctricos

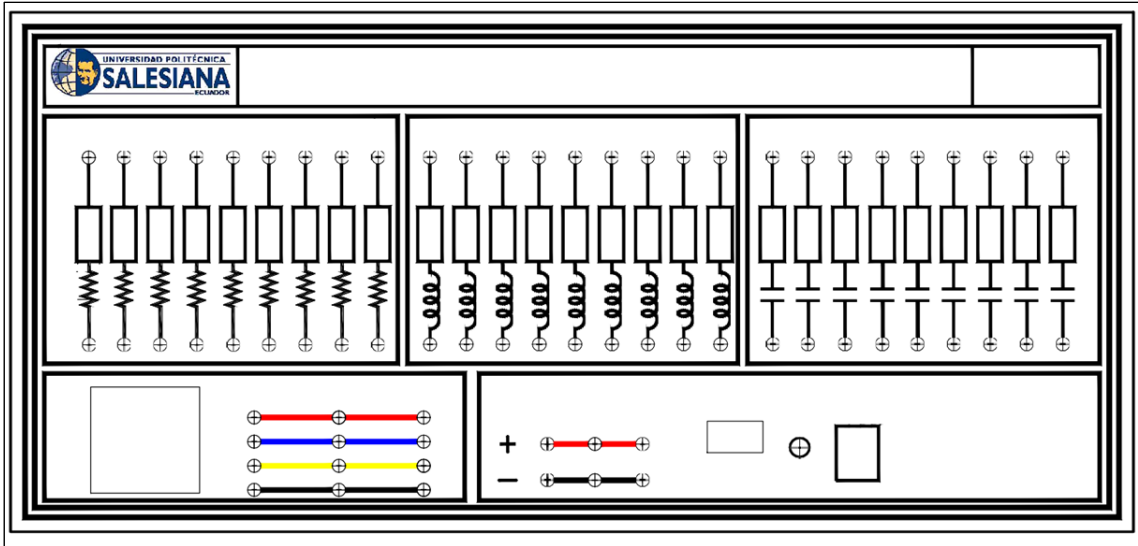


Figura 11. Diagrama para el Calado y Diseño del vinilo para el Módulo.

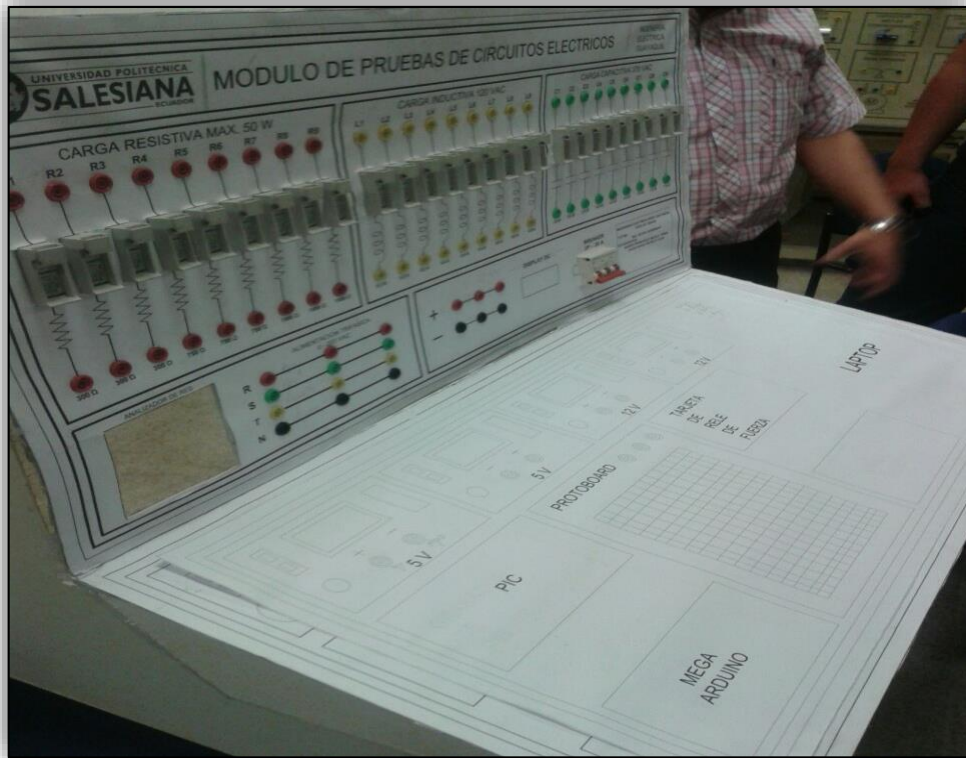


Figura 12 . Maqueta del Módulo con sus respectivos componentes.

Consta en los materiales para la base del módulo y forma del mismo para esto se realizó una maqueta como se muestra en la figura 13 Luego se realiza la estructura en plancha de 2 mm con sus respectivas soldaduras para un mejor acabado además se debe realizar el calado donde se van a colocar los componentes dejando un espacio de error para que el dispositivo no tenga dificultad para colocarse que se puede observar en la figura 13.



Figura 13. Calado de la estructura metálica.

Luego para el acabado final el pintado que se realizó con pintura en polvo de color negro y pintura sintética de color amarillo el período de secado duro 1 día.

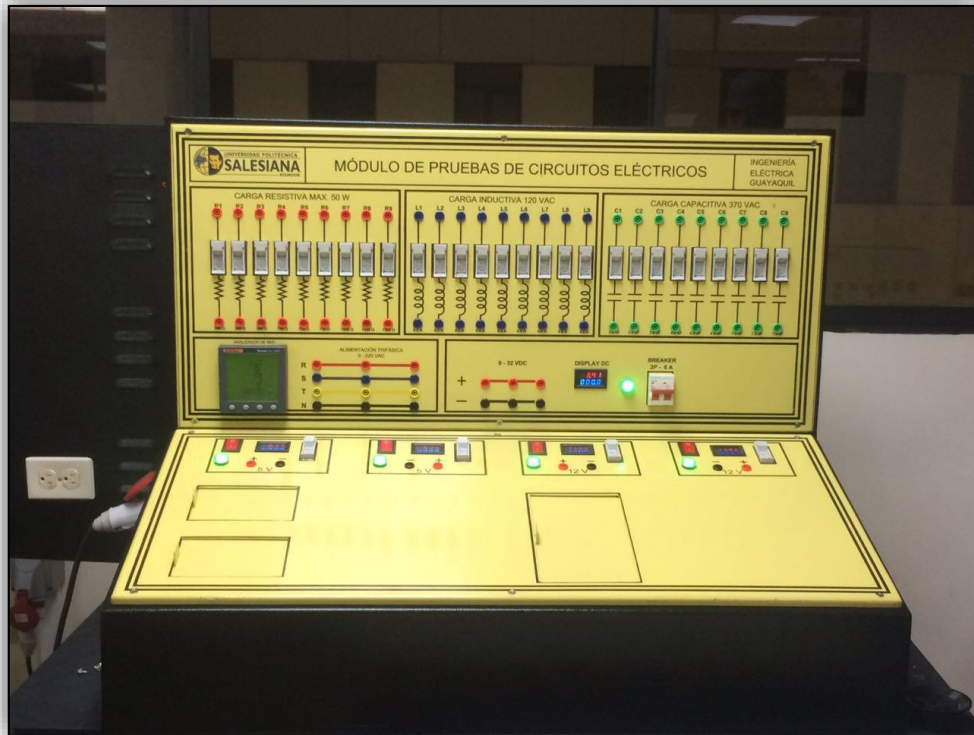


Figura 14. Módulo de pruebas de circuitos eléctricos.

3.1.2. Diseño Eléctrico

Para esta parte se realizó el diagrama eléctrico de modulo y su correspondiente instalación y conexionado de componentes y dispositivos eléctricos para su funcionamiento.

Los componentes eléctricos y electrónicos son:

- Relés 110v a 24v AC.
- Transformador 110/220 V AC.
- Portafusiles.
- Luces piloto 110/220V AC.
- Disyuntores .
- Inductores.
- Resistores .
- Capacitores.

- Pantallas.
- Autotransformador variable 110 V AC.
- Fuente de alimentación de computadora 200 W.
- Interruptores I/O.
- Terminales sujetadores 4mm.
- Puentes rectificadores.
- Fusibles.
- Borneras para terminales horquilla.
- Analizador de red POWERLOGIC PM700.
- Cable #16 AWG.

En la figura se muestra la conexión e instalaciones de los dispositivos



Figura 15. Conexión de resistencias fusibles e inductores.

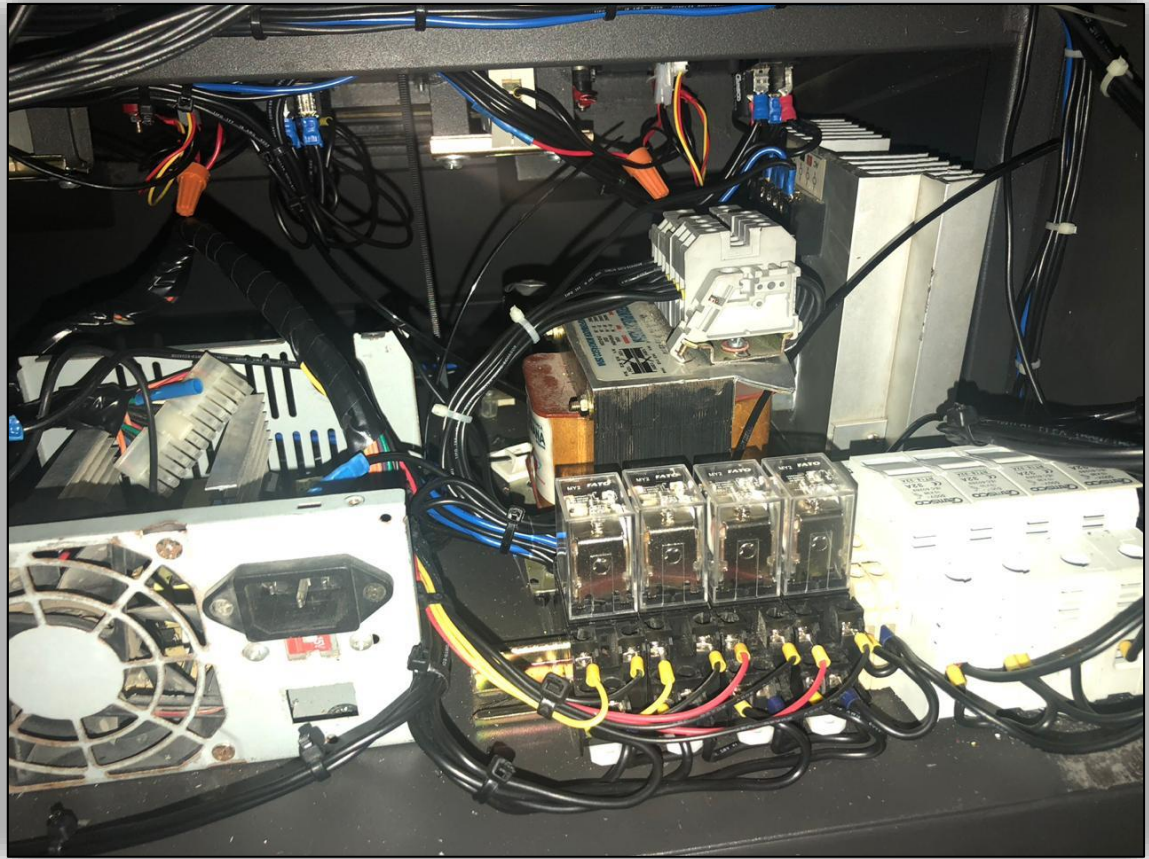


Figura 16. Conexión de relés fuente de alimentación y parte rectificadora de 24V.



Figura 17. Conexionado de capacitores.

3.2. Materiales.

Entre los materiales a usar en la práctica se encuentran módulos y dispositivos para la respectiva toma de lectura de valores reales de la práctica general entre ellos tenemos:

3.2.1. Módulo de sincronismo.

El permite hacer pruebas para sincronismos de generadores y también cuenta con una barra infinita para los métodos de sincronismo que son importantes en los sistemas de potencia y curvas de magnetización de un generador.



Figura 18. Banco de pruebas para máquina síncrona.

3.2.2. Módulo de circuitos eléctricos

Permite evaluar, determinar valores de corriente de tensión en corriente directa ya que cuenta con múltiples dispositivos y componentes como son resistores, capacitores e inductores además poseen pantallas que permiten disponer de resultados visibles.

3.2.3. Dinamómetro

Es maquina DC que está compuesto por una bobina de campo en serie un devanado de armadura que permite que funciona con 125 V a su vez funcionar como generador tiene un panel principal de protección con disyuntor y fusible.

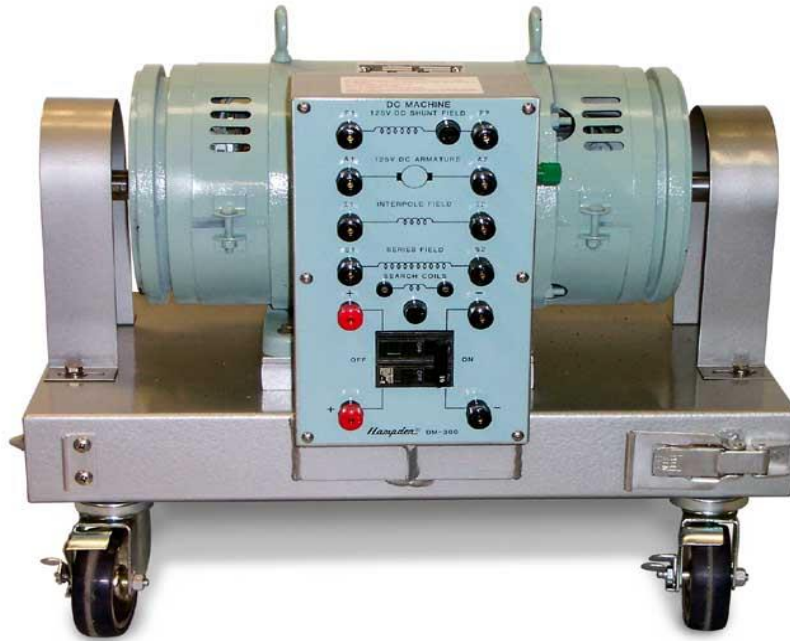


Figura 19. Dinamómetro

3.2.4. Máquina Síncrona

El modelo SM-300 es una máquina de bobinado compuesto compensado de dos polos que consta de un campo de derivación, un campo de serie, un devanado de armadura y un devanado interpolar. Un interruptor de protección de dos polos se proporciona en la caja de terminales. Tanto el campo de derivación como las bobinas de búsqueda están protegidos con fusibles, con los fusibles ubicados en el panel de terminales.

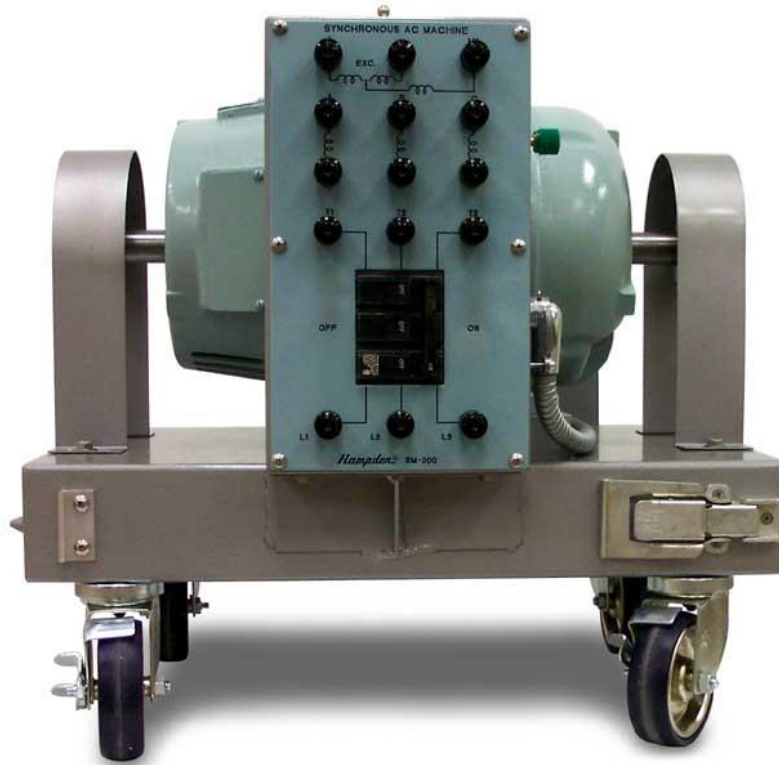


Figura 20. Máquina Síncrona SM-300

3.3. Practica general para el análisis de flujo de potencia DC

Según el sistema de potencia mostrado en la figura 11. Los cálculos teóricos y según los datos de la a tabla.1 se realizaran a continuación:

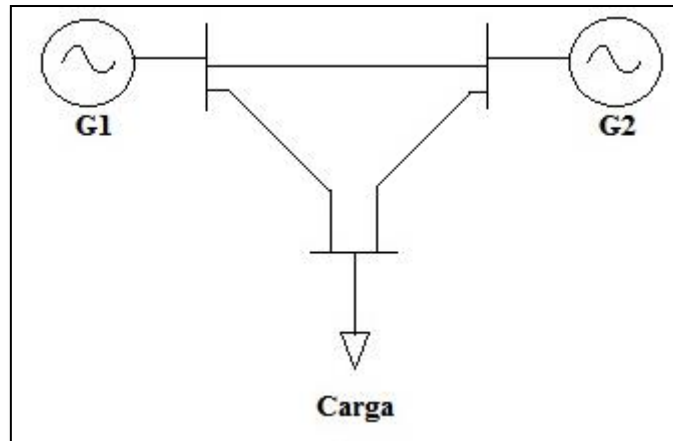


Figura 21. Diagrama unifilar de la práctica, los autores.

Tabla 1. Datos de impedancia de las líneas

Impedancia de las líneas $10^{-4} \Omega$	
z1 1-2	4,67344
z1 2-3	4,15417
z1 3-1	8,30834

Tabla 2. Datos de Admitancia de las líneas

Admitancia de la líneas $10^3 \frac{1}{\Omega}$	
y11	2,13974979
y12	2,407218514
y13	1,203609257

Tabla 3. Datos de potencia de los generadores y cargas

Pn(potencias) pu.
0
1,5124
-2,414

Primero configuramos la matriz de admitancia

$$\begin{pmatrix} 3343.35905 & -2139.74979 & -1203.60926 \\ -2139.74979 & 4546.9683 & -2407.21851 \\ -1203.60926 & -2407.21851 & 3610.827771 \end{pmatrix}$$

Determinar la matriz potencia

$$\begin{pmatrix} 0 \\ 1.5121 \\ -2.414 \end{pmatrix}$$

Se suprime la primera fila con la primera columna.

$$[B] = \begin{pmatrix} 4546.9683 & -2407.21851 \\ -2407.21851 & 3610.827771 \end{pmatrix}$$

Se realiza la inversa de la matriz resultante de la admitancia.

$$\begin{pmatrix} 4546.9683 & -2407.21851 \\ -2407.21851 & 3610.827771 \end{pmatrix}^{-1}$$

La inversa de la matriz $[B]$.

$$[B]^{-1} = \begin{pmatrix} 0.00033989 & 0.00022659 \\ 0.00022659 & 0.00042801 \end{pmatrix}$$

Luego se resuelve la siguiente ecuación con los datos obtenidos de potencia y admitancia

$$\theta = [B]^{-1} P$$

Se reemplaza los valores de la Matriz inversa

$$\theta = \begin{pmatrix} 0.00033989 & 0.00022659 \\ 0.00022659 & 0.00042801 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1.5121 \\ -2.414 \end{pmatrix}$$

Los ángulos de cada barra son:

$$\theta = \begin{pmatrix} 3.29464E - 05 \\ 0.000690509 \\ 0.000657563 \end{pmatrix}$$

Con este resultado se obtienen los flujos de potencias de las líneas son:

$$\begin{pmatrix} PL_{1-2} \\ PL_{2-3} \\ PL_{3-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.07049697 \\ 1.66220606 \\ 0.79144848 \end{pmatrix}$$

Tabla 4. Resultados del flujo de potencia por unidad (pu)

Flujo de Potencia	Tipo de resolución		
	MATLAB®	Algebraica	Real
P1-2	0.070497	0.070496970	0.0068
P2-3	1.582897	1.66220606	1.5124
P1-3	0.831103	0.791448480	0.714

Tabla 5. Resultados del flujo de potencia Real en W

Flujo de Potencia	Tipo de resolución		
	MATLAB®	Algebraica	Real
P1-2	0.070497	0.070496970	0.0714
P2-3	15.82897	16.6220606	15.124
P1-3	8.31103	7.91448480	7.140

$$\% = \frac{\text{valor teórico} - \text{valor real}}{\text{valor teórico}}$$

$$\%P1 - 2 = \frac{0.070496970 - 0.0714}{0.070496970} = 0.03541$$

$$\%P1 - 2 = 3.541\%$$

$$\%P2 - 3 = \frac{16.6220606 - 15.124}{16.6220606} = 0.0901 \times 100$$

$$\%P2 - 3 = 9.01\%$$

$$\%P1 - 3 = \frac{7.91448480 - 7.140}{7.91448480} = 0.0979$$

$$\%P1 - 3 = \mathbf{9.79\%}$$

3.4. Simulación en MATLAB®.

La codificación de este apartado se basa en la investigación que argumenta una resolución de distintos sistemas de potencias de n barras donde es muy práctico y propone resultados óptimos y ajustables a cualquier diseño. A continuación muestra el resultado del ingreso de los datos y su resolución [20].

Input the unit system to be used in calculation: (1 or 2)

1.Per-unit system

2.Absolute unit system

1

Choose the way how to input matrix B:

1.You wish to enter the values of B line by line?

2.You have already calculated B and wish to input it as a matrix?

3.You wish to input the matrix B from an excel file?

2

1.Input matrix B that represents the susceptance matrix:

```
B=[3343.35905 -2139.74979 -1203.609257 ; -2139.74979
4546.9683 -2407.218514 ; -1203.60926 -2407.21851
3610.827771]
```

Reduced susceptance matrix, with taking 1 as the reference node is:

Br =

1.0e+003 *

4.5470 -2.4072
-2.4072 3.6108

2. Input the injected active power vector, $P(n) = P_g(n) - P_d(n)$

$P = [0 \ 1.5124 \ -2.414]$

Reduced vector of injected active power is:

$P_r =$

1.5124
-2.4140

Resultados de la resolución con MATLAB® obtenida de los datos presentados anteriormente.

SOLUTION:

Angles in radians on the bus voltage phasors are:

teta1 = 0.0000 rad (0.0000 degrees)

teta2 = 0.0000 rad (0.0019 degrees)

teta3 = 0.0007 rad (0.0396 degrees)

Active power flows calculated by linear DC method are:

Pa1-2 = 0.070497 p.u.

Pa1-3 = 0.831103 p.u.

Pa2-3 = 1.582897 p.u.

Codificación.

%DC Load Flow Analysis

```

unitsystem=input('Input the unit system to be used in calculation: (1
or 2)\n 1.Per-unit system\n 2.Absolute unit system\n');
if unitsystem~=1 && unitsystem~=2
    while unitsystem~=1 && unitsystem~=2
        fprintf('Error! You must choose between these two systems!');
        unitsystem=input('Input the unit system used in calculation: (1 or
2)\n 1.Per-unit system\n 2.Absolute unit system\n');
    end
end
matrixinput=input('Choose the way how to input matrix B:\n 1.You wish
to enter the values of B line by line? \n 2.You have already
calculated B and wish to input it as a matrix?\n 3.You wish to input
the martix B from an excel file?\n');
if matrixinput==1
    N=input('Enter the number of nodes in the system?\n');
    B=zeros(N);
    W=index_sorting(N);
    fprintf('Enter the suceptance values, line by line:\n')
    fprintf('(If the certain line does not exist, type zero)\n')
    fprintf('HINT: For the value e.g. j*B1-2=-j10 type -10 (B1-2=B2-1)
\n')
        for i=1:length(W)
            if W(i)<100
                divider=10;
            elseif W(i)>=100
                divider=100;
            elseif W(i)>=1000
                divider=1000;
            elseif W(i)>=10000
                divider=10000;
            end
            row=fix(W(i)/divider);
            column=(rem(W(i),divider));
            fprintf('B%d-%d= ',row,column);
            B(row,column)=input('\n');
            B(row,column)=-B(row,column);
            B(column,row)=B(row,column);
        end
        for i=1:N
            B(i,i)=-sum(B(i,1:N));
        end
        B
        r=N;
elseif matrixinput==3
    input_B_excel
elseif matrixinput==2
B=input('1.Input matrix B that represents the supceptance matrix: \n
B=');
[r k]=size(B);
if r~=k || r==1
    while r~=k || r==1
        fprintf('Error! You need to enter square nXn matrix B!\n');
        B=input('Input matrix B that represents the supceptance matrix \n
B=');
    end
end
[r k]=size(B);
end
Bpom=B;
Bpom(1,:)=[];
Bpom(:,1)=[];

```



```

        Br=Bpom;
        fprintf('Reduced suceptance matrix, with taking 1 as the
reference node is:\n');
    Br
    if matrixinput==3
        input_P_excel
    else
        P=input('2.Input the injected active power vector, P(n)=Pg(n)-
Pd(n)\n P=');

        if length(P)~=r
            while length(P)~=r
                fprintf('Error! Input the vector of injected active powers
for %.1d nodes system, which means vector P has to have that many
elements\n', r);
                P=input('Input the injected active power vector, P(n)=Pg(n)-
Pd(n)\n P=');
            end
        end
        Ppom=P;
        Ppom(1)=[];
        fprintf('Reduced vector of injected active power is:\n');
        Pr=Ppom'
    end
    if unitssystem==1
c=linsolve(-Br,Pr);
teta=[];
teta(1)=0;
for i=2:length(Pr)+1
    teta(i)=c(i-1);
end
teta(abs(teta)<1e-15)=0;
    elseif unitssystem==2
        U=input('Input the nominal voltage of the network in [kV]
?\n U=');
        U=U*U;
        teta=[0];

        c=-(1/U)*(inv(Br))*Pr
        teta=[teta; c];

    end
    fprintf('SOLUTION:\n');
    fprintf('Angles in radians on the bus voltage phasors are:\n');
    for i=1:r
        fprintf('teta%.d = %.4f rad  (%.4f degrees)
\n',i,teta(i),rad2deg(teta(i)));
    end

W=index_sorting(r);
fprintf('Active power flows calculated by linear DC method are:\n');
for i=1:length(W)
    if W(i)<100
        divider=10;
    elseif W(i)>=100
        divider=100;
    elseif W(i)>=1000
        divider=1000;
    elseif W(i)>=10000

```


```

        divider=10000;
    end
    row=fix(W(i)/divider);
    column=(rem(W(i),divider));
    if B(row,column)==0
        Pa(i)=0;
    else
    Pa(i)=(teta(row)-teta(column))/inv(B(row,column));
    end
    if unitssystem==1 && Pa(i)~=0
fprintf('Pa%d-%d = %2f p.u.\n',row,column,Pa(i));
    elseif unitssystem==2 && Pa(i)~=0
        fprintf('Pa%d-%d = %2f MW\n',row,column,Pa(i)*U);
    end
end
answer=input('Input the further calculation based on previous
stationary model or press ctrl+c to exit:\n 1.Generator contingency\n
2.Line contingency\n 3.Both generator and line contingecy\n 4.Full N-1
analysis \n 5.Full N-1-1 analysis \n ');
if answer==1
    generator_contingency
elseif answer==2
    line_contingency
elseif answer==3
    generator_and_line_contingency
elseif answer==4
    N_1_calculation
elseif answer==5
    N_1_1_calculation
end

```

CAPÍTULO IV

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

PRÁCTICA #1	
	MANUAL DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO
CARRERA:	Ingeniería Eléctrica
SEDE:	Guayaquil

3.2. PRÁCTICAS DEL MÓDULO DIDÁCTICO

4.1.1. Práctica 1

Tema: Análisis del método flujo DC de un sistema de potencia.

Objetivos:

Objetivo general:

Lograr el sincronismo de dos generadores para el análisis del flujo de potencia DC.

Objetivos específicos:

- Obtener la matriz de admitancia del sistema de n barras.
- Obtener los ángulos de cada barra del Sistema de Potencia.
- Realizar el sincronismo de generadores en un sistema de potencia.

Recursos:

- Máquina sincrónica SM-300.
- Dinamómetro DYN-400.
- Módulo de pruebas de circuitos eléctricos.
- Banco de pruebas para máquinas sincrónicas.

Tiempo estimado:

El tiempo estimado para la práctica es de 2 horas.

Procedimiento

- Analizar el diagrama eléctrico del módulo de pruebas para maquinas sincrónicas y el módulo de pruebas para circuitos eléctricos.
- Realizar las conexiones de los diagramas eléctricos en los módulos anteriormente mencionados.
- Acoplar el dinamómetro con la máquina síncrona mediante el matrimonio
- Poner en marcha el dinamómetro (Motor Primario) y regular la velocidad hasta obtener la velocidad nominal.
- Variar la corriente de excitación (I_F) hasta igualar el voltaje generado con el voltaje en las barras.
- Realizar las conexiones del diagrama de circuito eléctrico.

Diagrama de conexión

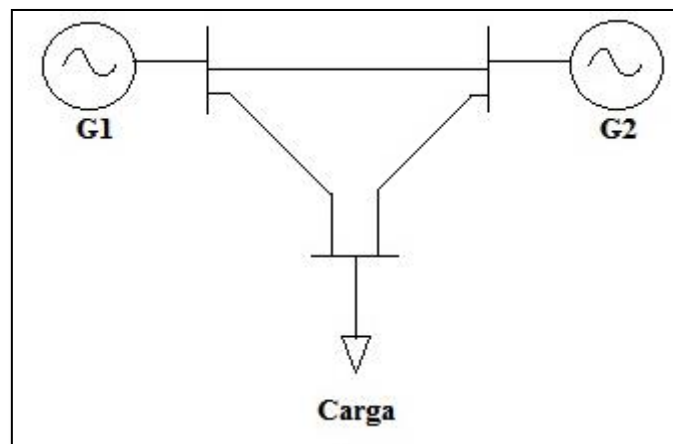


Figura 22. Diagrama principal práctica 1.

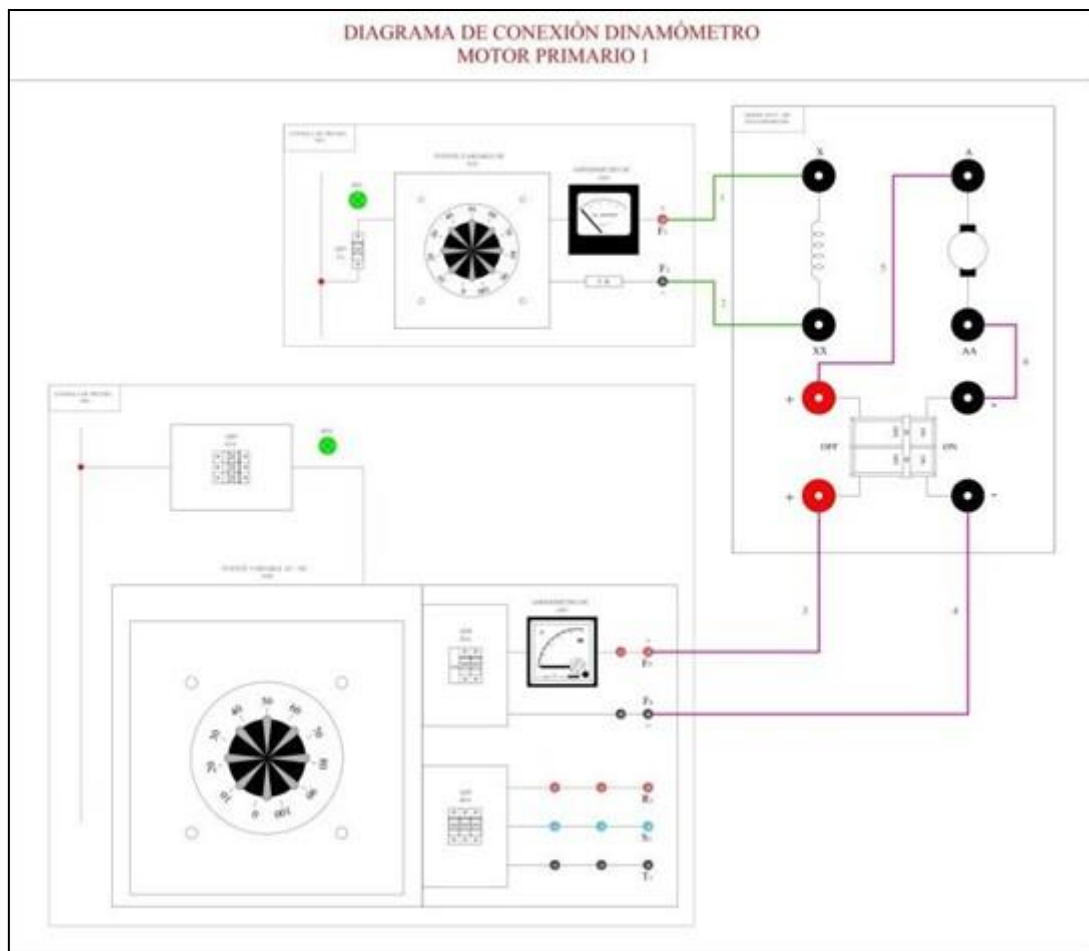


Figura 23. Diagrama de conexión dinámometro motor primario 1, práctica 1.

Listado de Interconexiones motor primario #1.

Interconexión	Salida		Llegada		Observaciones
	Tablero/equipo	Bornera	Tablero/equipo	Bornera	
1	R01	F1	DYN-400	x	Alimentación shunt de dinámometro
2	R01	F2	DYN-400	xx	Alimentación shunt de dinámometro
3	R01	F5	DYN-400	+	Alimentación principal de dinámometro
4	R01	F6	DYN-400	-	Alimentación principal de dinámometro
5	DYN-400	+	DYN-400	A	Puente de alimentación armadura dinámometro
6	DYN-400	-	DYN-400	AA	Puente de alimentación armadura dinámometro

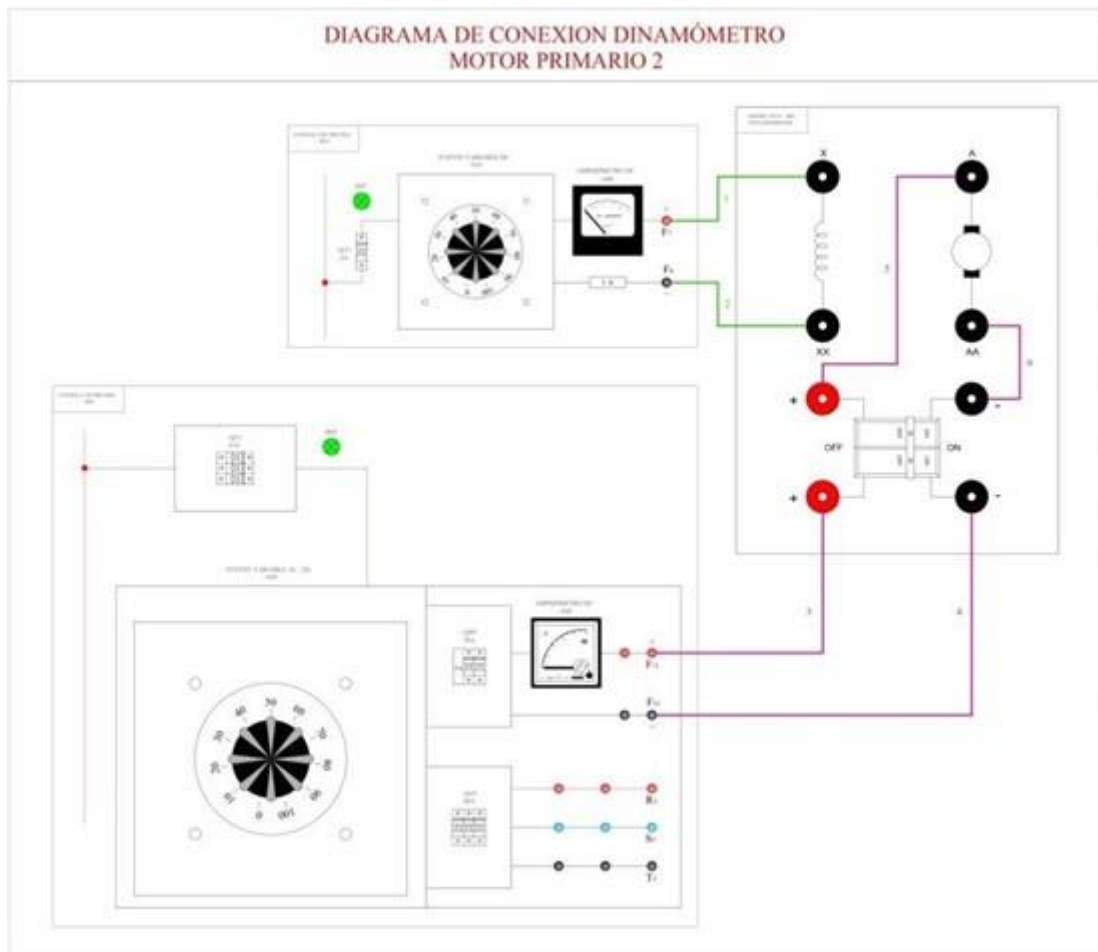


Figura 24. Diagrama de conexión dinámómetro motor primario 2, práctica 1.

Listado de interconexiones motor primario # 2

Interconexión	Salida		llegada		Observaciones
	Tablero/equipo	Bornera	Tablero/equipo	Bornera	
1	R01	F1	DYN-400	x	Alimentación shunt de dinámómetro
2	R01	F2	DYN-400	xx	Alimentación shunt de dinámómetro
3	R01	F5	DYN-400	+	Alimentación principal de dinámómetro
4	R01	F6	DYN-400	-	Alimentación principal de dinámómetro
5	DYN-400	+	DYN-400	A	Puente de alimentación armadura dinámómetro
6	DYN-400	-	DYN-400	AA	Puente de alimentación armadura dinámómetro

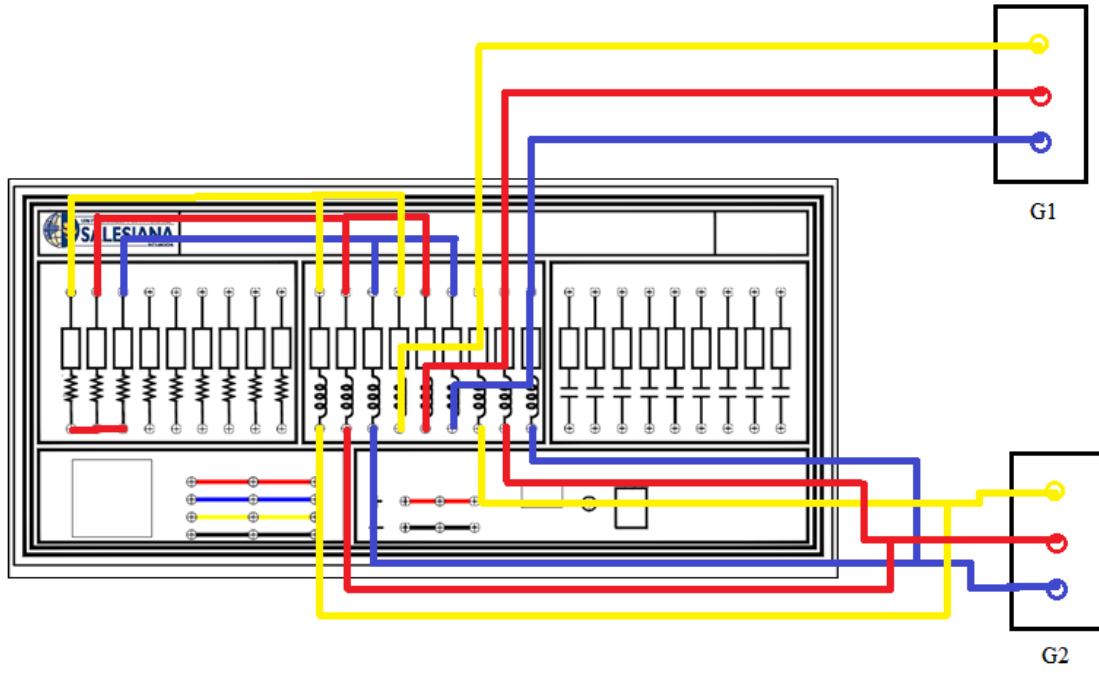



Figura 25. Diagrama de conexiones módulo de circuitos eléctricos práctica 2.

Resultados



BARRAS	REACTANCIAS	ADMITANCIAS	ÁNGULOS	FLUJO DE POTENCIA	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]
1--2						
1--3						
2--3						

PRÁCTICA #2	
	MANUAL DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO
CARRERA:	Ingeniería Eléctrica
SEDE:	Guayaquil

3.3. PRÁCTICAS DEL MÓDULO DIDÁCTICO

4.1.1. Práctica 2

Tema: Análisis del método flujo DC de un sistema de potencia.

Objetivos:

Objetivo general:

Analizar el comportamiento de cada potencia de las líneas de transmisión

Objetivos específicos:

- Obtener la matriz de admitancia del sistema de n barras.
- Obtener las potencias de cada línea del sistema de potencia.
- Realizar el sincronismo de generadores en un sistema de potencia.

Recursos:

- Maquina sincrónica SM-300.
- Dinamómetro DYN-400.
- Módulo de pruebas de circuitos eléctricos.
- Banco de pruebas para maquinas sincrónicas.

Tiempo estimado:

El tiempo estimado para la práctica es de 2 horas.

Procedimiento

- Analizar el diagrama eléctrico del módulo de pruebas para maquinas sincrónicas y el módulo de pruebas para circuitos eléctricos.

- Realizar las conexiones de los diagramas eléctricos en los módulos anteriormente mencionados.
- Acoplar el dinamómetro con la máquina síncrona mediante el matrimonio
- Poner en marcha el dinamómetro (Motor Primario) y regular la velocidad hasta obtener la velocidad nominal.
- Variar la corriente de excitación (I_F) hasta igualar el voltaje generado con el voltaje en las barras.
- Realizar las conexiones del diagrama de circuito eléctrico

Diagrama de conexión

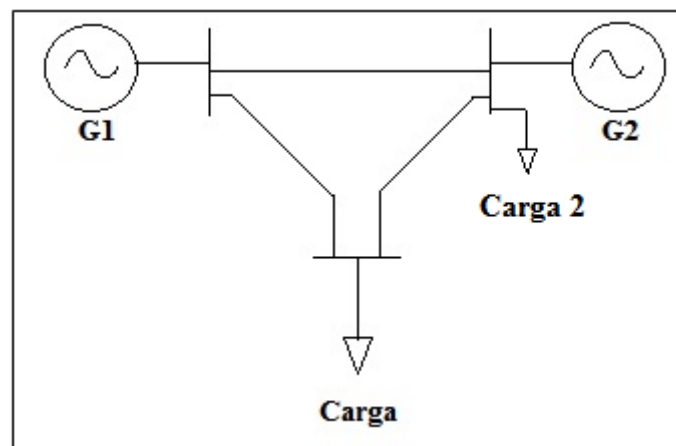


Figura 26. Diagrama principal del sistema de potencia práctica 2.

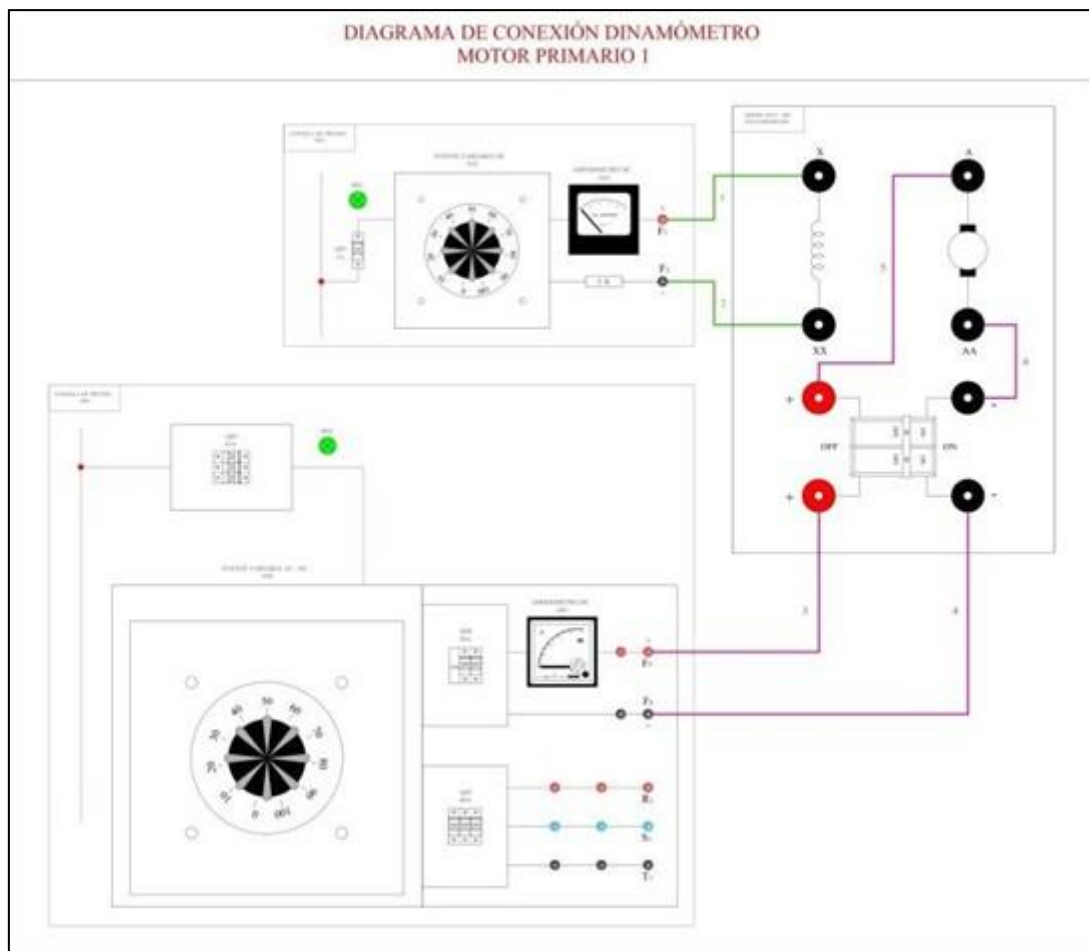


Figura 27. Diagrama de conexión dinámometro motor primario práctica 2.

Listado de Interconexiones motor primario #1.

Interconexión	Salida		Llegada		Observaciones
	Tablero/equipo	Bornera	Tablero/equipo	Bornera	
1	R01	F1	DYN-400	x	Alimentación shunt de dinámometro
2	R01	F2	DYN-400	xx	Alimentación shunt de dinámometro
3	R01	F5	DYN-400	+	Alimentación principal de dinámometro
4	R01	F6	DYN-400	-	Alimentación principal de dinámometro
5	DYN-400	+	DYN-400	A	Puente de alimentación armadura dinámometro
6	DYN-400	-	DYN-400	AA	Puente de alimentación armadura dinámometro

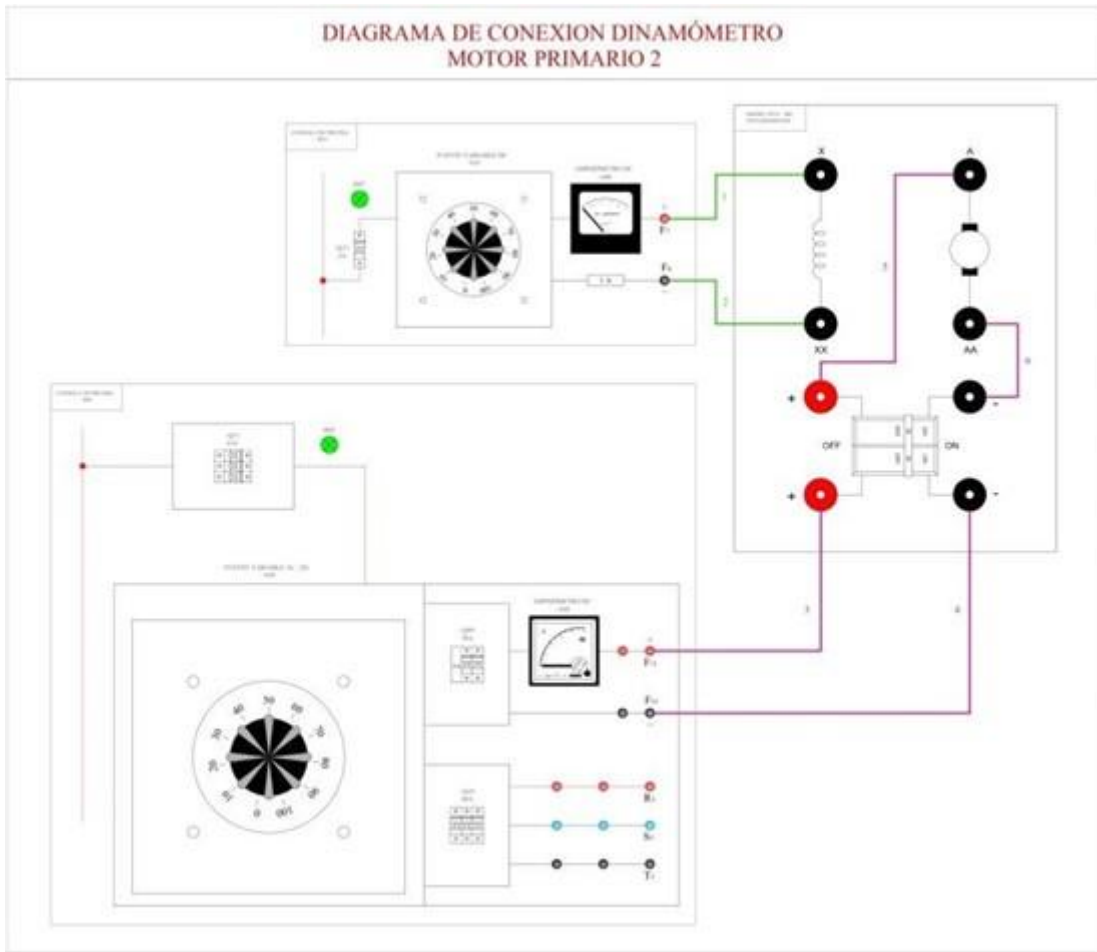


Figura 28. Diagrama de conexión dinámometro motor primario 2 práctica 2.

Listado de interconexiones motor primario # 2

Interconexión	Salida		llegada		Observaciones
	Tablero/equipo	Bornera	Tablero/equipo	Bornera	
1	R01	F1	DYN-400	x	Alimentación shunt de dinámometro
2	R01	F2	DYN-400	xx	Alimentación shunt de dinámometro
3	R01	F5	DYN-400	+	Alimentación principal de dinámometro
4	R01	F6	DYN-400	-	Alimentación principal de dinámometro
5	DYN-400	+	DYN-400	A	Puente de alimentación armadura dinámometro
6	DYN-400	-	DYN-400	AA	Puente de alimentación armadura dinámometro

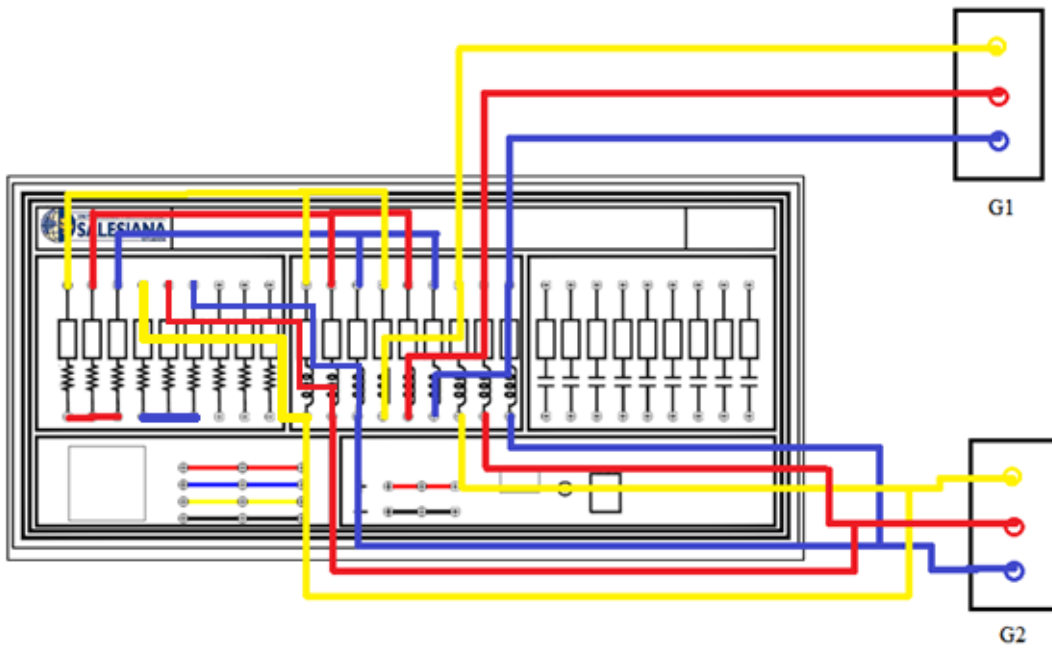


Figura 29. Diagrama de conexiones módulo de circuitos eléctricos práctica 2.

Resultados



BARRAS	REACTANCIAS	ADMITANCIAS	ÁNGULOS	FLUJO DE POTENCIA	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]
1--2						
1--3						
2--3						

CONCLUSIONES

En esta práctica se logró con los objetivos trazados y en las prácticas de logro obtener en promedio un margen de error de un que es razonable debido a que se manejaron bajas potencias en las barras.

Se realizó dos prácticas demostrativas con su respectivo margen de error.

Los valores teóricos de las prácticas se basan en los resultados utilizando los algoritmos y la simulación en MATLAB®.

El uso de la metodología del flujo de potencia facilitó comprender las variables de potencia y ángulos por barra.

RECOMENDACIONES

Este trabajo de tesis podría utilizarse para futuras pruebas y análisis de distintos lugares donde existan sistemas eléctricos como en industrias o para algún análisis científico o arbitrario de quien quiera adquirir algún conocimiento en general.

Para realizar el flujo de potencia se debe realizar con generadores de potencia en MVA ya que se dificulta el cálculo y confunde ciertos datos de potencia.

Se debe establecer una barra de referencia para la simplificación de la matriz de la admitancia para obtener las variables de los ángulos en cada barra.

Para la realización de próximos trabajos sobre este tema es necesario contar con generadores de mayor potencia ya que facilitaría los cálculos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Arguello, G. *Análisis Y Control de Sistemas Eléctricos de Potencia*. Quito, 1988.
- [2] Monica, P., & Guerero, M. *Programa Interactivo de Flujo de Potencia para el Laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia*. Quito, Ecuador, 1988.
- [3] R.A.Gallego, A.H.Escobar, & M.E.Granada. *Flujo de Carga en Sistemas De Transmisión. Modelamiento Y Análisis*. Pereira, Universidad Tecnológica de Pereira, 2016.
- [4] Shirmohammadi, D., Hong, H., & Semlyen, A, *Un Método de Flujo de Potencia Basado en la Compensación Para LAS Redes Semanales DE Distribución Y Transmisión*.IEEE, 1988
- [5] D. Debapriya , *Electrical Power System*, New Age International (P) LIMITED, Publishers, 2006.
- [6] A. J. Pansini, *Power Transmission and Distribution* 2nd Edition, THE FAIRMONT PRESS, INC, CRC Press, 2005.
- [7] Wood AJ, Wollenberg BF, *Power generation, operation, and control*, 2nd edn. Wiley, New York, 1996.
- [8] LL. Grigsby, *Power system stability and control*, 2nd edn. CRC Press, Taylor & Francis group, Florida, 2007.
- [9] J. D. Glover M. S. Sarma, T. J. Overbye, *Power System Analysis and Design*, Fifth Edition, Cengage Learning, 2011.
- [10] W. H. Hayt, Jr., and J. E. Kemmerly, *Engineering Circuit Analysis*, 7th ed. New York: McGraw-Hill, 2006.
- [11] W. D. Stevenson, Jr., *Elements of Power System Analysis*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 1982.
- [12] C. A. Gross, *Power Systems Analysis*, New York: Wiley, 1979.
- [13] A. J. Wood and B. F. Wollenberg, *Power Generation, Operation and Control*, 2nd ed. (New York: John Wiley & Sons, 1996).
- [14] *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, Westinghouse Electric Corp., East Pittsburgh, Pennsylvania, 1964.
- [15] N. M. Peterson and W. S. Meyer, *Automatic Adjustment of Transformer and Phase Shifter Taps in Newton Power Flow*, IEEE Trans. PAS, 90 (January February 1971), pp. 103–108.
- [16] Electric Power Research Institute (EPRI), EPRI AC Transmission Line Reference

Book—200 kV and Above (Palo Alto, CA: EPRI, www.epri.com, December 2005).

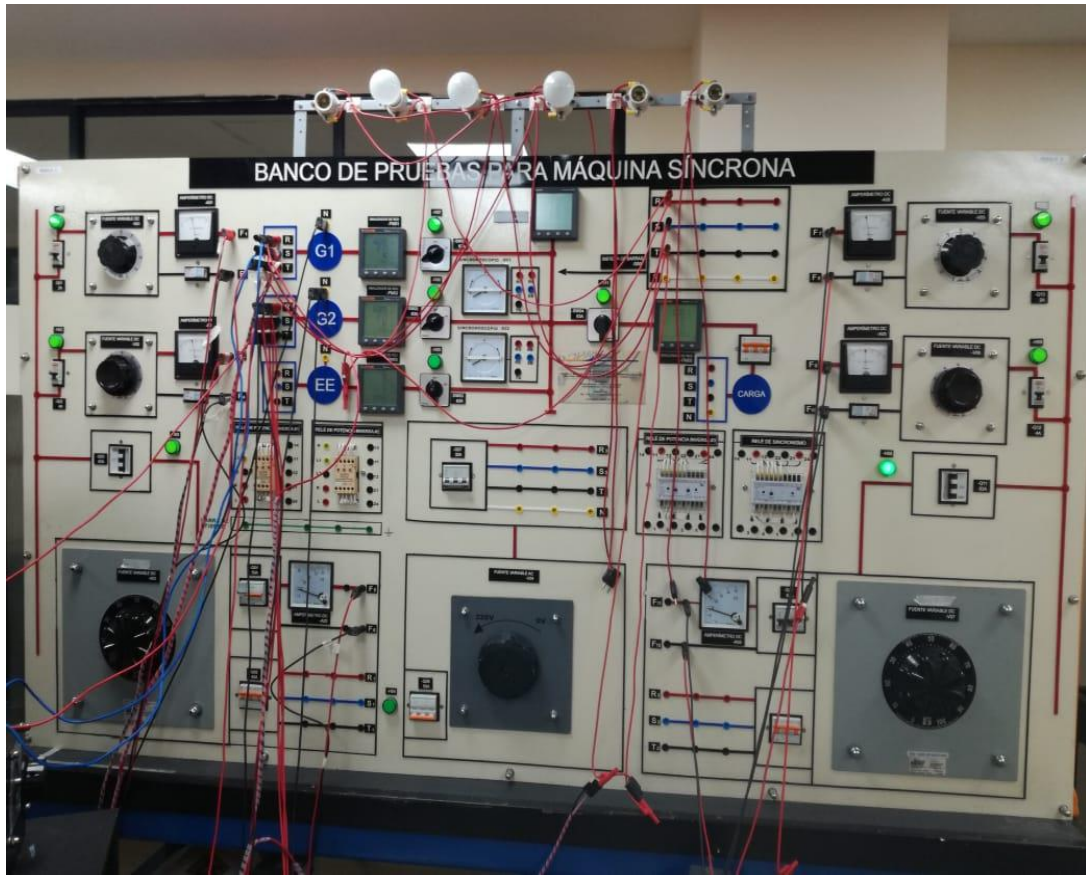
- [17] H. Seifi, M. S. Sepasian, *Electric Power System Planning Issues, Algorithms and Solutions*, Springer New York, 2011.
- [18] A. A. Coello Velásquez y J. M. Ortiz Morales, *Diseño e Implementación de un banco de pruebas para maquina síncrona didáctico para el laboratorio de motores y generadores enfocado a la enseñanza practica de las maquinas síncronas*, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, 2018.
- [19] <https://www.hampden.com>. Recuperado el 11 de Septiembre del 2018.
- [20] <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/60579-dc-power-flow-analysis>. Recuperado el 12 de Octubre del 2018.

ANEXOS.

Anexo A Pruebas en el laboratorio de motores y generadores



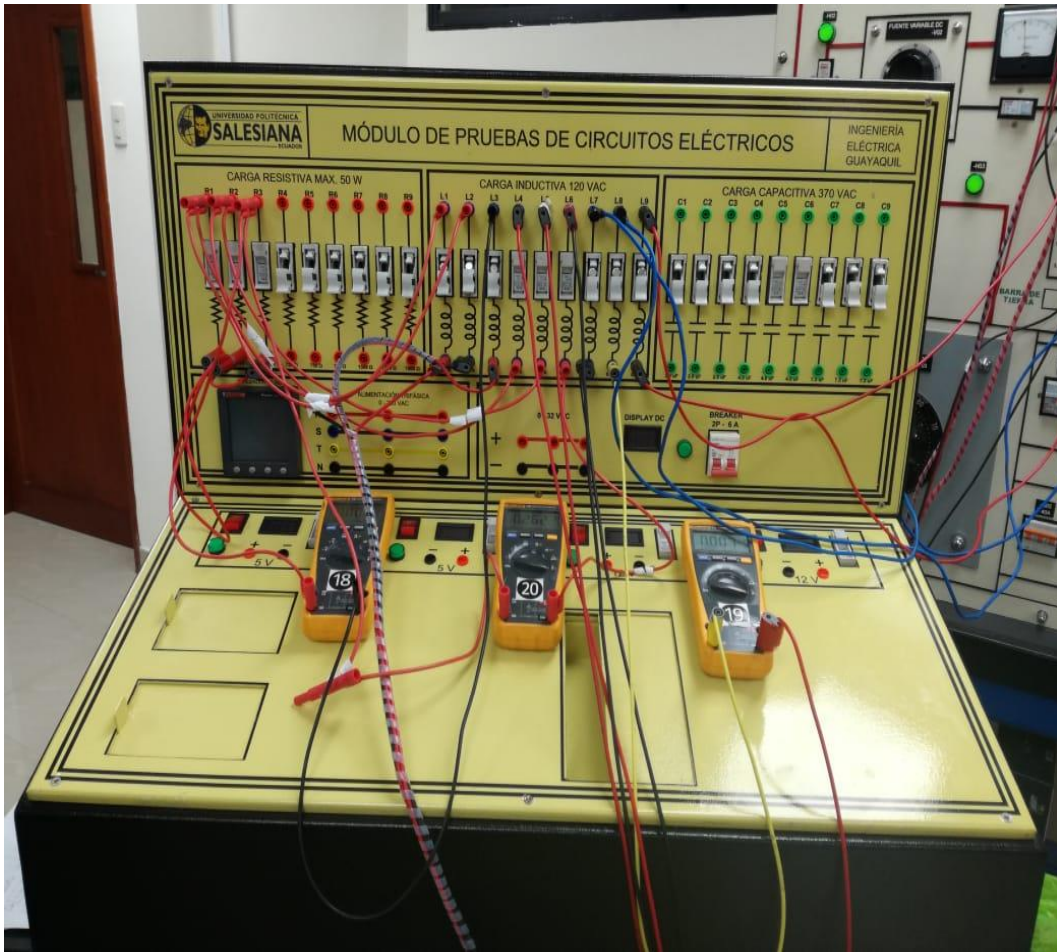
Anexo 1. Autotransformador variable del bobinado de campo y armadura.



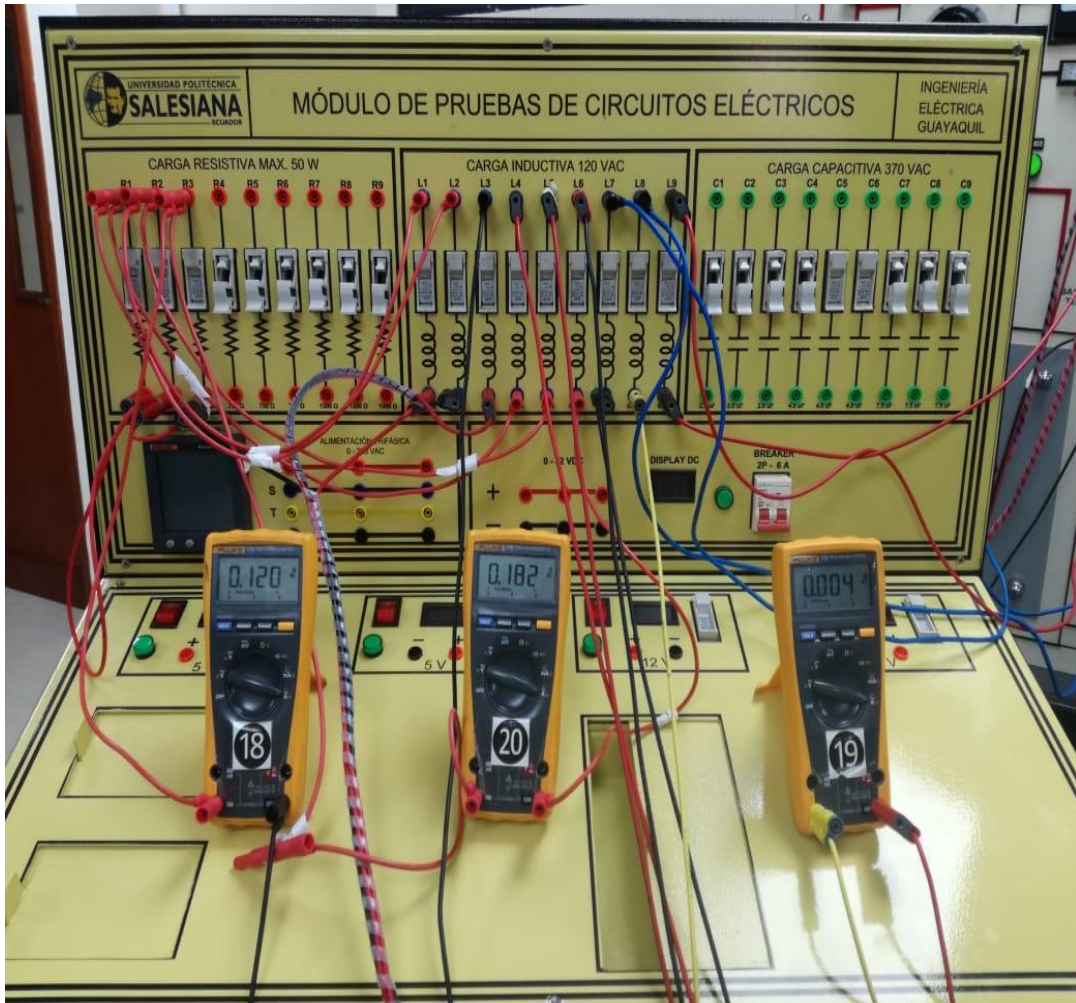
Anexo 2. Conexión general de banco de prueba para maquina sincrónica.



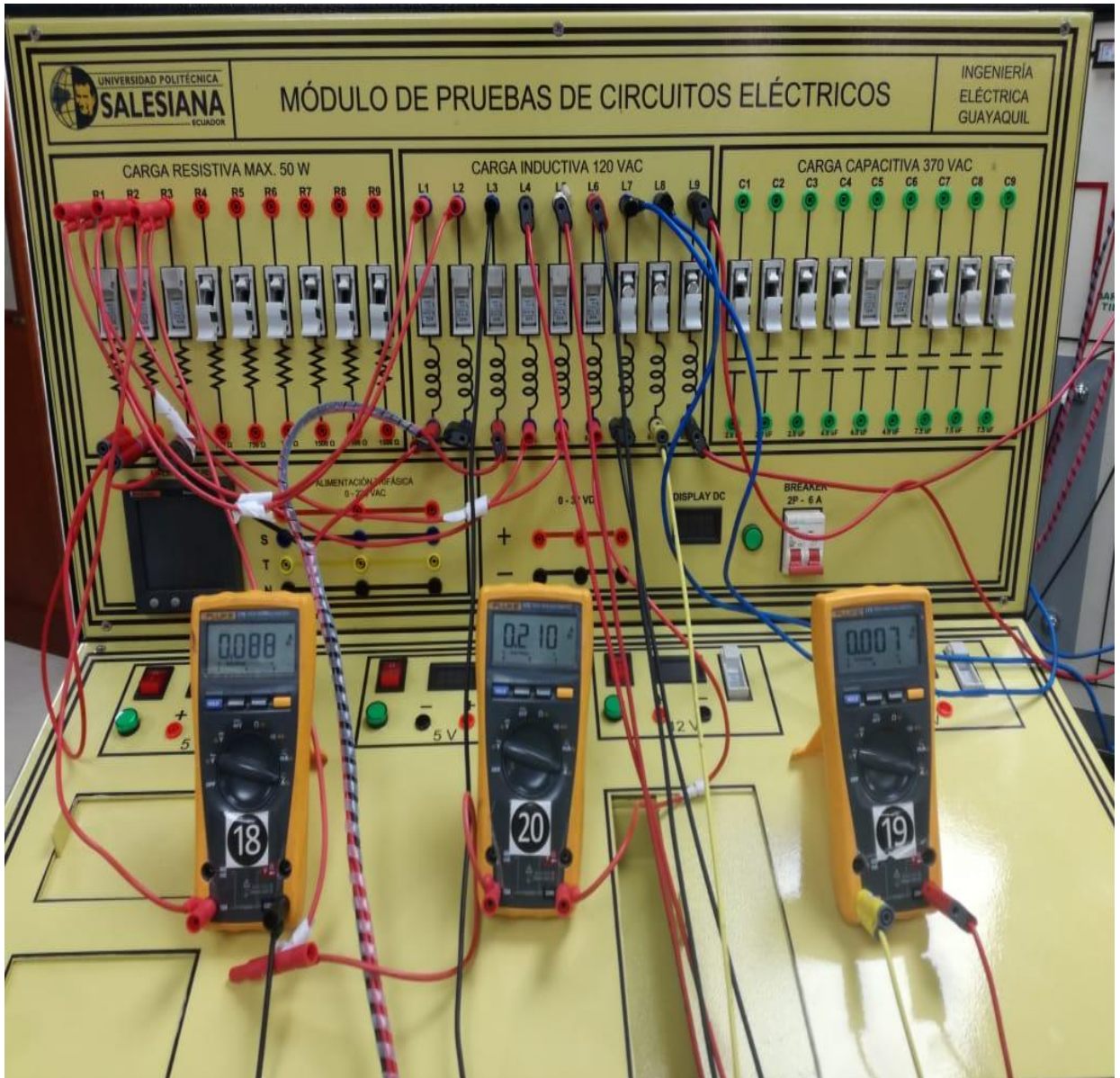
Anexo 3. Conexiones de dinamómetro DYN-400 y máquina sincrónica SM-300 acoplados lado A.



Anexo 4. Conexión de módulo de pruebas de circuitos eléctricos.



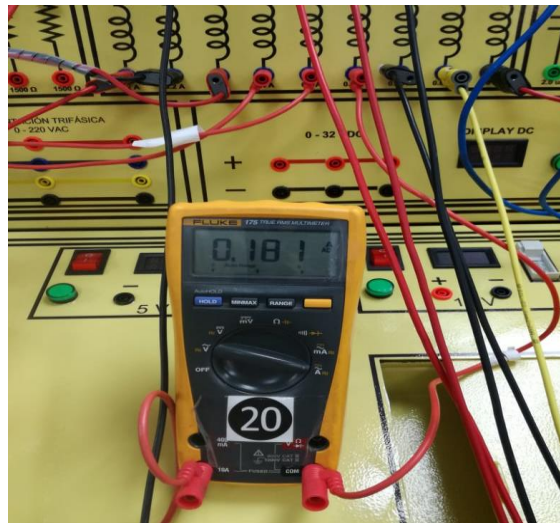
Anexo 5. Mediciones de amperajes en líneas de transmisión en sincronismo con carga.



Anexo 6. Mediciones de amperajes en las 3 líneas de transmisión sincronismo sin carga.



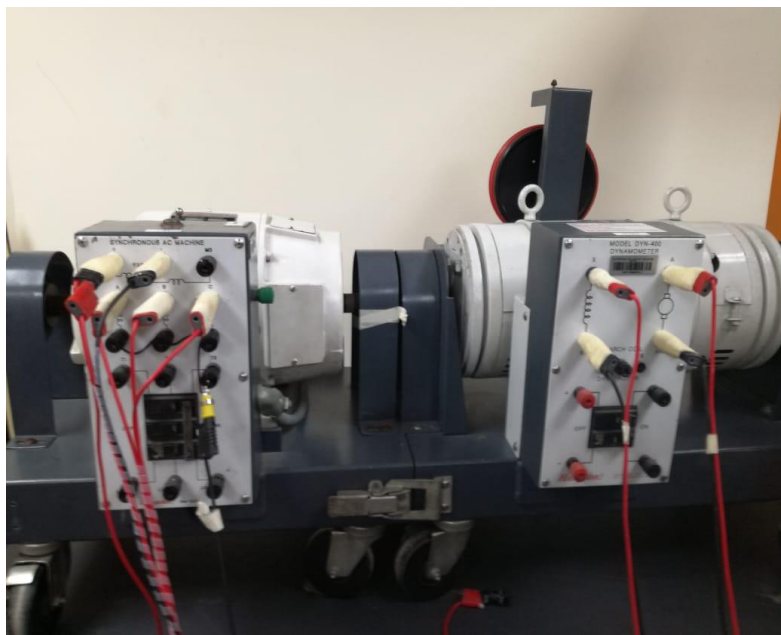
Anexo 7. Medición en línea de flujo de 1-3.



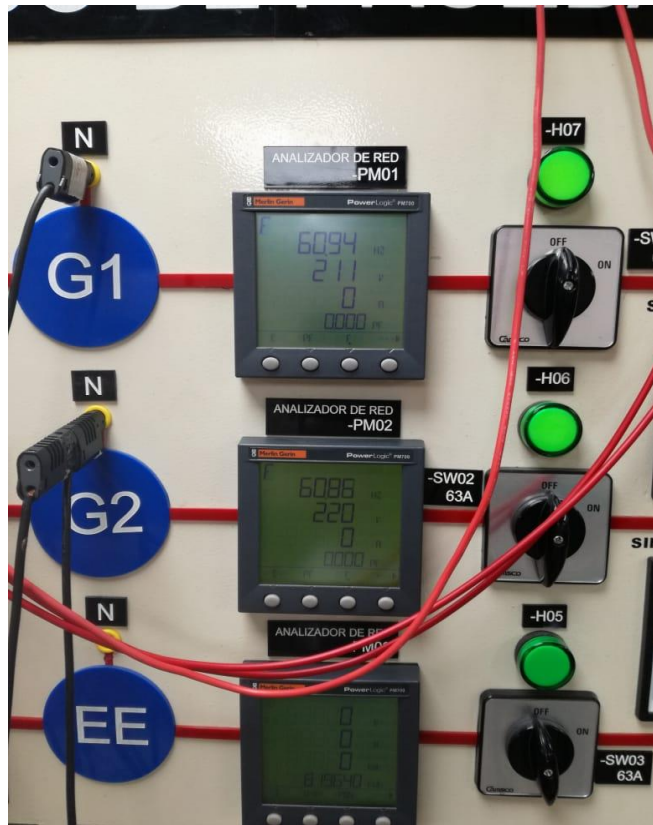
Anexo 8. Medición en línea de flujo de 2-3.



Anexo 9. Medición en línea de flujo de 1-2.



Anexo 10. Conexiones de dinamómetro DYN-400 y máquina sincrónica SM-300 acoplados lado B.



Anexo 11. Datos de analizadores de red en sincronismo.



Anexo 12. Datos de amperímetros de red en sincronismo.

```
MATLAB 7.6.0 (R2008a)
File Edit Debug Parallel Desktop Window Help
Current Directory: C:\Program Files\MATLAB\R2008a
Shortcuts How to Add What's New

Reduced suceptance matrix, with taking 1 as the reference node is:

Br =

    1.0e+003 *
    4.5470  -2.4072
   -2.4072   3.6108

2.Input the injected active power vector, P(n)=Pg(n)-Pd(n)
P=[0 1.5124 -2.414]
Reduced vector of injected active power is:

Pr =

    1.5124
   -2.4140

SOLUTION:
Angles in radians on the bus voltage phasors are:
teta1 = 0.0000 rad (0.0000 degrees)
teta2 = 0.0000 rad (0.0019 degrees)
teta3 = 0.0007 rad (0.0396 degrees)
Active power flows calculated by linear DC method are:
Pa1-2 = 0.070497 p.u.
Pa1-3 = 0.831103 p.u.
Pa2-3 = 1.582897 p.u.
Input the further calculation based on previous stationary model or press ctrl+c to exit:
1.Generator contingency
2.Line contingency
3.Both generator and line contingecy
4.Full N-1 analysis
5.Full N-1-1 analysis

Start | Waiting for input
```

Anexo 13. Resultados simulación MATLAB®.