



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE ELECTRICIDAD

**CORRECCIÓN DE LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE DE UNA RED DE
DISTRIBUCIÓN DE 13.8 kV, APLICANDO TRANSFORMADORES DE TAPS
VARIABLE**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: Jeandry David Zorrilla Marcillo,

Anthony Samir Flores Viteri

TUTOR: Ing. Carlos Fernando Chávez Córdova, MSc

Guayaquil-Ecuador
2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, Jeandry David Zorrilla Marcillo con documento de identificación N° 0953496783 y Anthony Samir Flores Viteri con documento de identificación N° 0941442105 manifestamos que:

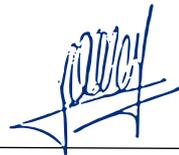
Somos los autores y responsables del presente trabajo y autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 15 de agosto del año 2024

Atentamente;



Anthony Samir Flores Viteri
0941442105



Jeandry David Zorrilla Marcillo
0953496783

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros Jeandry David Zorrilla Marcillo con número de identificación N° 0953496783 y Anthony Samir Flores Viteri con número de identificación N°0941442105, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de lo que somos autores del **Proyecto Técnico: “CORRECCIÓN DE LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8kV, APLICANDO TRANSFORMADORES DE TAP VARIABLE”**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de INGENIERO EN ELECTRICIDAD, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en el formato digital a la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 15 de agosto del año 2024

Atentamente;



Anthony Samir Flores Viteri
0941442105



Jeandry David Zorrilla Marcillo
0953496783

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo Carlos Fernando Chávez Córdova, con documento de identificación N°0919553438 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“CORRECIÓN DE LA ESTABILIDAD DE VOLTAJE DE UNA RED DE DISTRIBUCIÓN DE 13.8 kV, APLICANDO TRANSFORMADORES DE TAP VARIABLE”**, realizado por Jeandry David Zorrilla Marcillo con número de identificación N° 0953496783 y Anthony Samir Flores Viteri con número de identificación N°0941442105, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 15 de agosto del año 2024

Atentamente;



Ing. Carlos Fernando Chávez Córdova, Msc

0919553438

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis queridos padres, David y Adela, cuya dedicación y sacrificio han sido el pilar sobre el que he construido mis logros. Desde pequeño, me enseñaron el valor del trabajo duro, la honestidad y la perseverancia. Su amor incondicional y apoyo constante han sido mi fuente de fortaleza y motivación en cada etapa de mi vida. Gracias a sus esfuerzos, no solo he recibido las herramientas para triunfar académicamente, sino también los valores para ser una mejor persona.

A mis hermanas, Ana Paula y María Emilia, con quienes he compartido innumerables momentos de alegría y desafíos. Sus logros y luchas me han inspirado constantemente, recordándome la importancia de la familia y del esfuerzo conjunto.

Cada logro académico y personal que he alcanzado es un reflejo del amor y el apoyo de mi familia. Este trabajo es un pequeño tributo a todo lo que me han dado. Este logro es tanto mío como suyo, y siempre estaré agradecido por todo lo que han hecho por mí.

Jeandry Zorrilla Marcillo

Quiero dedicar este proyecto a las personas que han sido pilares fundamentales en mi vida y han hecho posible este logro. A mi madre, Deysi Viteri, por su apoyo incondicional en cada paso y por ser una fuente constante de admiración para mí. A mi hermana, Daniela, por ser una motivación diaria para superarme y esforzarme más.

Mis agradecimientos se extienden a mis tías: Amada Viteri de Cabrera, quien me ha cuidado y apoyado desde que era pequeño; Rocío de Padilla, que me ha apoyado durante todo este proceso; y Wendy Flores, quien me brindó su apoyo desde el inicio.

A mi tío Manuel Cabrera, quien me ha cuidado y apoyado como a un hijo, y a quienes más que tíos, han sido como abuelos para mí, mi mamá Elsa Viteri y mi papá Gustavo Guerra, por su cariño y cuidado incondicional.

No puedo olvidar a mis primos, quienes han sido mi soporte y guía: Cinthia Cabrera, Giovanis Muñoz, Manuel Cabrera, Ana Cedeño, José Guerra, Nahin Guerra, Esther Clavijo, Mateo Guerra, Débora Padilla y Mishelle Solórzano.

Dedico este proyecto con profunda gratitud y amor a cada miembro de mi familia, que, debido a su tamaño extenso, no puedo mencionar a todos individualmente. Su apoyo incondicional y amor constante han sido la base de mi motivación y fortaleza.

También quiero dedicar este proyecto a mis amigos, quienes han jugado un papel crucial en este viaje. Su apoyo, aliento y afecto han sido fundamentales para alcanzar este logro.

Anthony Flores Viteri

AGRADECIMIENTO

Quisiera comenzar agradeciéndole a Dios por ser guía y por otorgarme la paciencia y la determinación necesarias para completar esta tesis. Su presencia en mi vida ha sido una fuente constante de fortaleza y claridad.

A mis padres, por su amor incondicional y su inquebrantable apoyo a lo largo de todo este proceso. Sus sacrificios, consejos y palabras de aliento han sido fundamentales para llegar hasta aquí. Gracias por siempre creer en mí, incluso cuando yo misma dudaba.

A mis hermanos, por su apoyo constante y su paciencia durante las largas horas que he dedicado a este trabajo.

A la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, por brindarme la oportunidad de formarme en un entorno académico de excelencia. Agradezco profundamente a todos los profesores y al personal administrativo por su apoyo y orientación durante todo este proceso. Su compromiso con la educación y su dedicación han sido una inspiración constante.

Finalmente, agradezco a mis amigos y compañeros que me han acompañado en este camino, brindándome su apoyo y compartiendo conmigo sus conocimientos y experiencias. Cada uno de ustedes ha tenido un impacto significativo en este proyecto y en mi vida.

Jeandry Zorrilla Marcillo

Agradezco a mí Dios Jehová por guiarme y darme fortaleza. A mi madre, por cuidarme, enseñarme valores y principios, y por ser una fuente constante de amor y sabiduría. A mi familia, quienes han sido una inspiración y un ejemplo de esfuerzo, mostrándome el valor de la dedicación y la importancia de hacer lo correcto, incluso cuando no siempre nos beneficie, pues me han enseñado que nuestras acciones definen quiénes somos.

Agradezco a mis profesores, muchos de los cuales han sido como amigos y han contribuido a formar mi personalidad. También quiero expresar mi gratitud a mis amigos, tanto a aquellos que conocí en la escuela como a los que he encontrado en el camino. A pesar del paso de los años, el cariño y el afecto siguen siendo esenciales en nuestra amistad. En especial, quiero mencionar a las personas que han llegado a ser como hermanos/as para mí aquellas personas son: Valentina, Allison, Yordana, Katherine, Julia, Laura, Grace, Oliver y Gabriel. Algunos han estado a mi lado desde el colegio, otros desde mucho antes, pero cada una de estas personas han contribuido de manera esencial a momentos muy importantes en mi vida.

Finalmente, quiero expresar mi profunda gratitud a Romina, quien ha sido una persona muy especial y que ha estado presente en momentos muy importantes de mi vida, desde los primeros pasos de mi carrera, e incluso mucho antes de ello, siendo así un pilar fundamental en todo este proceso. A todos ellos, les expreso mis más sinceros agradecimientos por su incondicional apoyo y por estar siempre presentes en mi vida.

Anthony Flores Viteri

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA.....	v
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO	ix
ÍNDICE DE GRAFICAS.....	xii
ÍNDICE DE TABLAS	xv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
ACRÓNIMOS	xviii
CAPÍTULO I.....	1
1.1 TÍTULO	1
1.2 INTRODUCCIÓN	1
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.4 JUSTIFICACIÓN	4
1.5 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	5
1.6 BENEFICIARIOS DE LA PROPUESTA	6
1.7 OBJETIVOS.....	6
1.7.1 Objetivo General.....	6
1.7.2 Objetivos Específicos	6
1.7.3 Metodología y medios	7
CAPÍTULO II	8
2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	8
2.1.1 Estabilidad de Voltaje.....	8
2.1.2 Transformadores con taps.....	9

2.1.3 Compensación de potencia reactiva en paralelo	9
2.1.4 Caída de voltaje	10
2.1.5 Digsilent Power Factory	10
2.1.6 MATLAB.....	11
2.1.7 ETAP	11
2.1.8 Análisis de flujo de potencia en transformadores con regulación de taps	12
2.1.9 Representaciones de componentes para el análisis de flujo de potencia en sistemas eléctricos	13
2.1.10 Líneas de transmisión	14
2.1.10.1 Representación de líneas.....	14
2.1.10.1.1 Línea de tramo corto	14
2.1.10.1.2 Línea de tramo medio	15
2.1.10.1.3 Línea de tramo largo	15
2.1.11 Cargas	15
CAPÍTULO III.....	17
3.1 MODELO DEL TRANSFORMADOR DE TAP VARIABLE.....	17
3.2 MÉTODO NEWTON-RAPSHON PARA FLUJOS DE POTENCIA.....	17
3.3 MODELACIÓN MATEMÁTICA	18
3.4 PLANTEAMIENTO E INTEGRACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO.....	20
3.5 SIMULACIÓN DEL FLUJO DE POTENCIA DEL SISTEMA DE 9 BARRAS DE LA IEEE	24
3.5.1 Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT.....	25
3.5.2 Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT.....	25
3.6 SISTEMA DE VALIDACIÓN.....	26
3.6.1 Caso 1	27
3.6.2 Caso 2	31
3.6.3 Caso 3	35
3.6.4 Caso 4	39
3.6.5 Caso 5	43
3.6.6 Caso 6	47

3.6.7 Caso 7	51
CAPÍTULO IV	56
4.1 ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	56
4.2 CASO DE ESTUDIO.....	57
4.3 RESULTADOS	58
5. CONCLUSIONES	70
6. RECOMENDACIONES	71
7. BIBLIOGRAFÍA	72
8. ANEXOS.....	74

ÍNDICE DE GRAFICAS

Gráfico 1.1 Estabilidad en sistemas de potencia.....	1
Gráfico 2.1 Diagrama equivalente	8
Gráfico 2.3 Diagrama de bloque del funcionamiento de transformador con tap.....	9
Gráfico 2.4 Modelo del transformador con tap.....	12
Gráfico 2.5 Modelo π del transformador para flujo de potencia	13
Gráfico 2.6 Diagrama de Tramo corto.....	14
Gráfico 2.7 Circuito de tramo medio	15
Gráfico 2.8 Circuito de tramo largo.....	15
Gráfico 3.1 Modelo de 9 Barras de la IEEE	24
Gráfico 3.2 Simulación en digsilent modelo de 9 barras de la IEEE.....	24
Gráfico 3.3 Reporte del flujo de potencia en DIGSILENT	27
Gráfico 3.4 Reporte del flujo de potencia en MATLAB	25
Gráfico 3.5 Simulación del flujo de potencia en digsilent caso 1 con 10 barras	27
Gráfico 3.6 Reporte Realizado en DIGSILENT caso 1	28
Gráfico 3.7 Reporte Realizado en MATLAB caso 1	28
Gráfico 3.8 Simulacion con 10 barras aplicando transformador de tap.....	29
Gráfico 3.9 Reporte en DIGSILENT aplicando transformador de tap=3.....	30
Gráfico 3.10 Reporte en MATLAB aplicando transformador de tap=3.....	30
Gráfico 3.11 Simulación del flujo de potencia en digsilent caso 2 con 10 barras	32
Gráfico 3.12 Reporte Realizado en DIGSILENT caso 2.....	34
Gráfico 3.13 Reporte Realizado en MATLAB caso 2.....	32
Gráfico 3.14 Simulacion con 10 barras aplicando transformador de tap.....	32
Gráfico 3.15 Reporte en DIGSILENT aplicando transformador de tap=1.....	32
Gráfico 3.16 Reporte en MATLAB aplicando transformador de tap=1	32
Gráfico 3.17 Simulación del flujo de potencia en digsilent caso 3 con 10 barras	32
Gráfico 3.18 Reporte Realizado en DIGSILENT caso 3.....	34
Gráfico 3.19 Reporte Realizado en MATLAB caso 3.....	32
Gráfico 3.20 Simulacion con 10 barras aplicando transformador de tap.....	32

Gráfico 3.21	Reporte en DIGSILENT aplicando transformador de tap=1	32
Gráfico 3.22	Reporte en MATLAB aplicando transformador de tap=1	32
Gráfico 3.23	Simulación del flujo de potencia en digsilent caso 4 con 10 barras	32
Gráfico 3.24	Reporte Realizado en DIGSILENT caso 4	40
Gráfico 3.25	Reporte Realizado en MATLAB caso 4	40
Gráfico 3.26	Simulación con 10 barras aplicando transformador de tap	41
Gráfico 3.27	Reporte en DIGSILENT aplicando transformador de tap=4	42
Gráfico 3.28	Reporte en MATLAB aplicando transformador de tap=4	42
Gráfico 3.29	Simulación del flujo de potencia en digsilent caso 5 con 10 barras	43
Gráfico 3.30	Reporte Realizado en DIGSILENT caso 5	44
Gráfico 3.31	Reporte Realizado en MATLAB caso 5	44
Gráfico 3.32	Simulación con 10 barras aplicando transformador de tap	45
Gráfico 3.33	Reporte en DIGSILENT aplicando transformador de tap=3	46
Gráfico 3.34	Reporte en MATLAB aplicando transformador de tap=3	46
Gráfico 3.35	Simulación del flujo de potencia en digsilent caso 6 con 10 barras	47
Gráfico 3.36	Reporte Realizado en DIGSILENT caso 6	48
Gráfico 3.37	Reporte Realizado en MATLAB caso 6	48
Gráfico 3.38	Simulación con 10 barras aplicando transformador de tap	49
Gráfico 3.39	Reporte en DIGSILENT aplicando transformador de tap=5	50
Gráfico 3.40	Reporte en MATLAB aplicando transformador de tap=5	50
Gráfico 3.41	Simulación del flujo de potencia en digsilent caso 7 con 10 barras	51
Gráfico 3.42	Reporte Realizado en DIGSILENT caso 7	52
Gráfico 3.43	Reporte Realizado en MATLAB caso 7	52
Gráfico 3.44	Simulación con 10 barras aplicando transformador de tap	53
Gráfico 3.45	Reporte en DIGSILENT aplicando transformador de tap=3,tap=1,tap=1	54
Gráfico 3.46	Reporte en MATLAB aplicando transformador de tap=3,tap=1,tap=1	54
Gráfico 4.1	Magnitudes en gráficos ejerciendo el control en la barra 10	59
Gráfico 4.2	Magnitudes en gráficos ejerciendo el control en la barra 11	61
Gráfico 4.3	Magnitudes en gráficos ejerciendo el control en la barra 12	63

Gráfico 4.4 Magnitudes en gráficos ejerciendo el control en la barra 10.....	65
Gráfico 4.5 Magnitudes en gráficos ejerciendo el control en la barra 11.....	66
Gráfico 4.6 Magnitudes en gráficos ejerciendo el control en la barra 12.....	68
Gráfico 4.7 Magnitudes en gráficos ejerciendo el control en la barra 10,11,12.....	70
Gráfico 8.1 Código de flujo de potencia parte A.....	74
Gráfico 8.2 Código de flujo de potencia parte B.....	75
Gráfico 8.3 Código de flujo de potencia parte C.....	76
Gráfico 8.4 Código de flujo de potencia parte D.....	77
Gráfico 8.5 Código de flujo de potencia parte E.....	78
Gráfico 8.6 Código de flujo de potencia parte F.....	79

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos de los generadores	22
Tabla 2 Datos de las barras	22
Tabla 3 Datos de los transformadores.....	23
Tabla 4 Datos de las cargas.....	23
Tabla 5 Datos de transformador añadido	26
Tabla 6 Valores en condición inicial caso 1	59
Tabla 7 Magnitud de voltaje con tap aplicado en la barra 10 caso 1	60
Tabla 8 Valores en condición inicial caso 2	61
Tabla 9 Magnitud de voltaje con tap aplicado en la barra 11 caso 2.....	61
Tabla 10 Valores en condición inicial caso 3	62
Tabla 11 Magnitud de voltaje con tap aplicado en la barra 12 caso 3	63
Tabla 12 Valores en condición inicial caso 4	64
Tabla 13 Magnitud de voltaje con tap aplicado en la barra 10 caso 4.....	64
Tabla 14 Valores en condición inicial caso 5	65
Tabla 15, Magnitud de voltaje con tap aplicado en la barra 11 caso 5.....	66
Tabla 16 Valores en condición inicial caso 6	67
Tabla 17 Magnitud de voltaje con tap aplicado en la barra 11 caso 6.....	67
Tabla 18 Valores en condición inicial caso 7	69
Tabla 19 Magnitud de voltaje con tap aplicado en la barra 10,11,12 caso 7.....	70

RESUMEN

Para asegurar un funcionamiento adecuado en el sistema eléctrico de potencia, se deben tomar en consideración el análisis y el control de diversas variables eléctricas. Siendo una de las más críticas la tensión en los nodos del sistema eléctrico de potencia. Un monitoreo incorrecto y un control ineficaz de la tensión de las misma podría llevar al sistema a un colapso, teniendo como consecuencias apagones o daños en la infraestructura eléctrica a gran escala.

En consideración de lo mencionado, el presente trabajo consiste en la demostración del control de la tensión mediante el método de ajuste de los taps que se encuentran en los transformadores de potencia. Para este análisis se toma el método de Newton Raphson el cual permite obtener los valores del flujo de potencia del sistema que se analizara.

Para el análisis de este trabajo se utiliza el sistema de la IEEE de 9 barras, el mismo se planteará bajo diversas condiciones operativas. Teniendo como objetivo establecer conclusiones significativas sobre la contribución, para poder mantener los niveles de voltajes aceptables, a través de la regulación de los taps que se encuentran en los devanados de los transformadores.

ABSTRACT

To ensure proper operation of the power system, the analysis and control of various electrical variables must be taken into consideration. One of the most critical variables is the voltage at the nodes of the power system. Incorrect monitoring and ineffective control of the voltage could lead to a system collapse, resulting in blackouts or damage to the electrical infrastructure on a large scale.

Considering the above, this work consists of demonstrating voltage control using the tap adjustment method found in power transformers. For this analysis, the Newton-Raphson method is used, which allows obtaining the power flow values of the system to be analyzed.

For the analysis of this work, the IEEE 9-bar system is used, which will be presented under various operating conditions. The objective is to establish significant conclusions about the contribution to maintaining acceptable voltage levels through the regulation of the taps found in the transformer windings.

ACRÓNIMOS

- P: Potencia Eléctrica
- V: Voltaje nominal del circuito
- I: Corriente nominal del circuito
- kV: Kilovoltio
- MVA: Mega Voltio-Amperio
- Hz: Frecuencia
- L: Longitud
- Z: Impedancia
- R: Resistencia
- IEEE: The Institute of Electrical and Electronics Engineers
- Taps: Son conexiones adicionales en el devanado de un transformador
- STATCOM: Dispositivos de compensación estática
- FACT: Dispositivo utilizado en sistemas eléctricos para mejorar su calidad y estabilidad
- AVR: Regulador Automático de voltaje.
- Flujo de potencia: Es la transferencia de energía a través de una red eléctrica
- FP: Factor de potencia
- SLACK: Es un nodo en el sistema de transmisión de energía que se utiliza para mantener el equilibrio de potencia en los análisis de flujo de potencia
- SEP: Sistema Eléctrico de Potencia

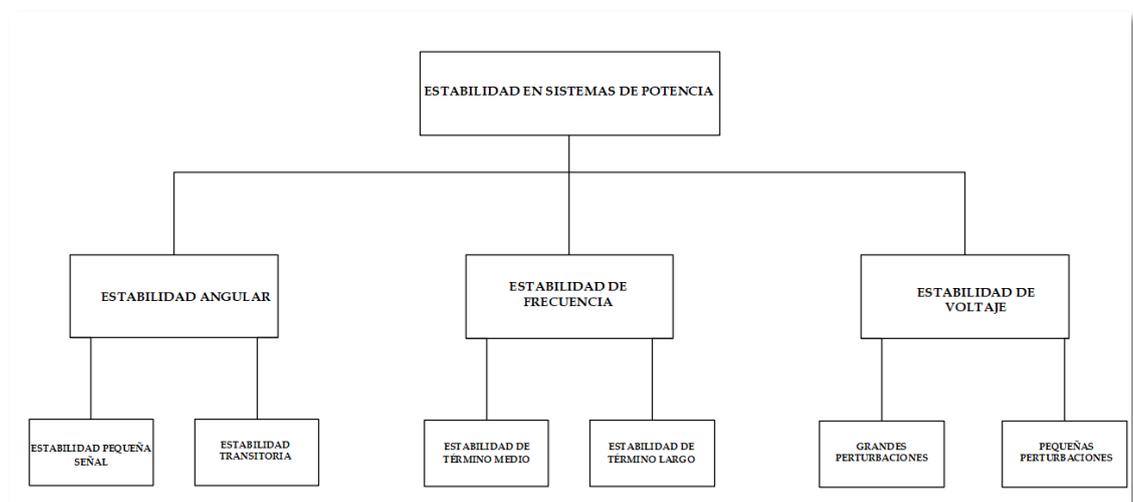
CAPÍTULO I

1.1 TÍTULO

Corrección de la estabilidad de voltaje de una red de distribución de 13.8kV, aplicando transformadores de taps variable.

1.2 INTRODUCCIÓN

La infraestructura eléctrica es crucial para el desarrollo integral de la sociedad. Para satisfacer la demanda, se requieren plantas generadoras, redes de interconexión del sistema y sistemas de distribución para los consumidores. La planificación y operación de esta infraestructura se basa en estudios específicos de confiabilidad. La evaluación de la calidad y seguridad de una red eléctrica se basa en revisar el balance entre voltaje y corriente, así como el factor de potencia de la carga, la frecuencia y duración de las interrupciones. Estos parámetros son fundamentales para garantizar la estabilidad del sistema. Hoy en día, estos estándares suelen lograrse mediante sistemas de control que aseguran un suministro eléctrico seguro, eficiente y confiable [2].



*Gráfico 1.1 Estabilidad en sistemas de potencia
Adaptación; Autores*

Los sistemas eléctricos muestran comportamientos dinámicos debido a su susceptibilidad a diversas perturbaciones, tanto internas como externas. Estas perturbaciones pueden provocar la pérdida de estabilidad del sistema, afectando el ángulo, voltaje y frecuencia. Una consecuencia crucial de esta inestabilidad es el colapso del voltaje, que ocurre

durante la transferencia de energía a través de las redes de transmisión, desde las centrales generadoras hasta los puntos de consumo. Este proceso complejo está limitado por políticas de desregulación, elevados costos de construcción, condiciones ambientales restrictivas y aspectos técnicos. Además de las pérdidas de voltaje debido a la longitud de las líneas de transmisión, se suman el incremento de la demanda de potencia reactiva, la carga excesiva de componentes del sistema de transmisión, ajustes en los transformadores, desconexiones de líneas de transmisión también de generadores y de restricciones en la generación y transmisión de potencia reactiva. Estos peligros emergentes alteran las condiciones estándar de funcionamiento, provocando variaciones significativas en el perfil de voltaje del sistema. Esto puede resultar en la pérdida de la fiabilidad del servicio eléctrico para los usuarios finales, culminando en la interrupción del suministro de energía, un escenario crítico de análisis. [1], [2].

Debido a la crucial necesidad de preservar la estabilidad del voltaje, se han registrado varias investigaciones orientadas a identificar técnicas de control que aseguren que el sistema mantenga un perfil de voltaje adecuado, especialmente durante variaciones en el análisis de la transferencia de potencia. Estos enfoques de control se fundamentan en evaluaciones continuas del desempeño del sistema, adaptando su resultado de acuerdo con las condiciones variables y seleccionando la medida más adecuada para adaptar las condiciones operativas del sistema eléctrico. Esto se hace con el fin de reducir al mínimo o eliminar la vulnerabilidad frente a posibles contingencias [1].

El objetivo de este proyecto es analizar el impacto de la conducta del voltaje en los puntos de conexión de un sistema eléctrico de potencia al considerar la configuración del tap de los transformadores como variables para el ajuste. Utilizando el método matemático de Newton-Raphson para la solución de flujos de potencia en estado estacionario, se busca que el transformador contribuya a mantener los niveles de voltaje dentro de los parámetros aceptables para el sistema eléctrico de potencia.

El proyecto se llevará a cabo completamente en el software matemático MATLAB [3], generando como resultado un código capaz de resolver flujos de potencia. Este código incorporará las características de los transformadores y sus taps para evaluar su contribución para la regulación del voltaje y la redistribución de la potencia reactiva en el sistema eléctrico de potencia.

Este trabajo de investigación se aplica al sistema eléctrico de prueba IEEE de 9 barras[4], el cual es sometido a una variedad de condiciones operativas para evaluar su efectividad. Al probar el sistema bajo diferentes escenarios, se busca identificar cómo responde a diversas situaciones y determinar los aspectos concluyentes relevantes. Este enfoque permitirá obtener una comprensión más detallada sobre la estabilidad y la regulación del voltaje, además de la redistribución de la potencia reactiva en el sistema eléctrica de potencia. Los resultados obtenidos serán fundamentales para mejorar las estrategias de control.

1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los sistemas eléctricos de potencia, la gestión eficiente de diversos parámetros eléctricos es esencial, siendo la tensión en los nodos del sistema un factor sumamente crítico. La monitorización precisa de los niveles de voltaje conlleva una importancia significativa, dado que la entrada de una alta carga a la red puede tener efectos a su estabilidad, generando inestabilidad de voltaje en la red de suministro. Este escenario, a su vez, podría tener como consecuencia generar apagones masivos en ubicaciones estratégicas.

La tensión en los nodos del sistema eléctrico es uno de los parámetros fundamentales para asegurar el correcto funcionamiento y la fiabilidad de la red. Los nodos representan puntos de conexión en la red donde se distribuye la energía eléctrica, y su tensión debe mantenerse dentro de límites específicos para evitar problemas operativos. Si la tensión en un nodo cae por debajo o supera estos límites, puede causar una serie de problemas, tales como la operación ineficiente de los equipos conectados, el sobrecalentamiento de componentes, y potencialmente, fallos en el suministro eléctrico [5]

La entrada de una alta carga a la red, especialmente si ocurre de manera repentina, puede provocar fluctuaciones significativas en la tensión de los nodos. Este fenómeno se debe a que el aumento repentino de la demanda de energía puede sobrecargar los componentes del sistema, como transformadores y líneas de transmisión, llevándolos a operar fuera de sus capacidades nominales. La sobrecarga puede causar caídas de voltaje en áreas específicas de la red, lo que, a su vez, puede desencadenar un efecto dominó afectando la estabilidad de la red en su conjunto.

La inestabilidad de voltaje es una condición peligrosa que puede llevar al colapso de la red si no se maneja adecuadamente. En casos extremos, la inestabilidad de voltaje puede provocar apagones masivos, afectando especialmente a ubicaciones estratégicas como centros urbanos, instalaciones industriales, y otras infraestructuras críticas. La pérdida de suministro eléctrico en estas áreas puede tener consecuencias graves, no solo en términos de interrupciones del servicio, sino también en cuanto a la seguridad pública y las operaciones económicas.

Por esta razón, la planificación y operación de sistemas eléctricos de potencia requieren una atención constante a la gestión de la tensión y la implementación de estrategias robustas para la prevención y mitigación de fallos. El uso de tecnologías avanzadas de monitorización, junto con una respuesta rápida y eficiente ante variaciones de carga, es fundamental para asegurar la estabilidad y la fiabilidad del suministro eléctrico en todo momento.

1.4 JUSTIFICACIÓN

La investigación propuesta sobre la corrección de la estabilidad de voltaje en un sistema estándar de 9 barras, propuesta por la IEEE mediante transformadores de taps variable, se justifica por la importancia crítica de mantener un suministro eléctrico estable y confiable en un entorno donde la creciente demanda es alta y compleja. La estabilidad del voltaje es esencial para prevenir daños a los equipos conectados a la red, evitar interrupciones en el servicio y garantizar la vida útil de los dispositivos conectados[6].

La estabilidad de voltaje en un sistema eléctrico es crucial porque las variaciones significativas en el voltaje pueden causar una serie de problemas. Equipos sensibles, como computadoras, electrodomésticos y maquinaria industrial, pueden sufrir daños permanentes si son sometidos a condiciones de voltaje inadecuadas. Además, la inestabilidad de voltaje puede provocar apagones y otros problemas operativos que afectan tanto a los consumidores residenciales como a las empresas.

Los transformadores de taps variables son dispositivos que permiten ajustar el voltaje de salida en respuesta a las variaciones de carga en la red eléctrica. Al utilizar estos transformadores, es posible mantener los niveles de voltaje dentro de un rango óptimo, mejorando así la estabilidad de la red. La investigación sobre el uso de estos transformadores en un sistema estándar de 9 barras, como el propuesto por la IEEE, puede proporcionar datos valiosos sobre cómo implementar esta tecnología de manera efectiva

en diferentes contextos. El modelo estándar de 9 barras de la IEEE es una referencia ampliamente utilizada en la investigación de sistemas eléctricos. Este modelo proporciona un marco simplificado pero representativo para estudiar el comportamiento de la red bajo diversas condiciones operativas. Al centrarse en este modelo, la investigación puede generar resultados que sean aplicables a una amplia variedad de sistemas eléctricos, facilitando la transferencia de conocimientos y tecnologías [5]

1.5 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

Se estima que este estudio tenga una duración aproximada de tres meses y se llevará a cabo en el laboratorio de la Universidad Politécnica Salesiana. Este entorno proporcionará los recursos necesarios y el equipo técnico especializado para realizar el análisis y las simulaciones requeridas. Los datos asociados a las barras se ajustan a los modelos de nueve barras establecidos por la normativa IEEE. Este modelo es ampliamente reconocido y utilizado en la investigación y análisis de sistemas eléctricos de potencia debido a su capacidad para representar de manera precisa y eficiente la operación y el comportamiento de las redes eléctricas bajo diversas condiciones. El análisis matemático de los datos se realizará mediante el método de Newton-Raphson. Este método es una técnica iterativa empleada para solucionar sistemas de ecuaciones no lineales, comúnmente aplicada en el análisis de flujos de carga en sistemas de potencia. Su principal ventaja radica en su capacidad para converger rápidamente a una solución precisa, lo que lo hace ideal para aplicaciones en ingeniería eléctrica. El método de Newton-Raphson se implementará utilizando el software MATLAB [7], una herramienta poderosa para el análisis y visualización de datos. MATLAB permitirá realizar cálculos complejos y obtener resultados precisos, facilitando así la interpretación de los datos y la identificación de posibles mejoras en la estabilidad del voltaje. Una vez obtenidos los resultados del análisis matemático, los datos de simulación serán comparados en el programa DIGSILENT [8] o en el software ETAP [9]. Ambos programas son herramientas de simulación y análisis avanzadas utilizadas en la ingeniería eléctrica para modelar y evaluar el rendimiento de sistemas de potencia, donde se espera la mejora del voltaje con respecto a la original establecida.

1.6 BENEFICIARIOS DE LA PROPUESTA

Operadores de Red: Las empresas de servicios públicos y los operadores de red se beneficiarán de técnicas mejoradas para mantener la estabilidad de voltaje en sus sistemas, lo que les permitirá proporcionar un suministro eléctrico más confiable y de alta calidad a sus clientes.

Industria Eléctrica: Los fabricantes de equipos eléctricos, incluidos los fabricantes de transformadores de taps, pueden utilizar los resultados de esta investigación para desarrollar productos más avanzados y eficientes que satisfagan las necesidades de corrección de voltaje en sistemas eléctricos.

Usuarios Finales: Los consumidores de electricidad se beneficiarán indirectamente de una red eléctrica más estable, ya que experimentarán menos interrupciones en el suministro y una mayor calidad de energía para sus dispositivos y equipos eléctricos.

1.7 OBJETIVOS

1.7.1 Objetivo General:

Evaluar el comportamiento de una red de distribución con problemas de estabilidad de voltaje, mediante cálculo matemático y simulación para demostrar la estabilidad de la red con la utilización de transformadores de tap variable.

1.7.2 Objetivos Específicos:

- Analizar la influencia de las variaciones de carga y las condiciones operativas en la estabilidad de voltaje del sistema de 9 barras de la IEEE.
- Valorar el rendimiento de la estrategia propuestas mediante simulación detallada, identificando su efectividad en la mejora de la estabilidad de voltaje de operación en la red.
- Presentar una estrategia matemática para el cálculo de la mejora de la estabilidad de voltaje para un sistema de 9 barras de la IEEE.

1.7.3 Metodología y medios

La metodología para la investigación sobre la corrección de la estabilidad de voltaje mediante transformadores de taps en un sistema de 9 barras de la IEEE:

- Paso 1: Revisión exhaustiva de la literatura para comprender el estado actual del conocimiento.
- Paso 2: Desarrollar el modelo del sistema de 9 barras de la IEEE.
- Paso 3: Realizar simulaciones en software Digsilent Power Factory o ETAP, el cual permita el desarrollo de flujos de carga para evaluar su comportamiento bajo diferentes condiciones de la carga.
- Paso 4: Diseñar experimentos para investigar el rendimiento de los transformadores de taps. Los datos obtenidos se analizan para determinar la eficacia de estos dispositivos.
- Paso 5: Comparar los resultados de las simulaciones y experimentos con la literatura existente y discutir sus implicaciones.
- Paso 6: Documentar el proceso, preparar informes y presentaciones para compartir los hallazgos con la comunidad académica y profesional, contribuyendo al avance de la experiencia en el ámbito de la ingeniería eléctrica.

CAPÍTULO II

2.1 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1.1 Estabilidad de Voltaje

La estabilidad de voltaje de un sistema eléctrico de potencia está ampliamente relacionada con la disposición de capacidad que contiene un sistema eléctrico de potencia para poder sostener una magnitud de voltaje, constante en todas las barras que tiene el sistema, tanto bajo condiciones normales de operación como para después de una perturbación en el sistema.

Los niveles de voltaje se pueden llegar a controlar mediante diversos métodos que implican la acción de dispositivos como lo son:

- Maniobras de conexión y desconexión de líneas de transmisión
- Interrupción del suministro
- La conmutación de capacitores e inductores
- La configuración del campo de excitación de los generadores
- Movimiento de los cambiadores de taps de los transformadores.

Las operaciones de control establecidas anteriormente deben analizarse de forma cuidadosa en cuanto a si éstas producen la influencia que se espera obtener, en otras palabras, implementando planes de protección del sistema para la regulación automática de los niveles de voltaje, para casos de prevención como para emergencia. De lo contrario, estos procedimientos pueden, en ocasiones tener efectos contrarios e incluso podría empeorar el perfil de voltaje ya inestable [10].

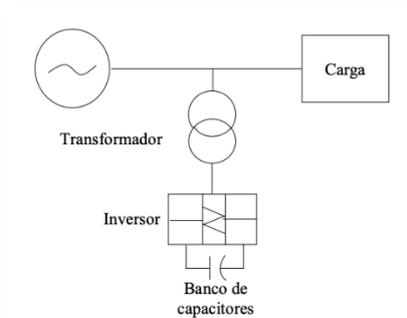


Gráfico 2.1 Diagrama equivalente [12]
Referencia: P. Rao, M.L. Crow, Z. Yang

2.1.2 Transformadores con taps

Los transformadores con cambiadores de taps también son uno de los métodos que sirven para mantener la estabilidad del voltaje. Este método permite adicionalmente gestionar una reserva adicional de capacidad de carga que en caso que esta se logre sobrepasar la capacidad del mismo sistema, cuando se enfrenta a esta situación, se tiende a establecer el perfil del voltaje dentro de los rangos tolerables de voltaje en relación de una señal de control, a diferencia del AVR (Generador sincrónico) este tiene una respuesta más aproximadamente de 1 min [13].

Los transformadores en su mayoría tienen ajustes de derivación es decir los taps en uno o más de sus devanados, permitiendo modificarse gradualmente de forma tanto manual como automática, de esta manera se puede modificar la relación del transformador, contribuyendo a variar los niveles de tensión del sistema. Entonces el regulador detecta la diferencia que existen entre la tensión de un devanado del transformador y el valor referencial, utilizando esta disparidad como error y transmitiendo una señal de control para poder ajustar de manera proporcional la configuración de los taps del transformador, ya sea para aumentar o disminuir la razón de cambio según se encuentre necesario [14].

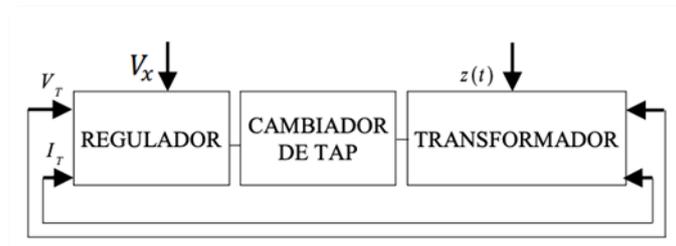


Gráfico 2.3 Diagrama de bloque del funcionamiento de transformador con tap [14]
Reference: U. Datta and M. S. Rahman

2.1.3 Compensación de potencia reactiva en paralelo

Debido a la progresiva necesidad de potencia reactiva y la limitación que mantienen las unidades de generación tratando de abastecer las mismas, el estudio de la planificación de los sistemas eléctricos, están enfocados en optimizar los niveles de tensión del mismo aplicando una administración correcta de la energía reactiva teniendo en cuenta donde se encuentran ubicados y de cuantos compensadores existen en paralelos que se conectan a las barras que mantienen una sensibilidad para controlar la estabilidad del voltaje [15].

Los compensadores reactivos trabajan de forma eficiente utilizando mediciones en barras piloto con el fin de gestionar sus recursos de forma óptima. Estos pueden consistir en la

utilización de bancos de inductores para así poder contrarrestar la capacitancia presente en las líneas y así poder elevar los niveles de voltajes o también se puede utilizar bancos de capacitores para poder igualar los componentes reactivos presentes en las cargas y así poder regular el nivel de voltaje, conociéndose esta estrategia como control de nivel secundario [16].

2.1.4 Caída de voltaje

Se puede establecer como la disparidad de potencial que existe entre dos puntos distintos en una línea eléctrica. La caída de tensión en una línea se expresa en voltios y se establece en función de la distancia y la resistencia que existe en la condición eléctrica, es decir si existe una mayor distancia de la fuente y una mayor resistividad causada por el conductor eléctrico, va a tener como consecuencia una caída de tensión.

En la red de distribución la puesta en marcha de cargas que trabajan a gran capacidad, con un alto consumo de corriente producen saturaciones en la red de suministro eléctrico, lo cual provocara caída de tensión y problemas en los sistemas eléctricos de potencia [19].

2.1.5 DIGSILENT Power Factory

Es un software que nos ayuda a poder analizar sistemas de potencia ya sean del tipo comercial o industrial de grandes empresas eléctricas, al ser un paquete computacional avanzado con el principal objetivo de analizar y controlar los sistemas de potencias con el fin de poder lograr una óptima operación y planificación.

Esta herramienta computacional nos ayuda a poder tener una integración fluida entre el manejo de los datos y su funcionalidad dentro del entorno del usuario, proporcionando la visualización de la simulación en tiempo real, con la facilidad de poder monitorear el rendimiento para pruebas y supervisión del sistema de potencia que deseamos [20].

Entre los análisis de mayor utilidad tenemos la siguientes [8]

- Análisis de fallas
- Análisis de flujos de carga
- Análisis de estabilidad de tensión
- Cálculo de parámetros de línea
- Análisis de contingencia

Y también se tiene Análisis más avanzadas:

- Análisis de armónicos
- Análisis de confiabilidad
- Flujo de potencia optimo
- Función de protección

2.1.6 MATLAB

MATLAB (Matrix Laboratory) es un ambiente de programación que mantiene un alto nivel particularmente en el diseño para el análisis numérico, la simulación y la visualización de datos que tiene como principal fundador MathWorks y es que generalmente se es utilización en el ámbito de la ingeniería, ciencias físicas, finanzas y otras disciplinas donde se necesite de un análisis y procesamiento de datos a nivel más avanzado [7].

Esta herramienta nos facilita un entorno de trabajo que ayuda a los profesionales a poder realizar cálculos matemáticos y estadísticos complejos, manipulación de matrices, visualización de datos y automatización de tareas mediante los llamados scripts [3].

2.1.7 ETAP

Es una herramienta de suma utilidad que se enfoca en el análisis y control sirviendo así para el diseño, simulación y operación de diversos sistemas eléctricos como: generación, distribución e industriales. Dentro del programa se puede utilizar ETAP en tiempo real, la cual tiene como objetivo el poder utilizar datos que se encuentren en el momento con el propósito de poder realizar el análisis de los sistemas de potencia para luego poder llevar a cabo la evaluación. Es una herramienta utilizada por empresas e industrias con el fin de poder realizar múltiples actividades como supervisar, controlar e incluso el optimizar, los sistemas de potencia propios de la actividad que se desempeñan [9].

Esta herramienta proporciona una multitud de secciones como son los que se presentan a continuación:

- Redes AC o DC
- Redes de tierra
- Diagramas de control de sistemas AC y DC
- Tendido y ruta de cables

2.1.8 Análisis de flujo de potencia en transformadores con regulación de taps

Comenzaremos definiendo un transformador con tap central, el cual tiene una derivación en el devanado primario denominada "tap central". Esta derivación permite ajustar la relación de transformación del transformador, modificando así la tensión de salida. Utilizando el tap central, es posible obtener una tensión de salida inferior a la tensión nominal del transformador, lo cual es útil en situaciones que requieren una tensión de salida más baja.

Por ejemplo, en un transformador con una relación de transformación de 220V/12V, al utilizar el tap central, se puede obtener una tensión de salida de 6V. Esto resulta beneficioso en aplicaciones que requieren una tensión más baja, como en ciertos equipos electrónicos.

Es importante considerar que el uso del tap central puede influir en la capacidad de carga del transformador. Al emplear el tap central, la corriente de salida será mayor que en la configuración nominal, por lo que es esencial asegurarse de que el transformador esté adecuadamente dimensionado para soportar esta carga adicional.

El estudio de los flujos de potencia en transformadores con cambiadores de tap se centra en cómo se distribuye la potencia en un sistema eléctrico que incluye estos transformadores. Dichos transformadores cuentan con un dispositivo mecánico que permite ajustar la relación de transformación entre los devanados primario y secundario, lo que ayuda a controlar el voltaje en los nodos del sistema eléctrico.

Aunque el análisis de los flujos de potencia con taps es similar al de los transformadores convencionales, presenta algunas diferencias importantes.

- La relación de transformación entre los devanados primario y secundario es variable, lo que implica que la potencia aparente transferida entre ambos lados también varía.
- El cambiador de taps puede generar pérdidas adicionales en el transformador, las cuales deben ser consideradas en el análisis de flujos de potencia.

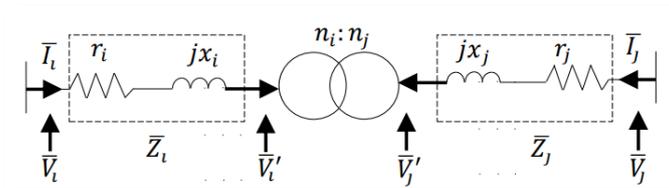


Gráfico 2.4 Modelo del transformador con tap [14]
Reference: U. Datta and M. S. Rahman

Al observar las siguientes ecuaciones de la relación de transformación tanto para voltaje (1) y para la corriente (2), aplicable para ambos lados del transformador:

$$\frac{V_i - I_i Z_i}{n_i} = \frac{V_j - I_j Z_j}{n_j} \quad (1)$$

$$\frac{I_i}{n_j} = \frac{I_j}{n_i} \quad (2)$$

Al hacer la sustitución apropiada y aislando los términos independientes, se determina la admitancia en el transformador (5) y las corrientes en cada nodo de conexión I_i (3) y I_j (4). Para este caso no se considera la resistencia de los devanados.

$$I_i = n_i n_j (V_i - V_j) y + n_j (n_j - n_i) V_i y \quad (3)$$

$$I_i = n_i n_j (V_j - V_i) y + n_i (n_i - n_j) V_j y. \quad (4)$$

$$y = \frac{1}{n_i^2 X_j + n_j^2 X_i} \quad (5)$$

Este análisis matemático muestra un circuito equivalente en π , perteneciente a los transformadores de tap variable, como se ilustra en la gráfica 2.5.

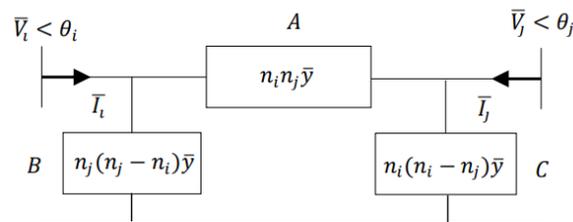


Gráfico 2.5 Modelo π del transformador para flujo de potencia [26]
Referencia: P. Rivera, A. E. Oleas, and C. A. Barrera

2.1.9 Representaciones de componentes para el análisis de flujo de potencia en sistemas eléctricos

El sistema eléctrico consta de una variedad de elementos y datos técnicos, lo que implica la creación de modelos fundamentales para su representación durante su análisis. Estos modelos simplificados tienen en cuenta una red de nodos conectados por impedancias y reactancias, que son representadas por líneas y transformadores. Además, cada nodo tiene barras de conexión que alojan generadores y cargas que generan y consumen energía.

2.1.10 Líneas de transmisión

La transmisión eficiente de electricidad se realiza mediante líneas de transmisión, que son una parte importante del sistema eléctrico. Sin embargo, su operación enfrenta desafíos relacionados con la dinámica cambiante de la red, impulsada principalmente por el continuo aumento de la demanda energética. Este fenómeno provoca cambios en el flujo de corriente a lo largo de la línea, lo que puede provocar cargas excesivas y fluctuaciones de voltaje que exceden los límites permisibles de la subestación [21].

2.1.10.1 Representación de líneas

En el análisis de sistemas de potencia, las líneas son representadas mediante modelos simplificados y equivalentes, utilizando los parámetros apropiados previamente desarrollados. Las ecuaciones generales que describen la relación entre el voltaje y una corriente en una línea de transmisión consideran los parámetros de la línea distribuidos a lo largo de su longitud. No obstante, en la mayoría de las situaciones, el conductor puede ser adecuadamente representada por un modelo en el cual sus parámetros eléctricos se concentran en un punto específico a lo largo de la línea [22].

2.1.10.1.1 Línea de tramo corto

En líneas que tienen menos de 80 km de longitud y operan a tensiones por debajo de los 70 kV, la capacitancia en paralelo puede ser despreciada. En este caso, el modelo de la línea se simplifica a su impedancia serie, la cual resulta de multiplicar la impedancia por unidad de longitud por la longitud total de la línea.

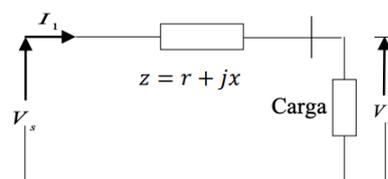


Gráfico 2.6 Diagrama de Tramo corto [23]
Reference: D.P Kothari and I.J Nagrath

2.1.10.1.2 Línea de tramo medio

En los cálculos de una línea de longitud intermedia (80 a 240km), se considera la inclusión de la admitancia en paralelo, que suele representarse como capacitancia pura. Esta admitancia se divide en dos partes iguales, una en cada extremo de la línea, y el circuito resultante se conoce como circuito nominal π [23], [24]

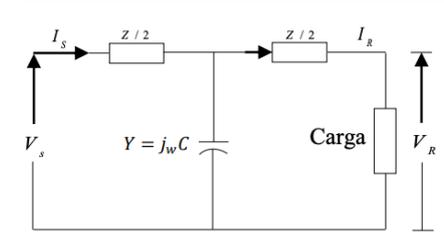


Gráfico 2.7 Circuito de tramo medio [23]
Reference: D.P Kothari and I.J Nagrath

2.1.10.1.3 Línea de tramo largo

Este tipo de líneas abarca aquellas que tienen una longitud de 240 km o más. En este caso, se debe tener en cuenta la distribución de parámetros a lo largo de la longitud de la línea.

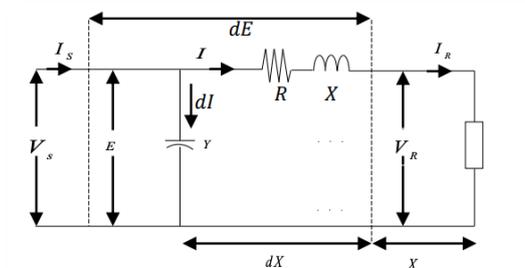


Gráfico 2.8 Circuito de tramo largo [23]
Reference: D.P Kothari and I.J Nagrath

2.1.11 Cargas

La caracterización de las cargas es un aspecto complicado de analizar debido a su constante cambio, influenciado por el incremento y la variabilidad del consumo industrial y doméstico.

Usualmente, los modelos de carga se clasifican en dos tipos: dinámicos y estáticos, los cuales están sujetos al voltaje y la frecuencia.

Las cargas dinámicas se emplean en análisis de estabilidad temporal, de tal forma que

para el análisis de flujos de potencia se utilizan cargas fijas. Estas últimas mantienen las características en todo momento y están compuestas tanto por potencia activa en MW como por reactiva en Mvar. [24].

En este proyecto, se están utilizando modelos que asumen una carga eléctrica constante, los cuales no dependen del voltaje.

CAPÍTULO III

3.1 MODELO DEL TRANSFORMADOR DE TAP VARIABLE

Cuando se ajustan los taps en un transformador y la alimentación se realiza desde el lado primario, se observan los siguientes efectos según el modelo convencional:

- El voltaje en el lado secundario varía debido al cambio en la relación de transformación.
- La impedancia de cortocircuito del transformador se modifica. Esto se debe a que la reactancia inductiva es proporcional al cuadrado del número de espiras, y la resistencia también cambia al modificar el número de espiras. Para determinar la admitancia nominal, se realizan pruebas de cortocircuito con los valores nominales de espiras tanto en el primario como en el secundario.

Por lo general, este valor es proporcionado por el fabricante y se puede encontrar en la placa de características del transformador.

3.2 MÉTODO NEWTON-RAPSHON PARA FLUJOS DE POTENCIA

Para evaluar la gestión del voltaje en los sistemas eléctricos de potencia, es fundamental simular los flujos de potencia mediante el método de Newton-Raphson. Este enfoque permite calcular tanto las potencias activa y reactiva, como la magnitud y el ángulo de los voltajes. En el proceso iterativo, se incorpora una nueva variable: los taps que se encuentran en los transformadores de potencia, con el propósito de poder ajustar los niveles de voltaje en una de las barras de conexión.

En este trabajo, la resolución del flujo de potencia mediante el método de Newton-Raphson necesita ajustar el sistema de ecuaciones de potencia y la incorporación de los términos de la matriz Jacobiana, integrando los taps de los transformadores. Este enfoque permite determinar los componentes de la matriz Jacobiana modificada y sus derivadas, se obtienen las variables eléctricas asociadas con flujo de potencia mediante un proceso iterativo.

La inclusión de los taps de los transformadores en el modelo permite un control más preciso del voltaje, lo cual es importante para poder garantizar la estabilidad y el rendimiento del sistema eléctrico.

3.3 MODELACIÓN MATEMÁTICA

Para calcular los flujos de potencia, es esencial resolver las ecuaciones no lineales relacionadas con la potencia. Aplicando las leyes de Kirchhoff en cada nodo del sistema eléctrico, se puede determinar la potencia activa y reactiva. Esto genera las ecuaciones nodales de potencia, indicadas como (6) y (7), que representan un total de $2n$ ecuaciones para n nodos del sistema.

$$Q_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| [G_{ij} \sin(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})] \quad (6)$$

$$P_i = \sum_{j=1}^n |V_i| |V_j| [G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_{ij})] \quad (7)$$

Para integrar la variable en el algoritmo de Newton-Raphson para el transformador de tap, se utilizan ecuaciones que relacionan corrientes y voltajes (3) y (4). Estas ecuaciones provienen del modelo π del transformador, y generan la matriz de admitancias.

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_j^2 y_{ii} & -n_i n_j y_{ij} \\ -n_i n_j y_{ji} & n_i^2 y_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} \quad (8)$$

Como resultado, se obtienen las ecuaciones para las barras situadas en los lados del transformador, donde n_i y n_j indican los valores de los taps respectivos.

$$P_j = n_i^2 |V_j|^2 G_{ii} + n_j n_i |V_j| |V_i| [G_{ij} \cos(\Delta\theta) + B_{ij} \sin(\Delta\theta)] \quad (9)$$

$$Q_j = -n_i^2 |V_j|^2 B_{ii} + n_j n_i |V_j| |V_i| [G_{ij} \sin(\Delta\theta) - B_{ij} \cos(\Delta\theta)] \quad (10)$$

$$P_i = n_j^2 |V_i|^2 G_{ii} + n_j n_i |V_j| |V_i| [G_{ij} \cos(\Delta\theta) + B_{ij} \sin(\Delta\theta)] \quad (11)$$

$$Q_i = -n_j^2 |V_i|^2 B_{ii} + n_j n_i |V_j| |V_i| [G_{ij} \sin(\Delta\theta) - B_{ij} \cos(\Delta\theta)] \quad (12)$$

Para llevar a cabo la linealización del conjunto de ecuaciones, estas se reorganizan en una forma matricial, como se ilustra en la representación correspondiente. En esta estructura, k denota el índice de cada iteración, ΔS es el vector que representa los errores de potencia, y J es la matriz Jacobiana. En J , se calculan las derivadas de las funciones de potencia en relación con las variables eléctricas de estado que aún no se conocen.

$$H_{ij} = \frac{dP_i}{d\theta_j} \quad (13)$$

$$N_{ij} = |V_j| \frac{dP_i}{dV_j} \quad (14)$$

$$L_{ij} = \frac{dQ_i}{d\theta_j} \quad (15)$$

$$M_{ij} = |V_j| \frac{dQ_i}{dV_j} \quad (16)$$

Además de lo mencionado previamente, se está explorando la integración de los ajustes de los taps de los transformadores como una variable de control n_i , diseñada para regular la magnitud del voltaje V_j en la barra j . En este nuevo marco, se define esta barra como un tipo distinto de barra PQV. Las variables fundamentales incluyen P_j , Q_j y V_j , siendo V_j dependiente de la relación de transformación y de la posición del tap. La representación esquemática de la matriz Jacobiana se adapta en consecuencia.

Para regular la magnitud del voltaje en la barra i llamada emisora o en el lado receptor j llamado receptora, se contempla la variación del tap en el lado primario y en el lado secundario. La siguiente sección detalla la linealización de las ecuaciones de flujo de potencia:

1. Nodo emisor i hacia j ,

$$\begin{pmatrix} \Delta P_i \\ \Delta P_j \\ \Delta Q_i \\ \Delta Q_j \end{pmatrix}^k = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_i}{\partial n_i} n_i & \frac{\partial P_j}{\partial V_i} V_i \\ \frac{\partial P_j}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_j}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_j}{\partial n_i} n_i & \frac{\partial P_j}{\partial V_i} V_i \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial n_i} n_i & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} V_i \\ \frac{\partial Q_j}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_j}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_j}{\partial n_i} n_i & \frac{\partial Q_j}{\partial V_i} V_i \end{pmatrix}^k \begin{pmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta \theta_j \\ \frac{\Delta n_i}{n_i} \\ \frac{\Delta V_i}{V_i} \end{pmatrix}^k \quad (17)$$

2. Nodo emisor j hacia i ,

$$\begin{pmatrix} \Delta P_i \\ \Delta P_j \\ \Delta Q_i \\ \Delta Q_j \end{pmatrix}^k = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_i}{\partial n_j} n_j & \frac{\partial P_i}{\partial V_j} V_j \\ \frac{\partial P_j}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_j}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_j}{\partial n_j} n_j & \frac{\partial P_j}{\partial V_j} V_j \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial n_j} n_j & \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} V_j \\ \frac{\partial Q_j}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_j}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_j}{\partial n_j} n_j & \frac{\partial Q_j}{\partial V_j} V_j \end{pmatrix}^k \begin{pmatrix} \Delta \theta_i \\ \Delta \theta_j \\ \frac{\Delta n_j}{n_j} \\ \frac{\Delta V_j}{V_j} \end{pmatrix}^k \quad (18)$$

En cada iteración, se actualiza el valor del controlador de tap n_i o n_j según la barra de conexión correspondiente, ajustando así la magnitud del voltaje.

$$[n_i]^k = [n_i]^{k-1} + \left[\frac{\Delta n_i}{n_i} \right]^k [n_i]^{k-1} \quad (19)$$

$$[n_j]^k = [n_j]^{k-1} + \left[\frac{\Delta n_j}{n_j} \right]^k [n_j]^{k-1} \quad (20)$$

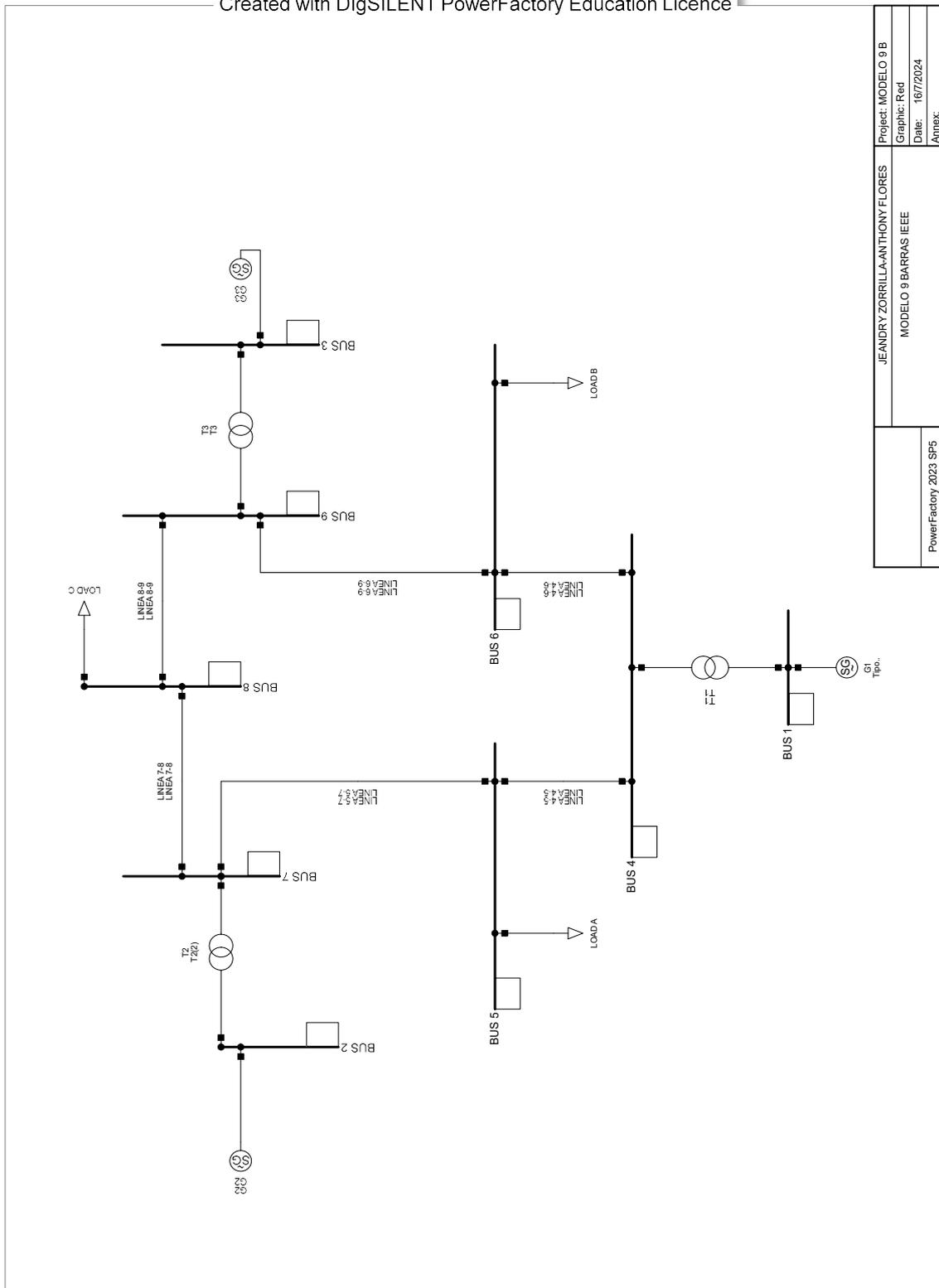
Este modelo simula cómo se controla el voltaje en las barras de conexión con un transformador con taps.

3.4 PLANTEAMIENTO E INTEGRACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

El artículo de investigación propone utilizar el programa de cálculo y análisis matemático “MATLAB” para implementar el modelo matemático desarrollado. Este modelo es bastante general y puede aplicarse a uno o más transformadores dentro de un sistema eléctrico de potencia, permitiendo controlar el voltaje en una de las barras de conexión. Es diseñado para el lado primario y secundario de los devanados del transformador. Para validar el control del voltaje mediante los transformadores de tap, se emplea el modelo en el sistema de prueba IEEE de 9 barras mencionado en la Figura 3.1

MODELO DE 9 BARRAS DE LA IEEE

Created with DlgSILENT PowerFactory Education Licence



Project: MODELO 9 B	JEANDRY ZORRILLA-ANTHONY FLORES
Graphic: Red	MODELO 9 BARRAS IEEE
Date: 16/7/2024	PowerFactory_2023 SP5
Annex:	

Gráfico 3.1 Modelo de 9 barras de la IEEE
Adaptación; Autores

El modelo IEEE de 9 barras como se muestra en la Grafica 3.1, incluye 3 generadores ubicados en las barras 1, 2 y 3, cuyos valores de tensión, potencia, factor de potencia, entre otros datos, se detallan en la Tabla 1. Además, se debe considerar que este modelo utiliza una base de análisis de 100MVA para convertir los valores de tensión y potencia en p.u. Los datos de los elementos del sistema se presentan a continuación:

*Tabla 1 Datos de los generadores [28]
Adaptación; Autores*

BARRA	P. pu	Vn	S (MVA)	Voltaje nominal (kV)	F.P (ϕ)	xd'
1	NaN	1.40	247.50	16.50	1.00	0.0608
2	1.63	1.025	192.00	18.00	0.84	0.1198
3	0.85	1.025	128.00	13.80	0.85	0.1819

Los datos de la resistencia, reactancia y admitancia de las líneas de transmisión del sistema eléctrico conformado por las 9 barras se presentan en la Tabla 2:

*Tabla 2 Datos de las barras [28]
Adaptación; Autores*

Barra emisora	Barra receptora	R (resistencia)	X(reactancia)	b/2
1	4	0	0.0576	0
2	7	0	0.0625	0
3	9	0	0.0586	0
4	5	0.01	0.085	0.088
4	6	0.017	0.092	0.079
5	7	0.031	0.161	0.153
6	9	0.039	0.17	0.179
7	8	0.0085	0.072	0.0745
8	9	0.0119	0.1008	0.1045

A continuación en la Tabla 3, se presentan los datos de la tensión y potencia de los transformadores del sistema de 9 barras, los cuales tienen una conexión YN/D, lo que significa que en el lado de alta tensión tendremos D y en el lado de baja tensión tendremos YN.

*Tabla 3 Datos de los transformadores [28]
Adaptación; Autores*

Transformadores	LV (kV)	HV (kV)	S (MVA)
T1	16.50	230.00	250.00
T2	18.00	230.00	230.00
T3	13.80	230.00	150.00

En la siguiente Tabla 4, se encuentran los valores de la potencia activa y reactiva que corresponden a las cargas que se encuentran en las barras 5,6 y 8.

*Tabla 4 Datos de las cargas [28]
Adaptación; Autores*

Barra	P(MW)	Q(MVAR)	Pd p.u	Qd p.u
5	125.00	50.00	1.25	0.50
6	90.00	30.00	0.90	0.30
8	100.00	35.00	1.00	0.35

Como se mostró en la Tabla 1, el modelo de 9 barras de la IEEE está constituida por 3 generadores el cual uno de ellos se encuentra con la configuración de SLACK este generador se conoce como G1, y se ubica en la barra 1, la función de este generador es de poder balancear la potencia activa y reactiva del sistema. Además, el modelo se también este compuesto por 3 transformadores, 9 líneas de transmisión y 3 cargas.

3.5 SIMULACIÓN DEL FLUJO DE POTENCIA DEL SISTEMA DE 9 BARRAS DE LA IEEE

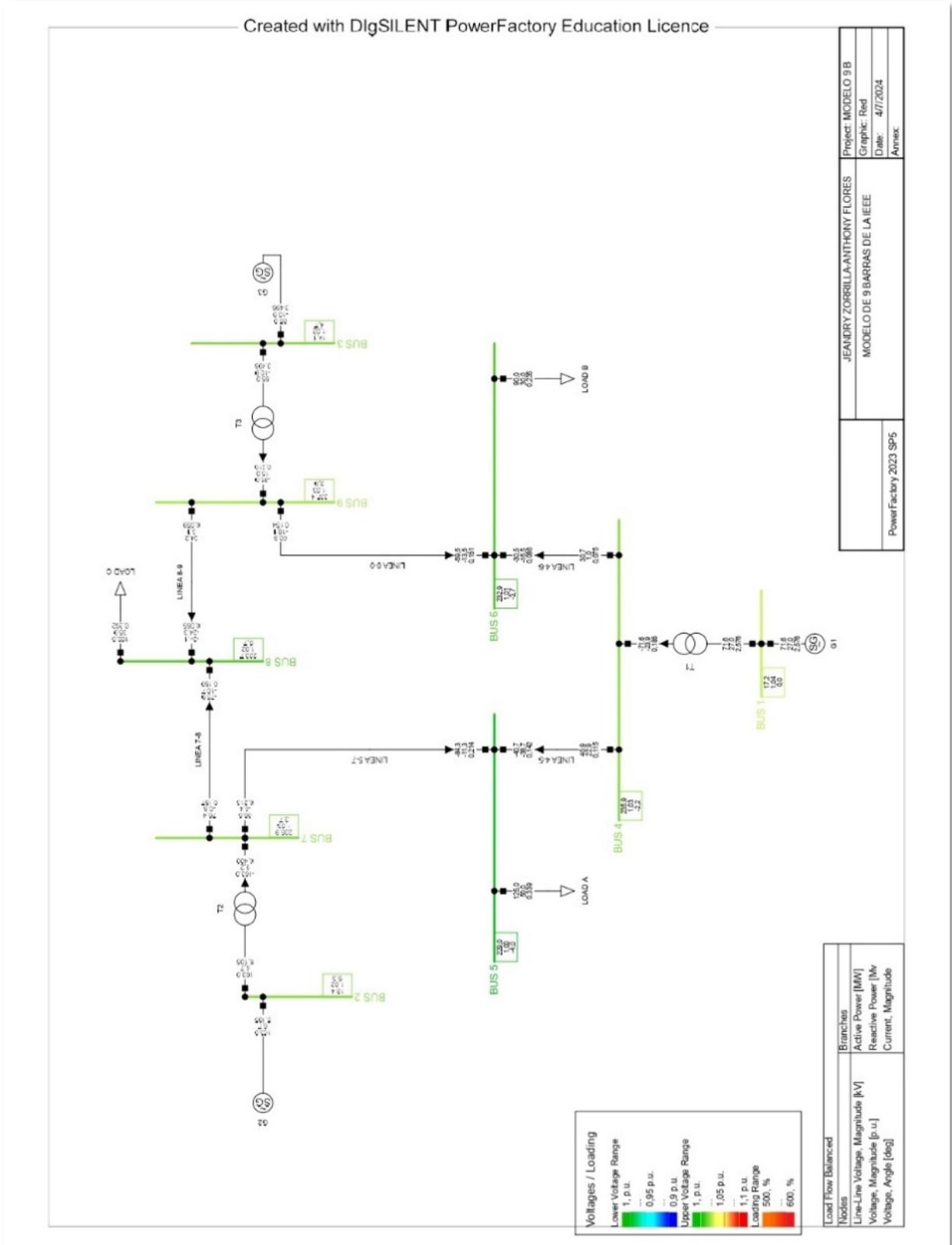
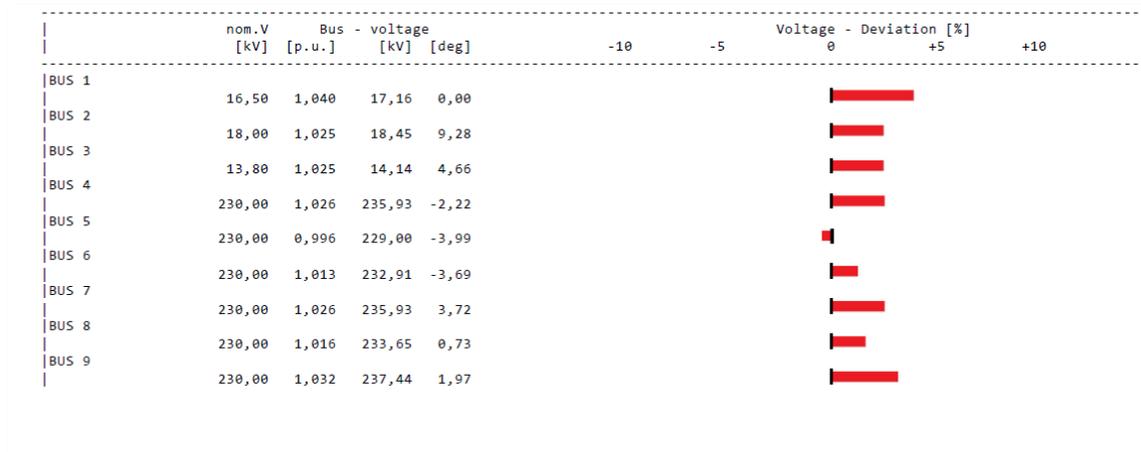


Gráfico 3.2 Simulación en DIGSILENT modelo de 9 barras de la IEEE
Adaptación; Autores

3.5.1 Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT

En la Grafica 3.3 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en DIGSILENT donde se observa el estado original (sin modificación) del sistema de 9 barras de la IEEE.



Grafica 3.3 Reporte del flujo de potencia en DIGSILENT
Adaptación; Autores

3.5.2 Cálculo del flujo de potencia mediante el software MATLAB

En la Grafica 3.4 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en MATLAB donde se observa el estado original (sin modificación) del sistema de 9 barras de la IEEE.

NUMERO DE ITERACIONES = 3							
Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load----- MW	Mvar	---Generation--- MW	Mvar	Injected Mvar
1	1.040	0.000	0.000	0.000	71.641	27.046	0.000
2	1.025	9.280	0.000	0.000	163.000	6.654	0.000
3	1.025	4.665	0.000	0.000	85.000	-10.860	0.000
4	1.026	-2.217	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.996	-3.989	125.000	50.000	0.000	0.000	0.000
6	1.013	-3.687	90.000	30.000	0.000	0.000	0.000
7	1.026	3.720	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.016	0.728	100.000	35.000	0.000	0.000	0.000
9	1.032	1.967	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Total			315.000	115.000	319.641	22.840	0.000

Grafica 3.4 Reporte de flujo de potencia en MATLAB
Adaptación; Autores

3.6 SISTEMA DE VALIDACIÓN

Para implementar los modelos mencionados anteriormente, se procederá según la condición específica: la parte estática se desarrollará en MATLAB, donde los códigos se encuentran anexados en la gráfica 8.1 [27], misma que se encuentra en la plataforma de MATLAB para su uso de forma gratuita. La parte dinámica del control del sistema se llevará a cabo mediante el software DIGSILENT PowerFactory, aplicándose a los SEP descritos a continuación.

Como punto de aclaración para el modelo de 9 barras mencionado anteriormente se ha añadido una pequeña modificación para efectos de análisis, se pretende la implementación de un cuarto transformador de 230kV a 13.8kV con un incremento de tap de 1.25% y límite de los taps +8/-8, misma que será ubicada en los distintos casos de estudio antes de las cargas que se encuentran en el modelo original de 9 barras como se muestra en el Grafico 3.2, dado que el software DIGSILENT powerfactory no permite una conexión directa entre el transformador y la carga se debe añadir una barra extra, queriendo decir que para el análisis de estos casos nuestro sistema tendrá 10 barras. Así mismo se trabaja en MATLAB con un numero de iteración igual a 3. Los datos del transformador añadido se presentan en la Tabla 5 [25]:

*Tabla 5 Datos de transformador añadido [25]
Adaptación; Autores*

Transformador	LV (kV)	HV (kV)	S (MVA)	X	R	b/2	TAPS
T4/T5/T6	13.8	230	100	0	0.13	0	8X1.25%

3.6.1 Caso 1

Modelo de sistema aplicando lo siguiente: Transformador con tap=0 en la carga A de la barra 10 conectada a la barra 5

En este caso se emplea el modelo del sistema de 9 barras - IEEE del Grafico 3.2 aplicando el transformador de taps en la carga A a una nueva barra 10 que se conecta a la barra 5, tal como se muestra en la Grafica 3.5.

Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT

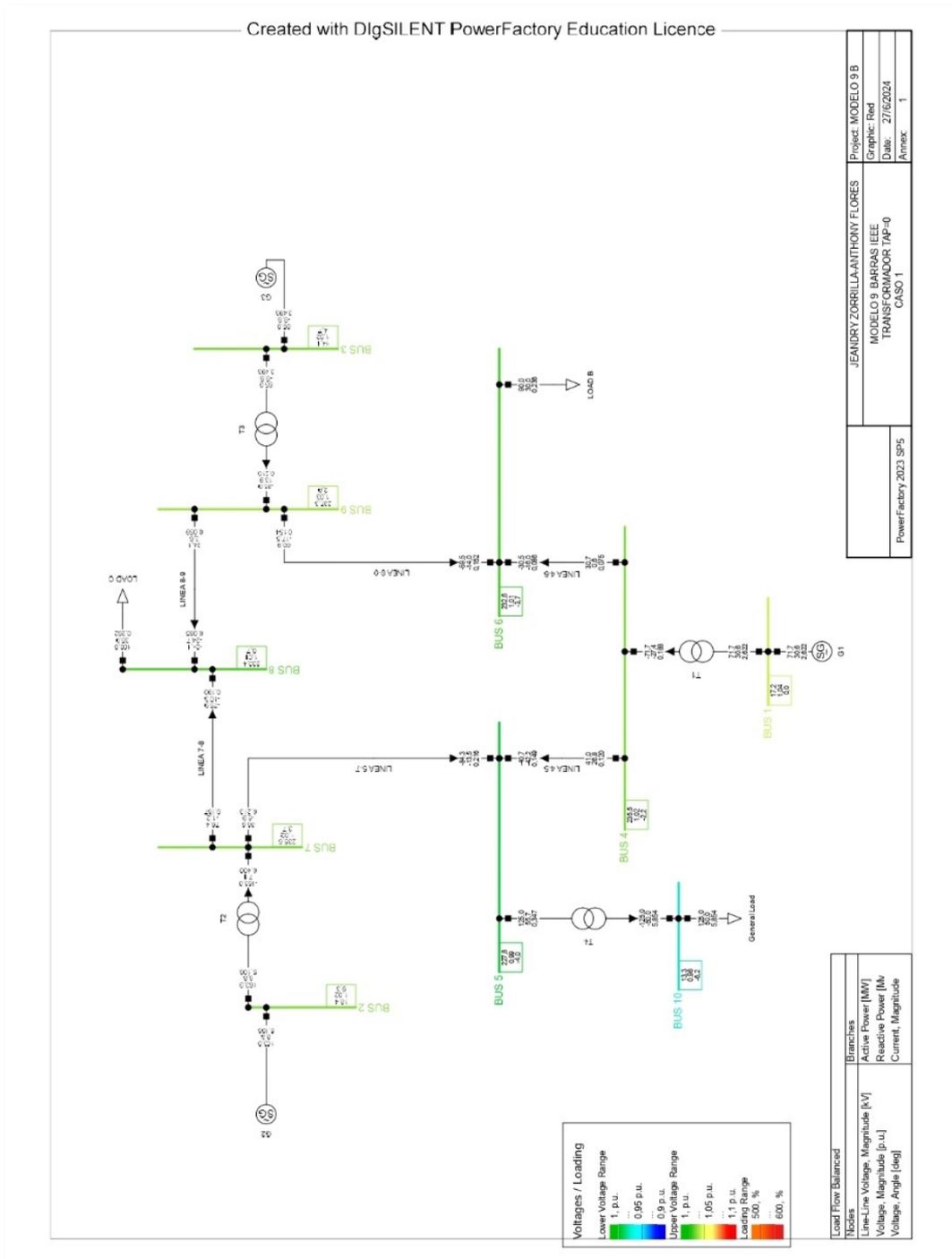


Gráfico 3.5 Simulación del flujo de potencia en DIGSILENT caso 1 con 10 barras
Adaptación; Autores

En la Grafica 3.6 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en DIGSILENT donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.5. Sin cambios de taps.

Grid: Red	System Stage: Red				Study Case: Caso de Estudio		Annex: / 1		
	nom.V [kV]	Bus - voltage [p.u.]	[kV]	[deg]	-10	-5	Voltage - Deviation [%]	+5	+10
BUS 1	16,50	1,040	17,16	0,00					
BUS 10	13,80	0,962	13,28	-6,22					
BUS 2	18,00	1,025	18,45	9,29					
BUS 3	13,80	1,025	14,14	4,66					
BUS 4	230,00	1,024	235,48	-2,22					
BUS 5	230,00	0,990	227,79	-3,99					
BUS 6	230,00	1,011	232,55	-3,70					
BUS 7	230,00	1,024	235,63	3,72					
BUS 8	230,00	1,015	233,41	0,72					
BUS 9	230,00	1,032	237,31	1,96					

Gráfico 3.6 Reporte realizado en DIGSILENT caso 1
Adaptación; Autores

Cálculo del flujo de potencia mediante el software MATLAB

En la Grafica 3.7 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en MATLAB donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.5. Sin cambios de taps.

NUMERO DE ITERACIONES = 3							
Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.040	0.000	0.000	0.000	71.690	30.594	0.000
2	1.025	9.289	0.000	0.000	163.000	8.794	0.000
3	1.025	4.656	0.000	0.000	85.000	-9.824	0.000
4	1.024	-2.223	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.990	-3.989	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	1.011	-3.701	90.000	30.000	0.000	0.000	0.000
7	1.024	3.722	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.015	0.720	100.000	35.000	0.000	0.000	0.000
9	1.032	1.956	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.962	-6.217	125.000	50.000	0.000	0.000	0.000
Total			315.000	115.000	319.690	29.565	0.000

Gráfico 3.7 Reporte realizado en Matlab caso 1
Adaptación; Autores

Modelo de sistema aplicando lo siguiente: Transformador con tap=3 en la carga A de la barra 10 conectado a la barra 5

En este caso se emplea el modelo del sistema de 9 barras modificado del Grafico 3.5 aplicando el transformador de taps en la carga A de la barra 10 que se conecta a la barra 5 dando un valor de 3, tal como se muestra en la Grafica 3.8.

Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT

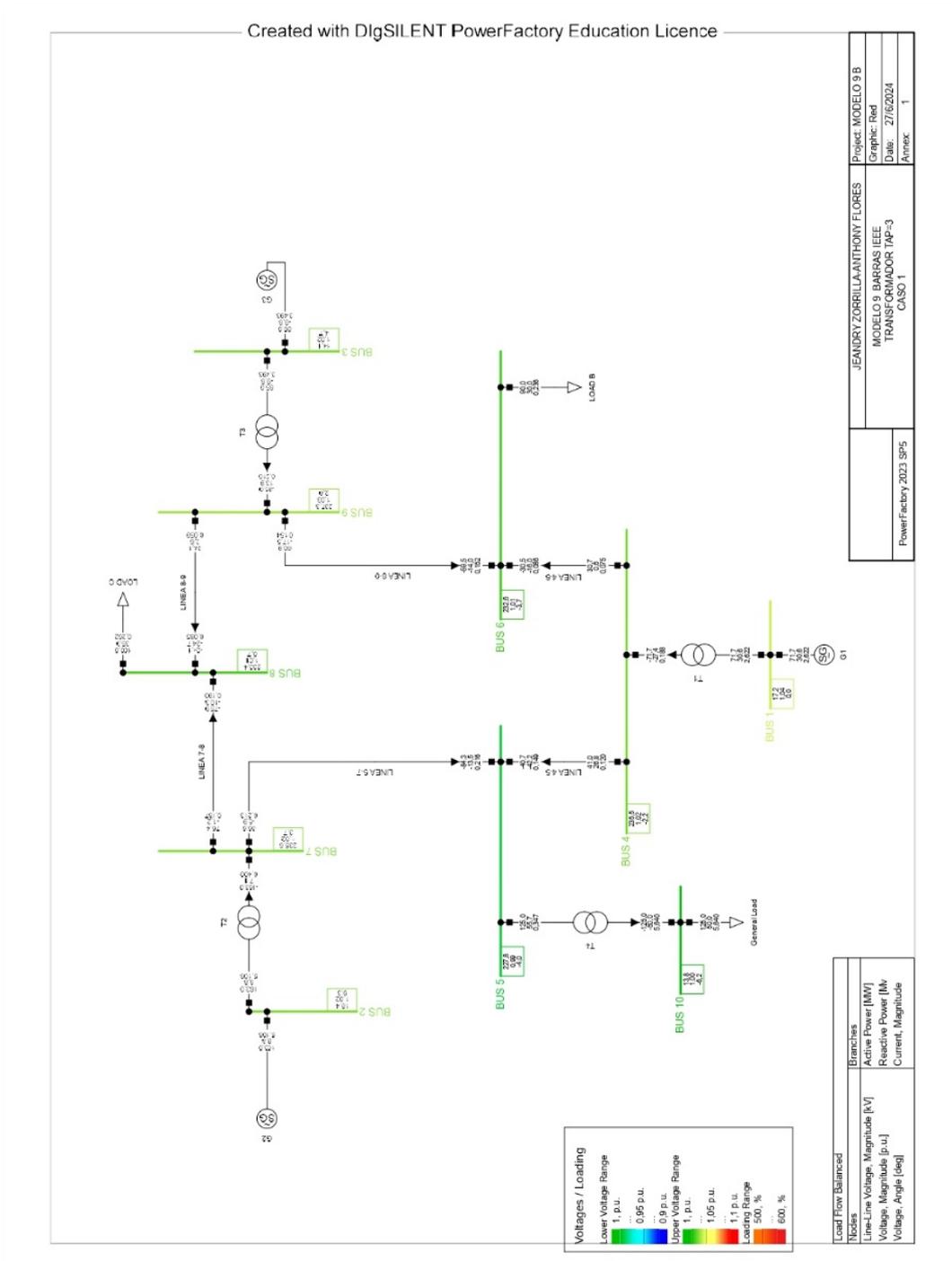


Gráfico 3.8 Simulación con 10 barras aplicando transformador de tap Adaptación; Autores

En la Grafica 3.9 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en DIGSI-ENT donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.5. Con cambios de taps.

Grid: Red		System Stage: Red		Study Case: Caso de Estudio		Annex:		/ 1	
BUS	nom.V	Bus - voltage		Voltage - Deviation [%]					
	[kV]	[p.u.]	[kV]	[deg]	-10	-5	0	+5	+10
BUS 1	16,50	1,040	17,16	0,00					
BUS 10	13,80	0,999	13,78	-6,22					
BUS 2	18,00	1,025	18,45	9,29					
BUS 3	13,80	1,025	14,14	4,66					
BUS 4	230,00	1,024	235,48	-2,22					
BUS 5	230,00	0,990	227,79	-3,99					
BUS 6	230,00	1,011	232,55	-3,70					
BUS 7	230,00	1,024	235,63	3,72					
BUS 8	230,00	1,015	233,41	0,72					
BUS 9	230,00	1,032	237,31	1,96					

Gráfico 3.9 Reporte en DIGSI-ENT aplicando transformador de tap=3
Adaptación; Autores

Cálculo del flujo de potencia mediante el software MATLAB

En la Grafica 3.10 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en MATLAB donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.5. Con cambios de taps.

NUMERO DE ITERACIONES = 3							
Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected
			MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar
1	1.040	0.000	0.000	0.000	71.690	30.594	0.000
2	1.025	9.289	0.000	0.000	163.000	8.794	0.000
3	1.025	4.656	0.000	0.000	85.000	-9.824	0.000
4	1.024	-2.223	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.990	-3.989	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	1.011	-3.701	90.000	30.000	0.000	0.000	0.000
7	1.024	3.722	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.015	0.720	100.000	35.000	0.000	0.000	0.000
9	1.032	1.956	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	1.000	-6.217	125.000	50.000	0.000	0.000	0.000
Total			315.000	115.000	319.690	29.565	0.000

Gráfico 3.10 Reporte en MATLAB aplicando transformador de tap=3
Adaptación; Autores

3.6.2 Caso 2

Modelo de sistema aplicando lo siguiente: Transformador con tap=0 en la carga B de la barra 11 conectado a la barra 6

En este caso se emplea el modelo del sistema de 9 barras - IEEE del Grafico 3.2 aplicando el transformador de taps en la carga A a una nueva barra 11 que se conecta a la barra 6, tal como se muestra en la Grafica 3.11.

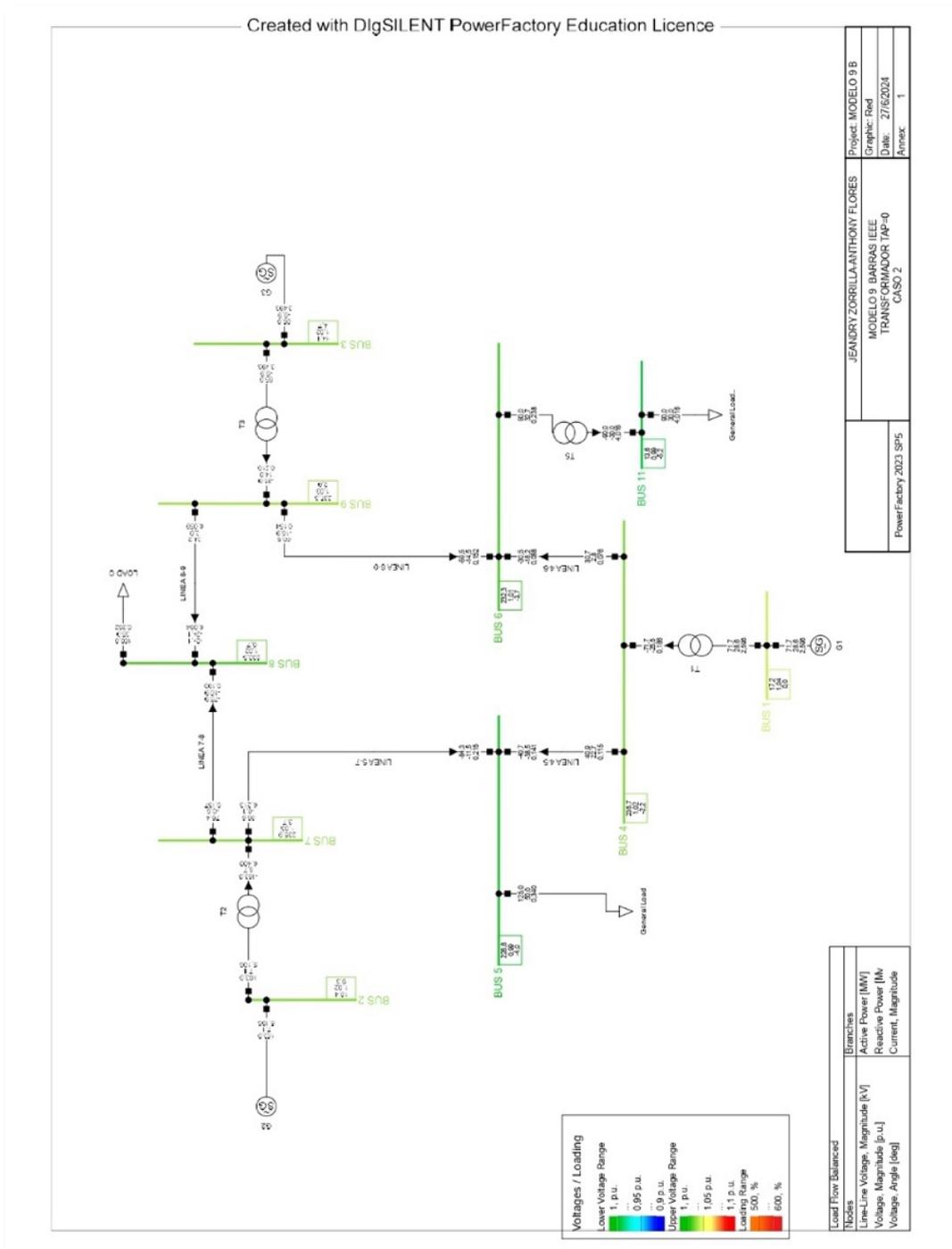


Gráfico 3.11 Simulación del flujo de potencia en DIGSILENT caso 2 con 10 barras
Adaptación; Autores

Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT.

En la Grafica 3.12 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en DIGSILENT donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.11. Sin cambios de taps.

Grid: Red		System Stage: Red			Study Case: Caso de Estudio		Annex: / 1		
	nom.V [kV]	Bus - voltage [p.u.]	[kV]	[deg]	-10	-5	voltage - Deviation [%]	+5	+10
BUS 1	16,50	1,040	17,16	0,00					
BUS 2	18,00	1,025	18,45	9,28					
BUS 3	13,80	1,025	14,14	4,67					
BUS 4	230,00	1,025	235,73	-2,22					
BUS 5	230,00	0,995	228,83	-3,99					
BUS 6	230,00	1,010	232,34	-3,68					
BUS 7	230,00	1,025	235,86	3,72					
BUS 8	230,00	1,015	233,56	0,72					
BUS 9	230,00	1,032	237,31	1,97					
BUS 11	13,80	0,988	13,64	-5,21					

Gráfico 3.12 Reporte realizado en DIGSILENT caso 2
Adaptación; Autores

Cálculo del flujo de potencia mediante el software MATLAB

En la Grafica 3.13 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en MATLAB donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.11. Sin cambios de taps.

NUMERO DE ITERACIONES = 3							
Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.040	0.000	0.000	0.000	71.652	28.635	0.000
2	1.025	9.279	0.000	0.000	163.000	7.119	0.000
3	1.025	4.666	0.000	0.000	85.000	-9.874	0.000
4	1.025	-2.219	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.995	-3.995	125.000	50.000	0.000	0.000	0.000
6	1.010	-3.679	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	1.025	3.718	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.015	0.725	100.000	35.000	0.000	0.000	0.000
9	1.032	1.967	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.988	-5.209	90.000	30.000	0.000	0.000	0.000
Total			315.000	115.000	319.652	25.880	0.000

Gráfico 3.13 Reporte realizado en MATLAB caso 2
Adaptación; Autores

Modelo de sistema aplicando lo siguiente: Transformador con tap=1 en la carga B de la barra 11 conectada a la barra 6

En este caso se emplea el modelo del sistema de 9 barras modificado del Grafico 3.11 aplicando el transformador de taps en la carga B de la barra 11 que se conecta a la barra 6 dando un valor de 1 al taps, tal como se muestra en la Grafico 3.14.

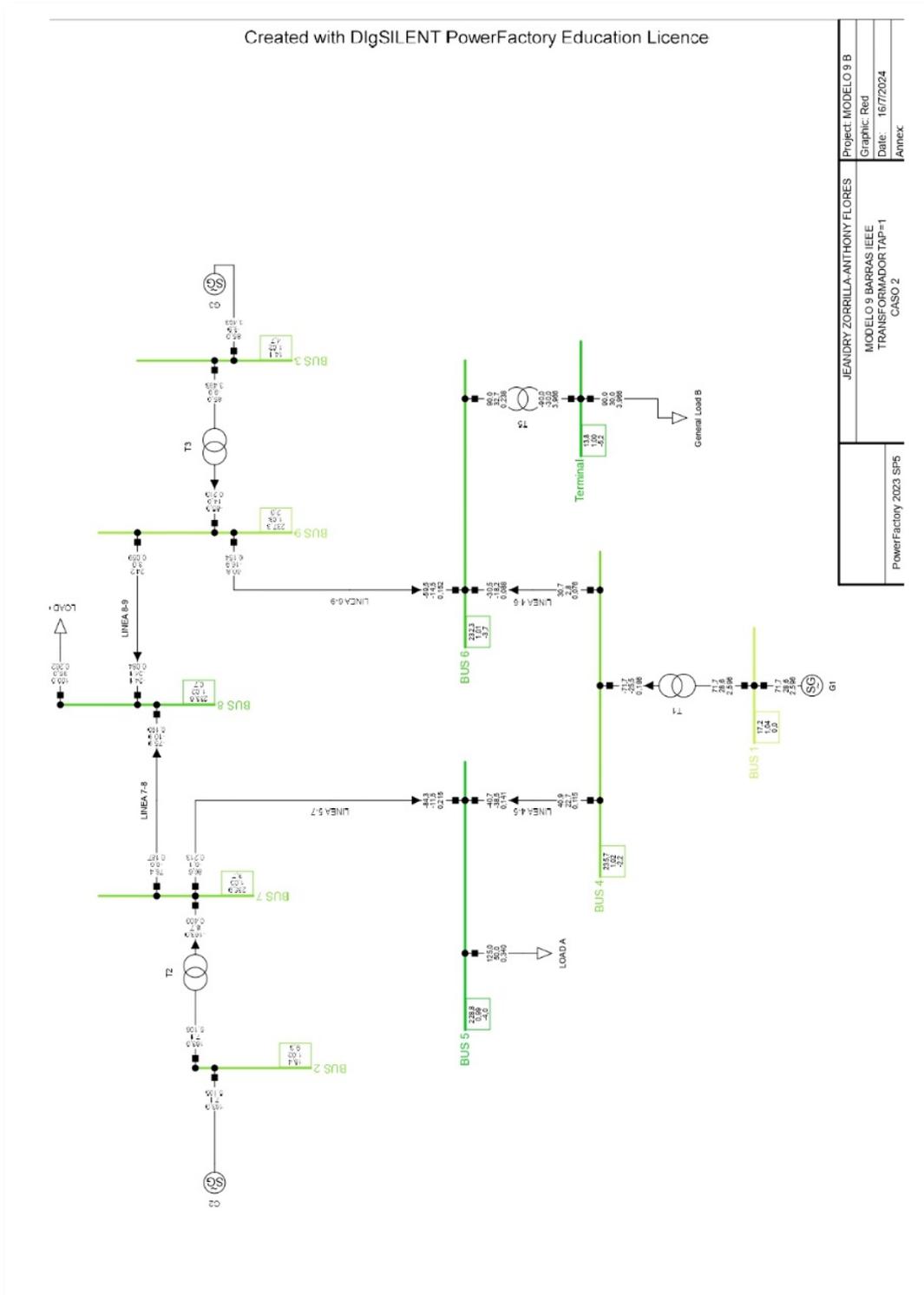


Gráfico 3.14 Simulación con 10 barras aplicando transformador de tap
Adaptación; Autores

Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT

En la Grafica 3.15 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en DIGSILENT donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.14. Con cambios de taps.

	nom.V [kV]	Bus - voltage [p.u.]	voltage		Voltage - Deviation [%]					
			[kV]	[deg]	-10	-5	0	+5	+10	
BUS 1	16,50	1,040	17,16	0,00						
BUS 11	13,80	1,001	13,81	-5,21						
BUS 2	18,00	1,025	18,45	9,28						
BUS 3	13,80	1,025	14,14	4,67						
BUS 4	230,00	1,025	235,73	-2,22						
BUS 5	230,00	0,995	228,83	-3,99						
BUS 6	230,00	1,010	232,34	-3,68						
BUS 7	230,00	1,025	235,86	3,72						
BUS 8	230,00	1,015	233,56	0,72						
BUS 9	230,00	1,032	237,31	1,97						

Gráfico 3.15 Reporte en Digsilent aplicando transformador de tap=1
Adaptación; Autores

Cálculo del flujo de potencia mediante el software MATLAB

En la Grafica 3.16 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en MATLAB donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.14. Sin cambios de taps.

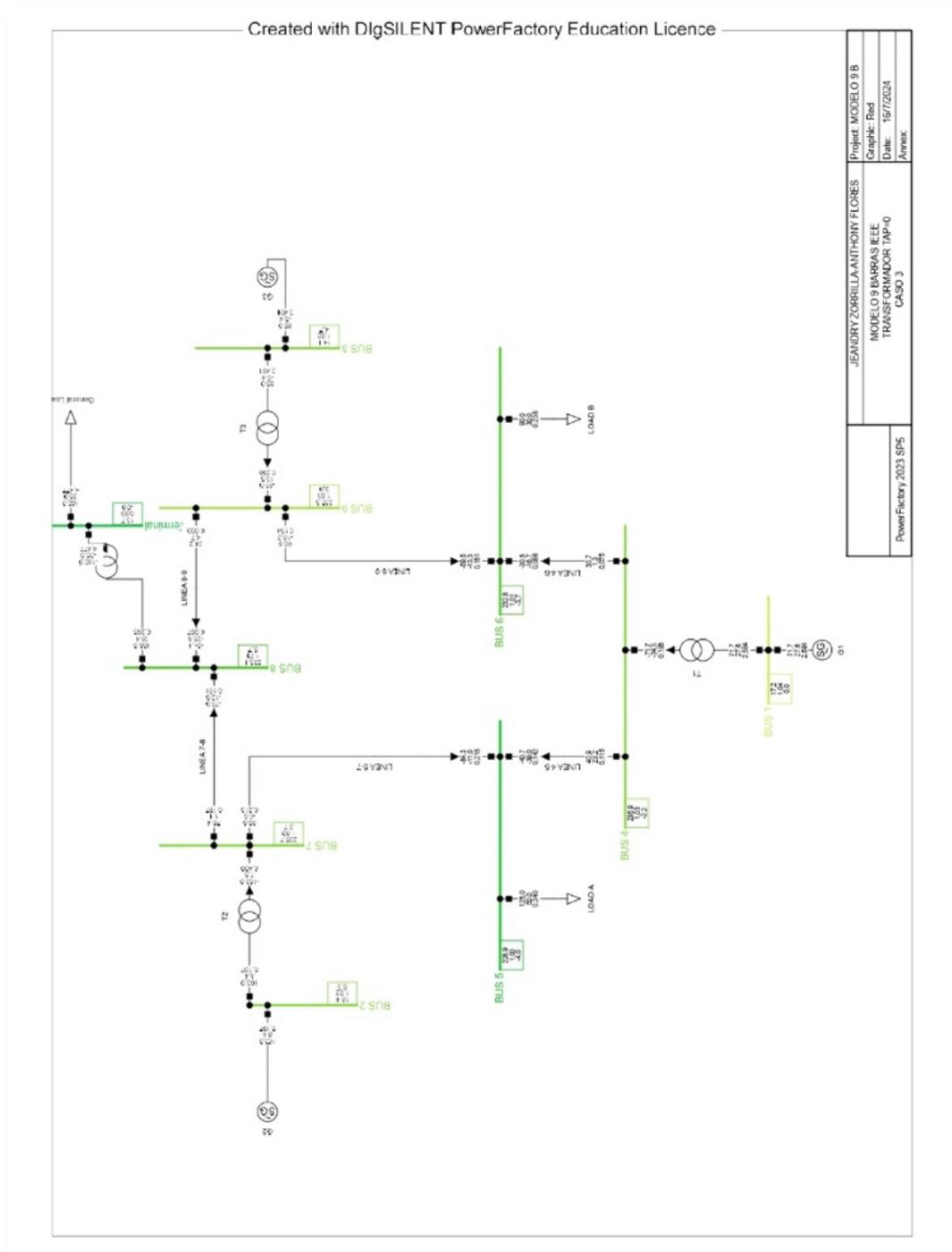
NUMERO DE ITERACIONES = 3							
Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.040	0.000	0.000	0.000	71.652	28.635	0.000
2	1.025	9.279	0.000	0.000	163.000	7.119	0.000
3	1.025	4.666	0.000	0.000	85.000	-9.874	0.000
4	1.025	-2.219	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.995	-3.995	125.000	50.000	0.000	0.000	0.000
6	1.010	-3.679	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	1.025	3.718	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.015	0.725	100.000	35.000	0.000	0.000	0.000
9	1.032	1.967	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	1.001	-5.209	90.000	30.000	0.000	0.000	0.000
Total			315.000	115.000	319.652	25.880	0.000

Grafico 3.16 Reporte en MATLAB aplicando transformador de tap=1
Adaptación; Autores

3.6.3 Caso 3

Modelo de sistema aplicando lo siguiente: Transformador con tap=0 en la carga C de la barra 10 conectada a la barra 8

En este caso se emplea el modelo del sistema de 9 barras - IEEE del Grafico 3.2 aplicando el transformador de taps en la carga C a una nueva barra 10 que se conecta a la barra 8, tal como se muestra en la Grafica 3.17.



*Grafica 3.17 Simulación del flujo de potencia en DIGSILENT caso 3 con 10 barras
Adaptación; Autores*

Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT

En la Grafica 3.18 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en DIGSILENT donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.17. Sin cambios de taps.

Grid: Red		System Stage: Red			Study Case: Caso de Estudio		Annex: / 1		
	nom.V [kV]	Bus - [p.u.]	voltage [kV]	[deg]	-10	-5	Voltage - 0	Deviatión [%] +5	+10
BUS 1	16,50	1,040	17,16	0,00					
BUS 12	13,80	0,990	13,66	-0,95					
BUS 2	18,00	1,025	18,45	9,30					
BUS 3	13,80	1,025	14,14	4,68					
BUS 4	230,00	1,025	235,86	-2,22					
BUS 5	230,00	0,995	228,85	-3,99					
BUS 6	230,00	1,012	232,79	-3,69					
BUS 7	230,00	1,025	235,69	3,74					
BUS 8	230,00	1,013	233,10	0,74					
BUS 9	230,00	1,032	237,25	1,98					

*Gráfico 3.18 Reporte realizado en DIGSILENT caso 3
Adaptación; Autores*

Cálculo del flujo de potencia mediante el software MATLAB

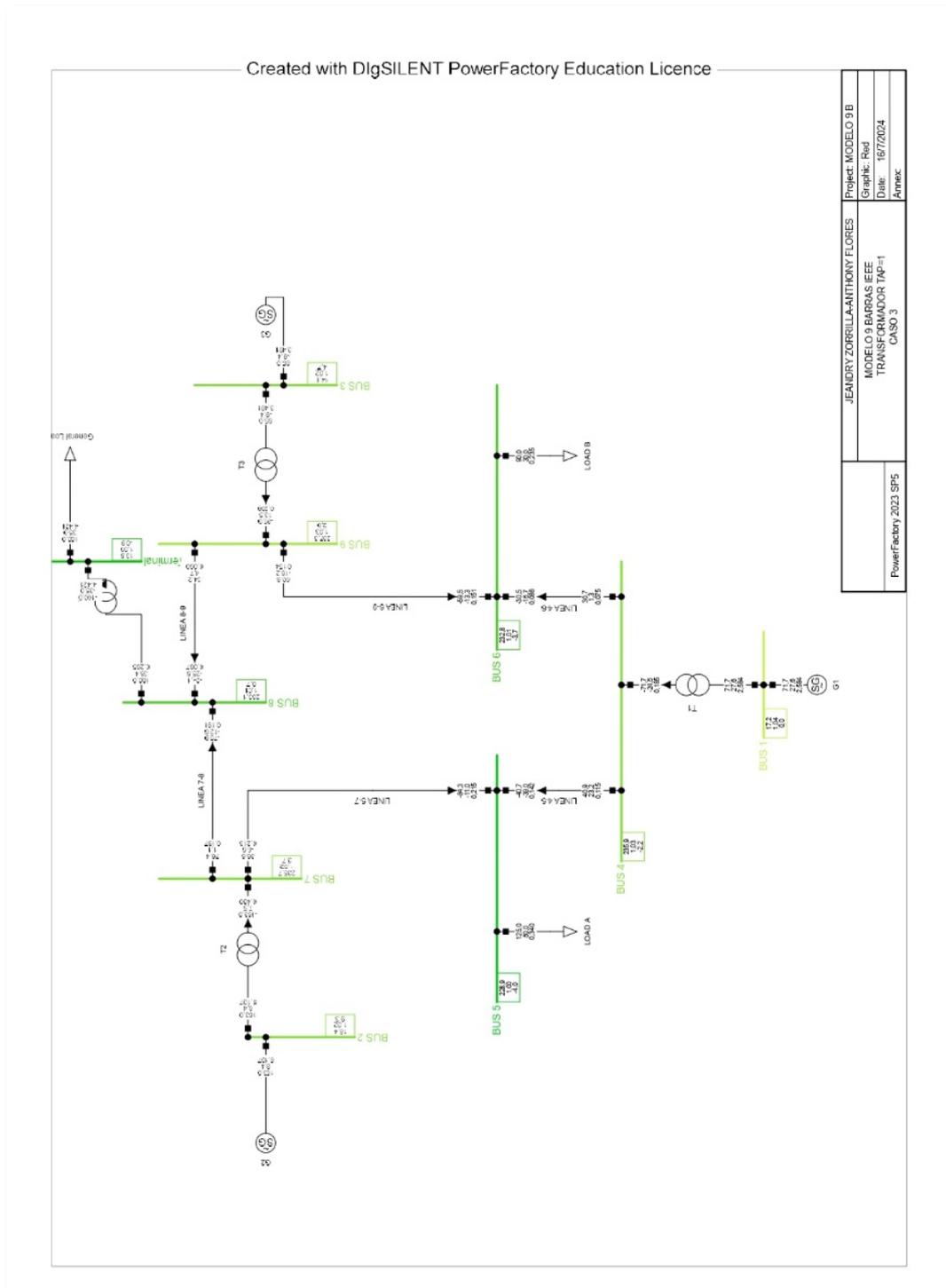
En la Grafica 3.19 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en MATLAB donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.17. Sin cambios de taps.

NUMERO DE ITERACIONES = 3							
Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.040	0.000	0.000	0.000	71.658	27.634	0.000
2	1.025	9.302	0.000	0.000	163.000	8.365	0.000
3	1.025	4.676	0.000	0.000	85.000	-9.414	0.000
4	1.025	-2.218	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.995	-3.990	125.000	50.000	0.000	0.000	0.000
6	1.012	-3.688	90.000	30.000	0.000	0.000	0.000
7	1.025	3.736	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.013	0.743	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	1.032	1.976	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.990	-0.949	100.000	35.000	0.000	0.000	0.000
Total			315.000	115.000	319.658	26.585	0.000

Gráfico 3.19 Reporte realizado en MATLAB caso 3
Adaptación; Autores

Modelo de sistema aplicando lo siguiente: Transformador con tap=1 en la carga C de la barra 10 conectado a la barra 8

En este caso se emplea el modelo del sistema de 9 barras modificado del Grafico 3.17 aplicando el transformador de taps en la carga C de la barra 10 que se conecta a la barra 8 dando un valor de 1 al taps, tal como se muestra en la Grafico 3.20.



Grafica 3.20 Simulación con 10 barras aplicando transformador de tap
Adaptación; Autores

Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT

En la Grafica 3.21 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en DIGSILENT donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.20. Con cambios de taps.

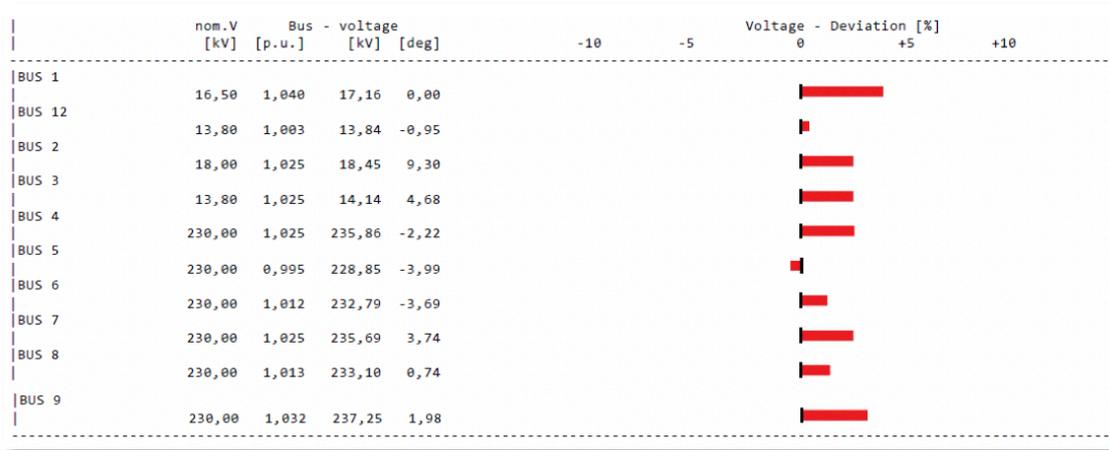


Grafico 3.21 Reporte en DIGSILENT aplicando transformador de tap=1
Adaptación; Autores

Cálculo del flujo de potencia mediante el software MATLAB

En la Grafica 3.22 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en MATLAB donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.20. Sin cambios de taps.

NUMERO DE ITERACIONES = 3

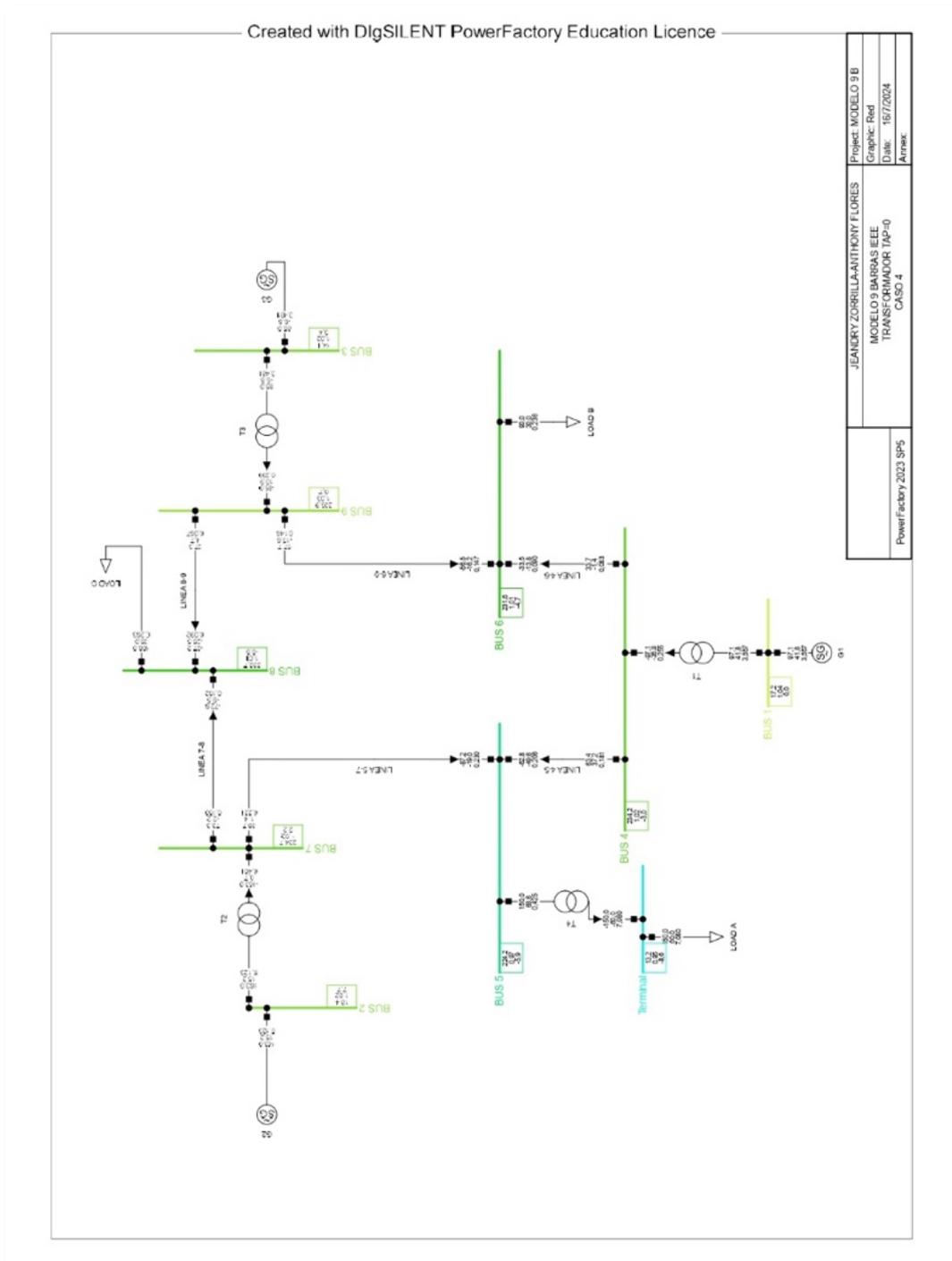
Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected	
			MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar	
1	1.040	0.000	0.000	0.000	71.658	27.634	0.000	
2	1.025	9.302	0.000	0.000	163.000	8.365	0.000	
3	1.025	4.676	0.000	0.000	85.000	-9.414	0.000	
4	1.025	-2.218	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
5	0.995	-3.990	125.000	50.000	0.000	0.000	0.000	
6	1.012	-3.688	90.000	30.000	0.000	0.000	0.000	
7	1.025	3.736	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
8	1.013	0.743	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
9	1.032	1.976	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	
10	1.003	-0.949	100.000	35.000	0.000	0.000	0.000	
Total			315.000	115.000	319.658	26.585	0.000	

Grafico 3.22 Reporte en MATLAB aplicando transformador de tap=1
Adaptación; Autores

3.6.4 Caso 4

Modelo de sistema aplicando lo siguiente: Transformador con tap=0 y aumento en la carga A ubicada en la barra 10 conectada a la barra 5

En este caso se emplea el modelo del sistema de 9 barras - IEEE del Grafico 3.2 aplicando el transformador de taps en la carga A a una nueva barra 10 que se conecta a la barra 5, tal como se muestra en la Grafica 3.23.



Gráfica 3.23 Simulación del flujo de potencia en DIGSILENT caso 4 con 10 barras
Adaptación; Autores

Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT

En la Grafica 3.24 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en DIGSILENT donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.23. Sin cambios de taps.

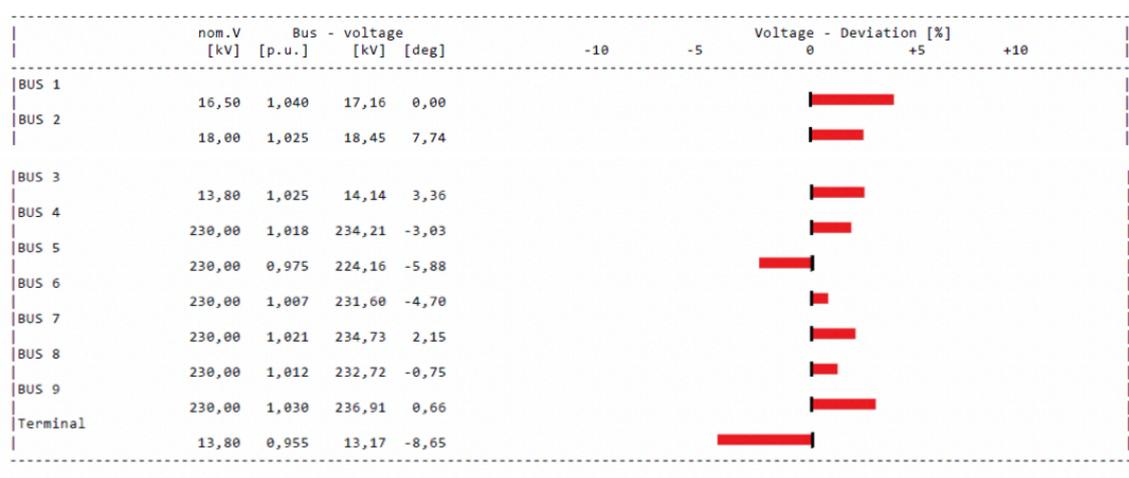


Grafico 3.24 Reporte realizado en DIGSILENT caso 4
Adaptación; Autores

Cálculo del flujo de potencia mediante el software MATLAB

En la Grafica 3.25 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en MATLAB donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.23. Sin cambios de taps.

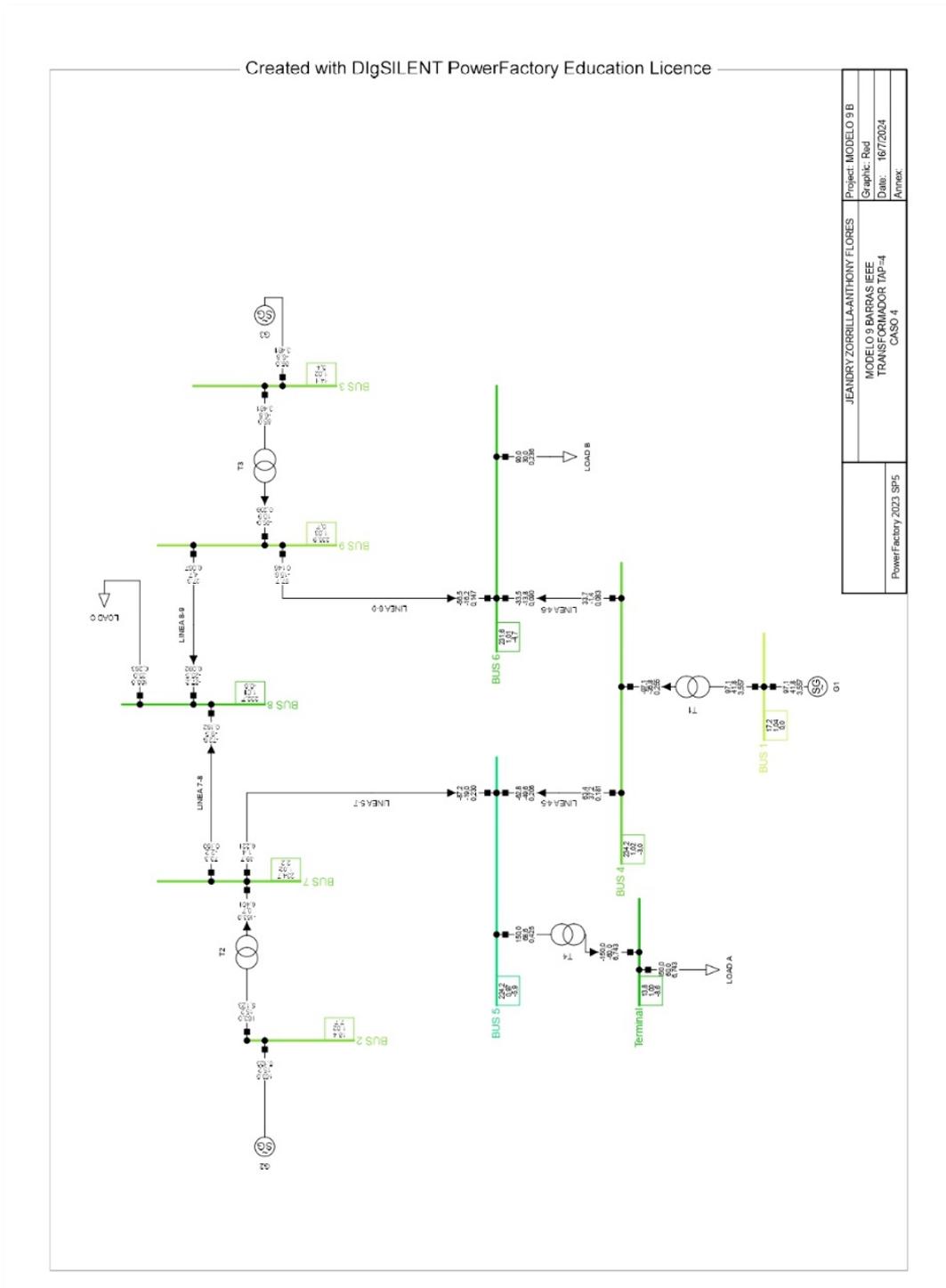
NUMERO DE ITERACIONES = 3

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load----- MW	Mvar	---Generation--- MW	Mvar	Injected Mvar
1	1.040	0.000	0.000	0.000	97.136	41.761	0.000
2	1.025	7.741	0.000	0.000	163.000	15.213	0.000
3	1.025	3.362	0.000	0.000	85.000	-6.850	0.000
4	1.018	-3.028	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.975	-5.875	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	1.007	-4.696	90.000	30.000	0.000	0.000	0.000
7	1.021	2.152	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.012	-0.750	100.000	35.000	0.000	0.000	0.000
9	1.030	0.658	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.955	-8.648	150.000	60.000	0.000	0.000	0.000
Total			340.000	125.000	345.136	50.123	0.000

Grafico 3.25 Reporte realizado en Matlab caso 4
Adaptación; Autores

Modelo de sistema aplicando lo siguiente: Transformador con tap=4 y aumento en la carga A de 150MW-60MVA ubicada en la barra 10 conectada a la barra 5

En este caso se emplea el modelo del sistema de 9 barras modificado del Grafico 3.23 aplicando el transformador de taps en la carga A de la barra 10 que se conecta a la barra 5 dando un valor de 4 al taps, tal como se muestra en la Grafico 3.26.



Gráfica 3.26 Simulación con 10 barras con transformador de tap
Adaptación; Autores

Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT

En la Grafica 3.27 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en DIGSILENT donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.26. Con cambios de taps.

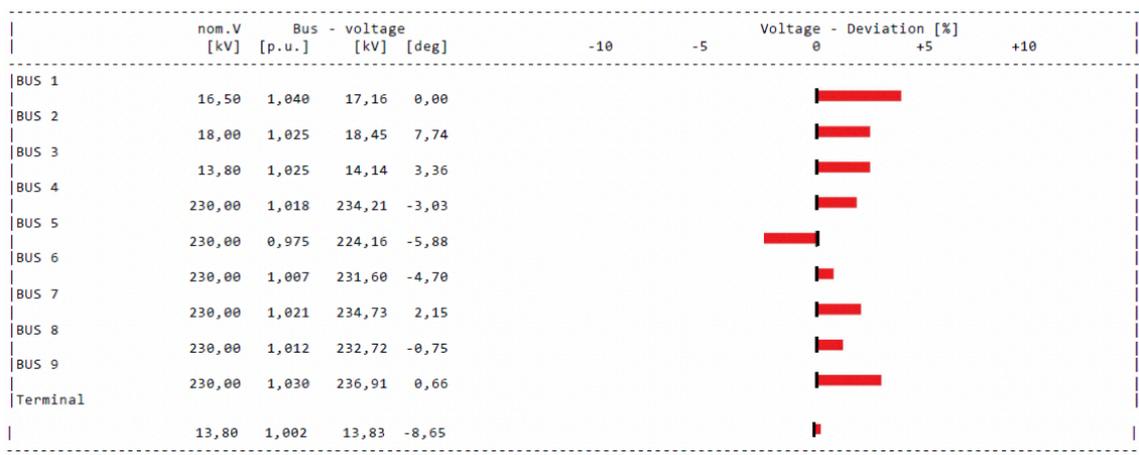


Grafico 3.27 Reporte en DIGSILENT aplicando transformador de tap=4
Adaptación; Autores

Cálculo del flujo de potencia mediante el software MATLAB

En la Grafica 3.28 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en MATLAB donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.26. Sin cambios de taps.

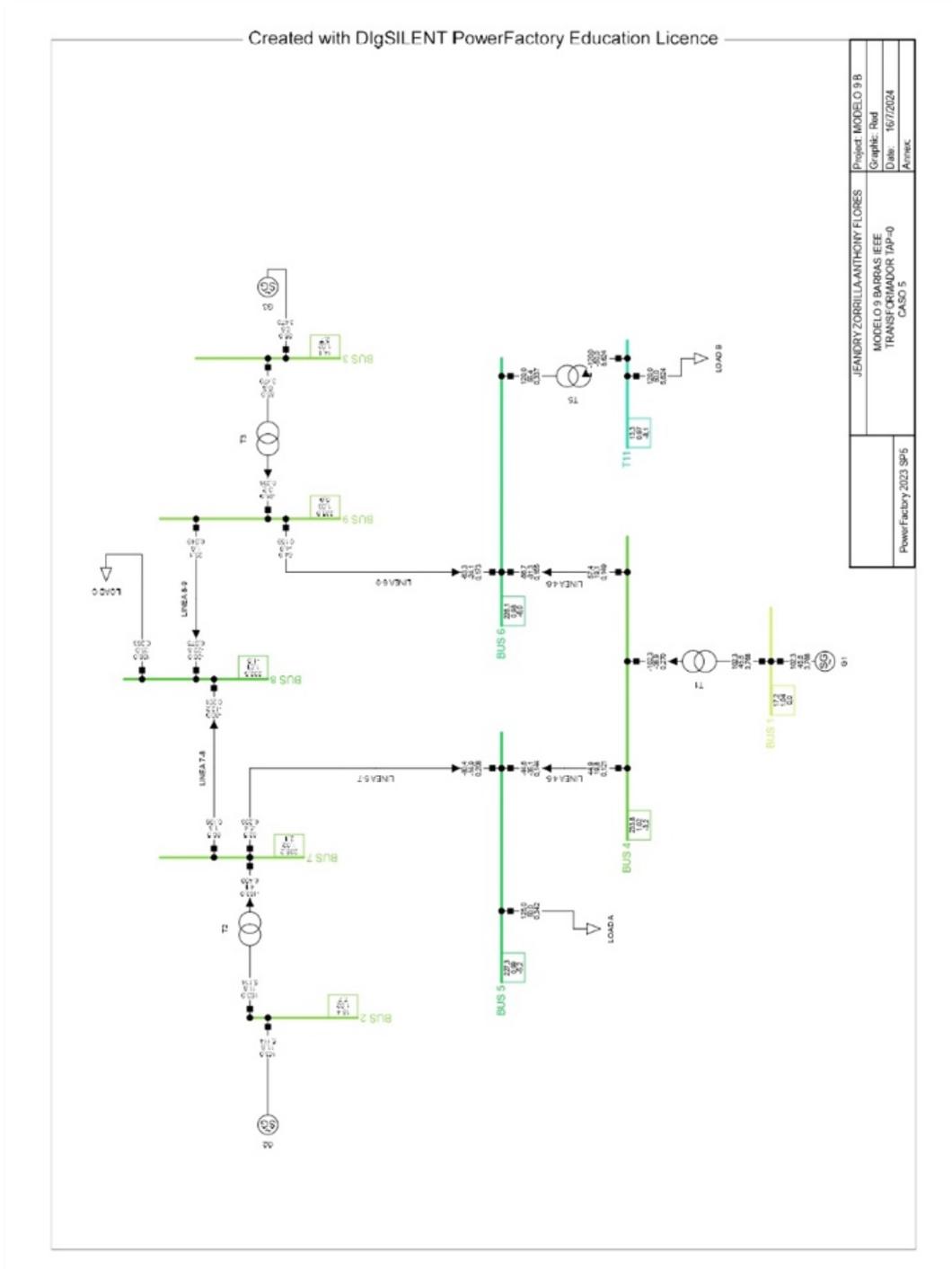
NUMERO DE ITERACIONES = 3							
Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected
			MW	Mvar	MW	Mvar	Mvar
1	1.040	0.000	0.000	0.000	97.136	41.761	0.000
2	1.025	7.741	0.000	0.000	163.000	15.213	0.000
3	1.025	3.362	0.000	0.000	85.000	-6.850	0.000
4	1.018	-3.028	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.975	-5.875	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	1.007	-4.696	90.000	30.000	0.000	0.000	0.000
7	1.021	2.152	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.012	-0.750	100.000	35.000	0.000	0.000	0.000
9	1.030	0.658	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	1.002	-8.648	150.000	60.000	0.000	0.000	0.000
Total			340.000	125.000	345.136	50.123	0.000

Grafico 3.28 Reporte en MATLAB aplicando transformador de tap=4
Adaptación; Autores

3.6.5 Caso 5

Modelo de sistema aplicando lo siguiente: Transformador con tap=0 y aumento en la carga B ubicada en la barra 10 conectada a la barra 6

En este caso se emplea el modelo del sistema de 9 barras - IEEE del Grafico 3.2 aplicando el transformador de taps en la carga B a una nueva barra 10 que se conecta a la barra 6, tal como se muestra en la Grafica 3.29.



Gráfica 3.29 Simulación del flujo de potencia en DIGSILENT caso 5 con 10 barras
Adaptación; Autores

Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT

En la Grafica 3.30 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en DIGSILENT donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.29. Sin cambios de taps.



Grafico 3.30 Reporte realizado en DIGSILENT caso 5
Adaptación; Autores

Cálculo del flujo de potencia mediante el software MATLAB

En la Grafica 3.31 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en MATLAB donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.29. Sin cambios de taps.

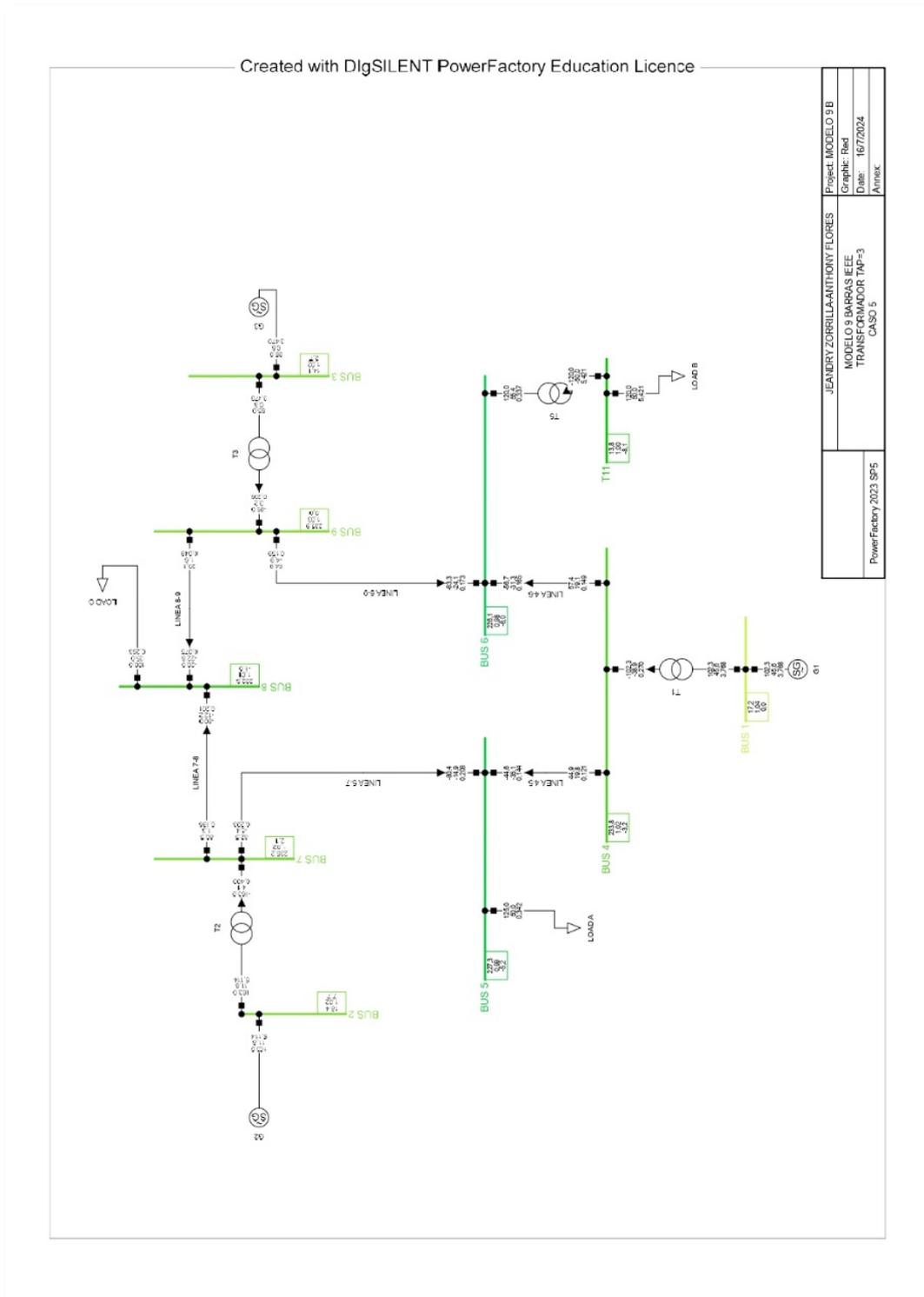
NUMERO DE ITERACIONES = 3

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load----- MW	Mvar	---Generation--- MW	Mvar	Injected Mvar
1	1.040	0.000	0.000	0.000	102.288	45.567	0.000
2	1.025	7.726	0.000	0.000	163.000	11.768	0.000
3	1.025	2.729	0.000	0.000	85.000	0.800	0.000
4	1.016	-3.195	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.988	-5.208	125.000	50.000	0.000	0.000	0.000
6	0.983	-5.958	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	1.023	2.149	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.011	-1.022	100.000	35.000	0.000	0.000	0.000
9	1.026	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.967	-8.128	120.000	50.000	0.000	0.000	0.000
Total			345.000	135.000	350.288	58.134	0.000

*Grafico 3.31 Reporte realizado en Matlab caso 5
Adaptación; Autores*

Modelo de sistema aplicando lo siguiente: Transformador con tap=3 y aumento en la carga B de 120MW-50MVA ubicada en la barra 10 conetacta a la barra 5

En este caso se emplea el modelo del sistema de 9 barras modificado del Grafico 3.29 aplicando el transformador de taps en la carga B de la barra 10 que se conecta a la barra 5 dando un valor de 4 al taps, tal como se muestra en la Grafico 3.31.



*Gráfica 3.32 Simulación con 10 barras con transformador de tap
Adaptación; Autores*

Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT

En la Grafica 3.32 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en DIGSILENT donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.31. Con cambios de taps.



Gráfico 3.33 Reporte en DIGSILENT aplicando transformador de tap=3
Adaptación; Autores

Cálculo del flujo de potencia mediante el software MATLAB

En la Grafica 3. se muestra resultado del flujo de potencia realizado en MATLAB donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.31. Sin cambios de taps.

NUMERO DE ITERACIONES = 3							
Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.040	0.000	0.000	0.000	102.288	45.567	0.000
2	1.025	7.726	0.000	0.000	163.000	11.768	0.000
3	1.025	2.729	0.000	0.000	85.000	0.800	0.000
4	1.016	-3.195	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.988	-5.208	125.000	50.000	0.000	0.000	0.000
6	0.983	-5.958	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	1.023	2.149	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.011	-1.022	100.000	35.000	0.000	0.000	0.000
9	1.026	0.014	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	1.003	-8.128	120.000	50.000	0.000	0.000	0.000
Total			345.000	135.000	350.288	58.134	0.000

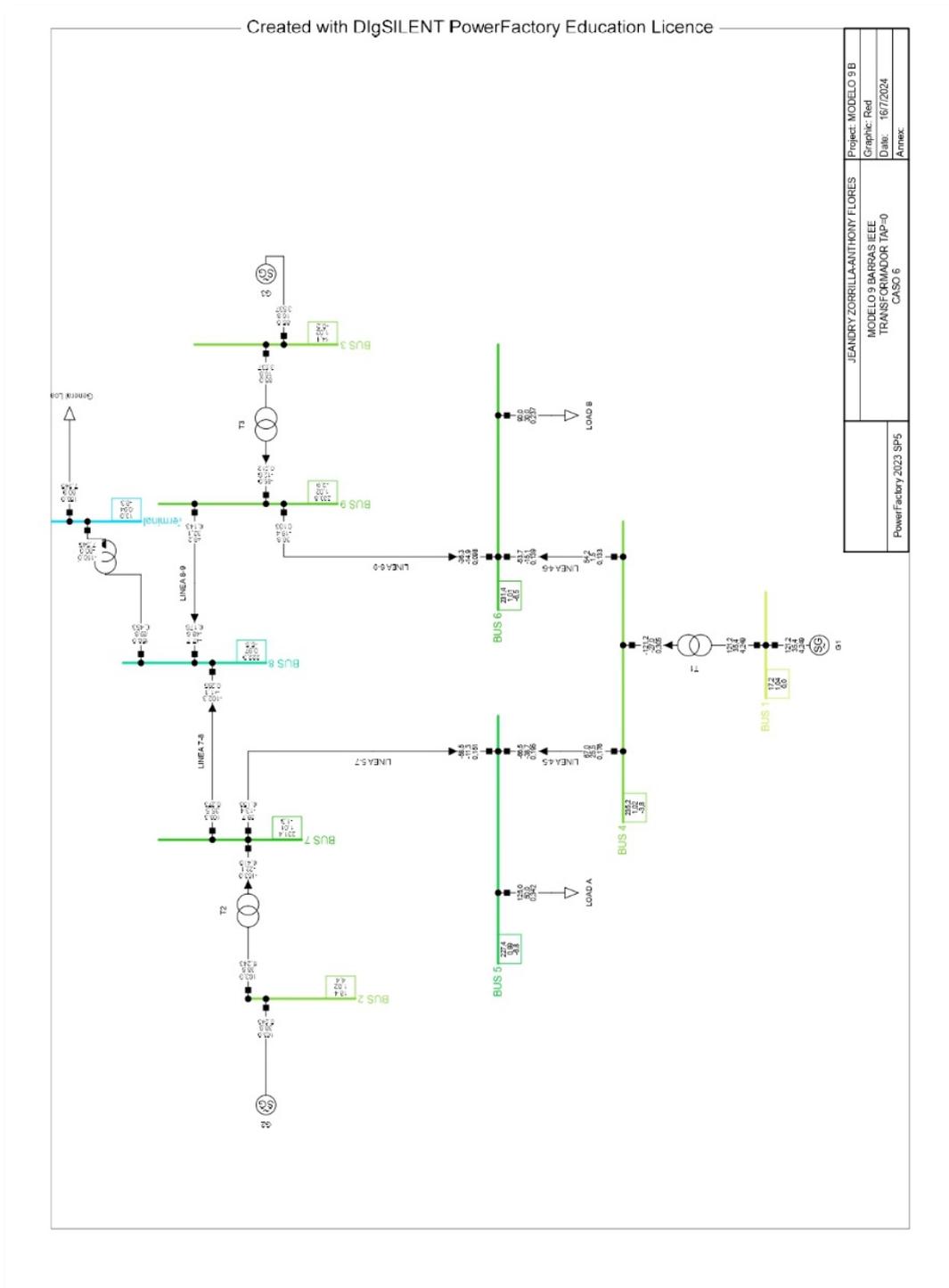
Gráfico 3.34 Reporte en MATLAB aplicando transformador de tap=3
Adaptación; Autores

3.6.6 Caso 6

Modelo de sistema aplicando lo siguiente: Transformador con tap=0 y aumento en la carga C ubicada en la barra 10 conectada a la barra 8

En este caso se emplea el modelo del sistema de 9 barras - IEEE del Grafico 3.2 aplicando el transformador de taps en la carga A a una nueva barra 10 que se conecta a la barra 8,

tal como se muestra en la Grafica 3.34.



Gráfica 3.35 Simulación del flujo de potencia en DIGSILENT caso 6 con 10 barras
Adaptación; Autor

Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT

En la Grafica 3.35 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en DIGSILENT donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.34. Sin cambios de taps.

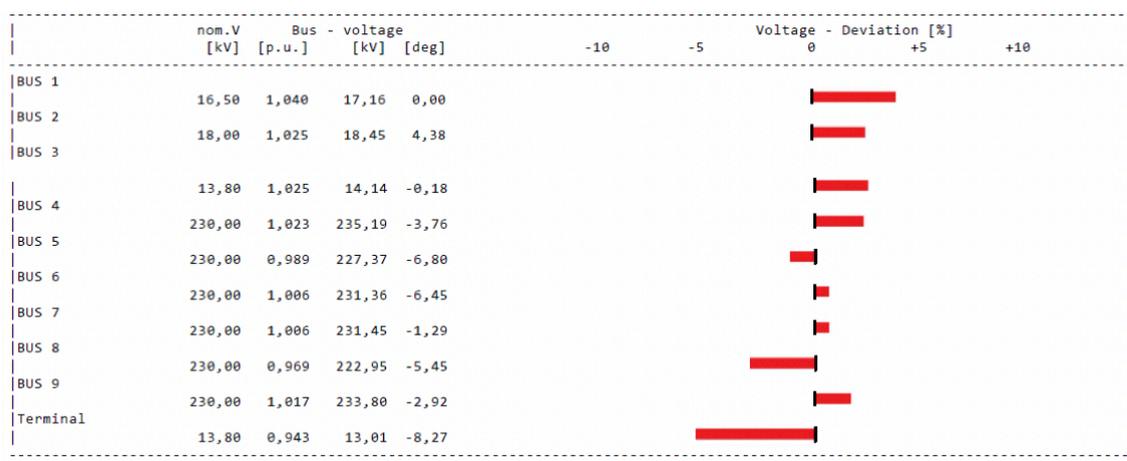


Gráfico 3.36 Reporte realizado en DIGSILENT caso 6
Adaptación; Autores

Cálculo del flujo de potencia mediante el software MATLAB

En la Grafica 3.36 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en MATLAB donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.34. Sin cambios de taps.

NUMERO DE ITERACIONES = 3

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load----- MW	Mvar	---Generation--- MW	Mvar	Injected Mvar
1	1.040	0.000	0.000	0.000	121.206	35.447	0.000
2	1.025	4.375	0.000	0.000	163.000	38.750	0.000
3	1.025	-0.183	0.000	0.000	85.000	16.825	0.000
4	1.023	-3.764	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.989	-6.797	125.000	50.000	0.000	0.000	0.000
6	1.006	-6.451	90.000	30.000	0.000	0.000	0.000
7	1.006	-1.293	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.969	-5.452	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	1.017	-2.923	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.943	-8.275	150.000	80.000	0.000	0.000	0.000
Total			365.000	160.000	369.206	91.022	0.000

Gráfico 3.37 Reporte realizado en MATLAB caso 6
Adaptación; Autores

Modelo de sistema aplicando lo siguiente: Transformador con tap=5 y aumento en la carga C de 150MW-80MVA ubicada en la barra 10 conectado a la barra 8

En este caso se emplea el modelo del sistema de 9 barras modificado del Grafico 3.34 aplicando el transformador de taps en la carga C de la barra 10 que se conecta a la barra 8 dando un valor de 5 al taps, tal como se muestra en la Grafico 3.37.

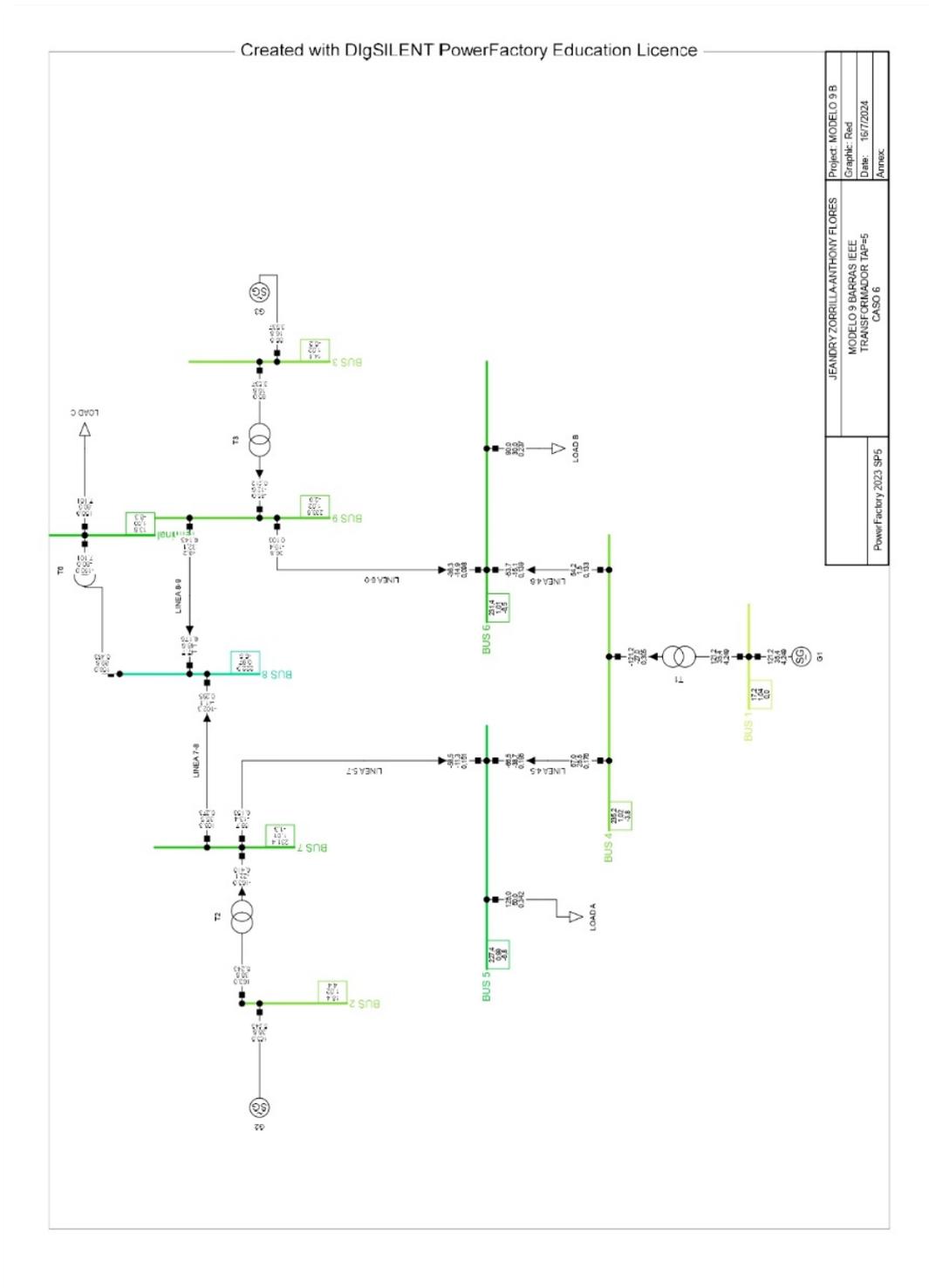


Gráfico 3.38 Simulación con 10 barras aplicando transformador de tap Adaptación; Autores

Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT

En la Grafica 3.38 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en DIGSILENT donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.37. Con cambios de taps.

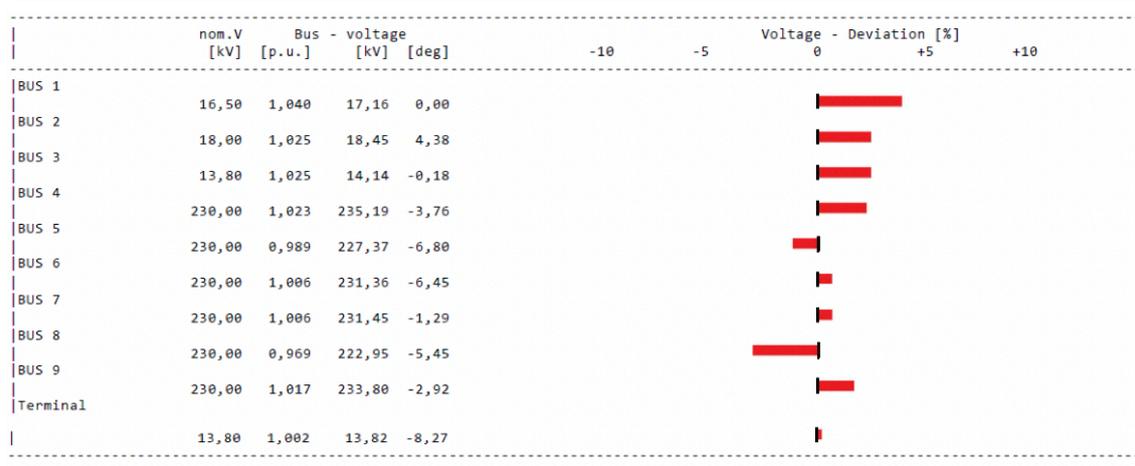


Gráfico 3.39 Reporte en DIGSILENT aplicando transformador de tap=5
Adaptación; Autores

Cálculo del flujo de potencia mediante el software MATLAB

En la Grafica 3.39 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en MATLAB donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 10 barras del Grafico 3.37. Sin cambios de taps.

NUMERO DE ITERACIONES = 3							
Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.040	0.000	0.000	0.000	121.206	35.447	0.000
2	1.025	4.375	0.000	0.000	163.000	38.751	0.000
3	1.025	-0.183	0.000	0.000	85.000	16.825	0.000
4	1.023	-3.764	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.989	-6.797	125.000	50.000	0.000	0.000	0.000
6	1.006	-6.451	90.000	30.000	0.000	0.000	0.000
7	1.006	-1.293	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	0.969	-5.452	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	1.017	-2.923	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	1.001	-8.275	150.000	80.000	0.000	0.000	0.000
Total			365.000	160.000	369.206	91.022	0.000

Gráfico 3.40 Reporte en MATLAB aplicando transformador de tap=5
Adaptación; Autores

3.6.7 Caso 7

Modelo de sistema aplicando lo siguiente: Transformador con tap=0 en la carga A-B-C de la barra 10-11-12

En este caso se emplea el modelo del sistema de 9 barras - IEEE del Grafico 3.2 aplicando el transformador de taps en la carga A, aumentando nuevas barras, siendo la barra 10 que

se conecta a la barra 5, la barra 11 conectada a la barra 6 y la barra 12 conectada a la barra 8, tal como se muestra en la Grafica 3.34.

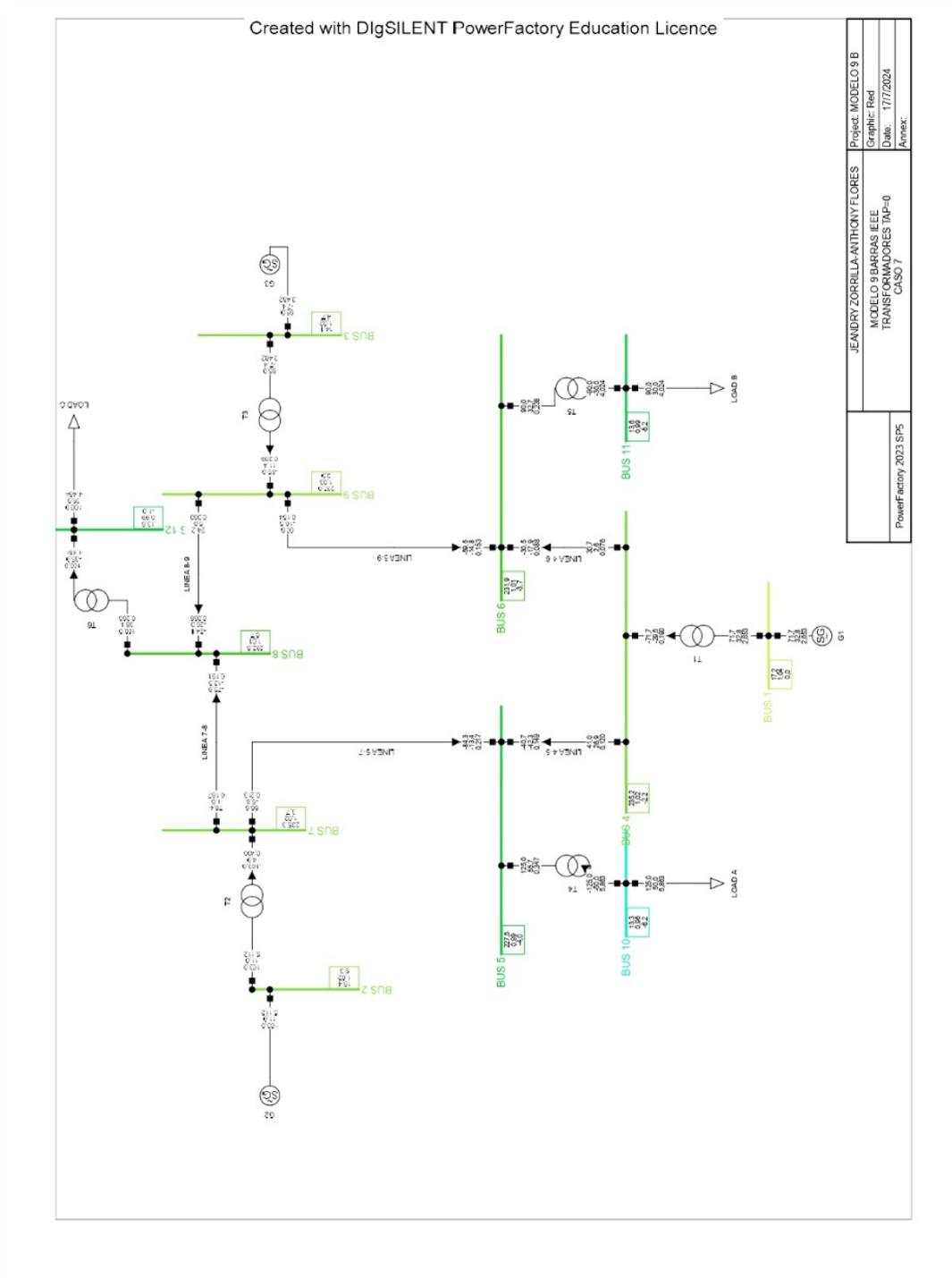


Gráfico 3.41 Simulación del flujo de potencia en DIGSILENT caso 7 con 10 barras
Adaptación; Autores

Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT

En la Grafica 3.41 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en DIGSILENT donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 12 barras del Grafico 3.40. Sin cambios de taps.

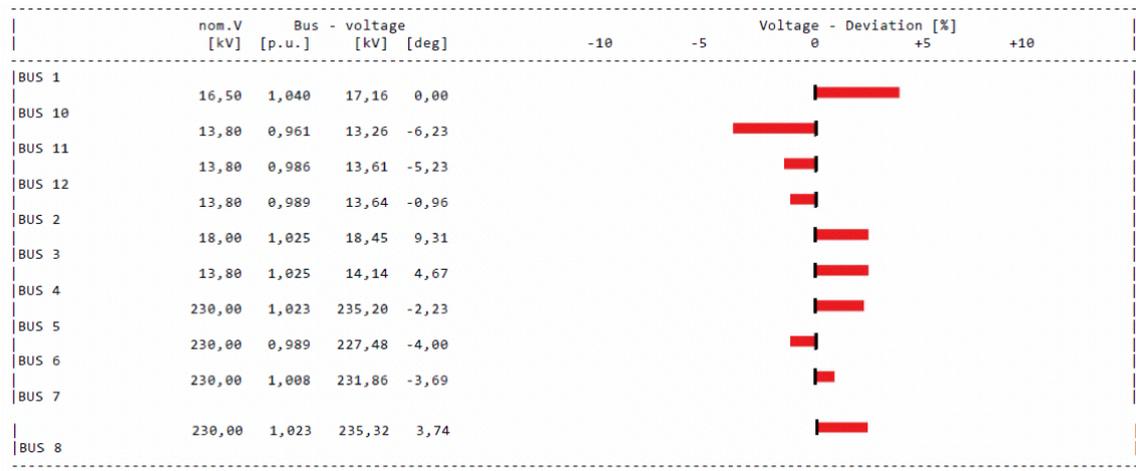


Gráfico 3.42 Reporte realizado en DIGSILENT caso 7
Adaptación; Autores

Cálculo del flujo de potencia mediante el software MATLAB

En la Grafica 3.42 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en MATLAB donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 12 barras del Grafico 3.40. Sin cambios de taps.

NUMERO DE ITERACIONES = 3							
Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.040	0.000	0.000	0.000	71.718	32.800	0.000
2	1.025	9.311	0.000	0.000	163.000	10.991	0.000
3	1.025	4.669	0.000	0.000	85.000	-7.375	0.000
4	1.023	-2.226	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.989	-3.997	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	1.008	-3.694	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	1.023	3.736	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.012	0.732	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	1.030	1.965	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.963	-6.230	125.000	50.000	0.000	0.000	0.000
11	0.989	-5.231	90.000	30.000	0.000	0.000	0.000
12	0.991	-0.965	100.000	35.000	0.000	0.000	0.000
Total			315.000	115.000	319.718	36.416	0.000

Gráfico 3.43 Reporte realizado en MATLAB caso 7
Adaptación; Autores

Modelo de sistema aplicando lo siguiente: Transformador con tap=3 en la carga A de la barra 10- Transformador con tap=1 en la carga B de la barra 11- Transformador con tap=1 en la carga C de la barra 12

En este caso se emplea el modelo del sistema de 9 barras modificado del Grafico 3.40

aplicando los transformadores de taps en las cargas A-B-C de la barra 10-11-12 que se conecta a la barra 5-6-8 respectivamente dando un valor de 3-1-1 al taps, tal como se muestra en la Grafico 3.43.

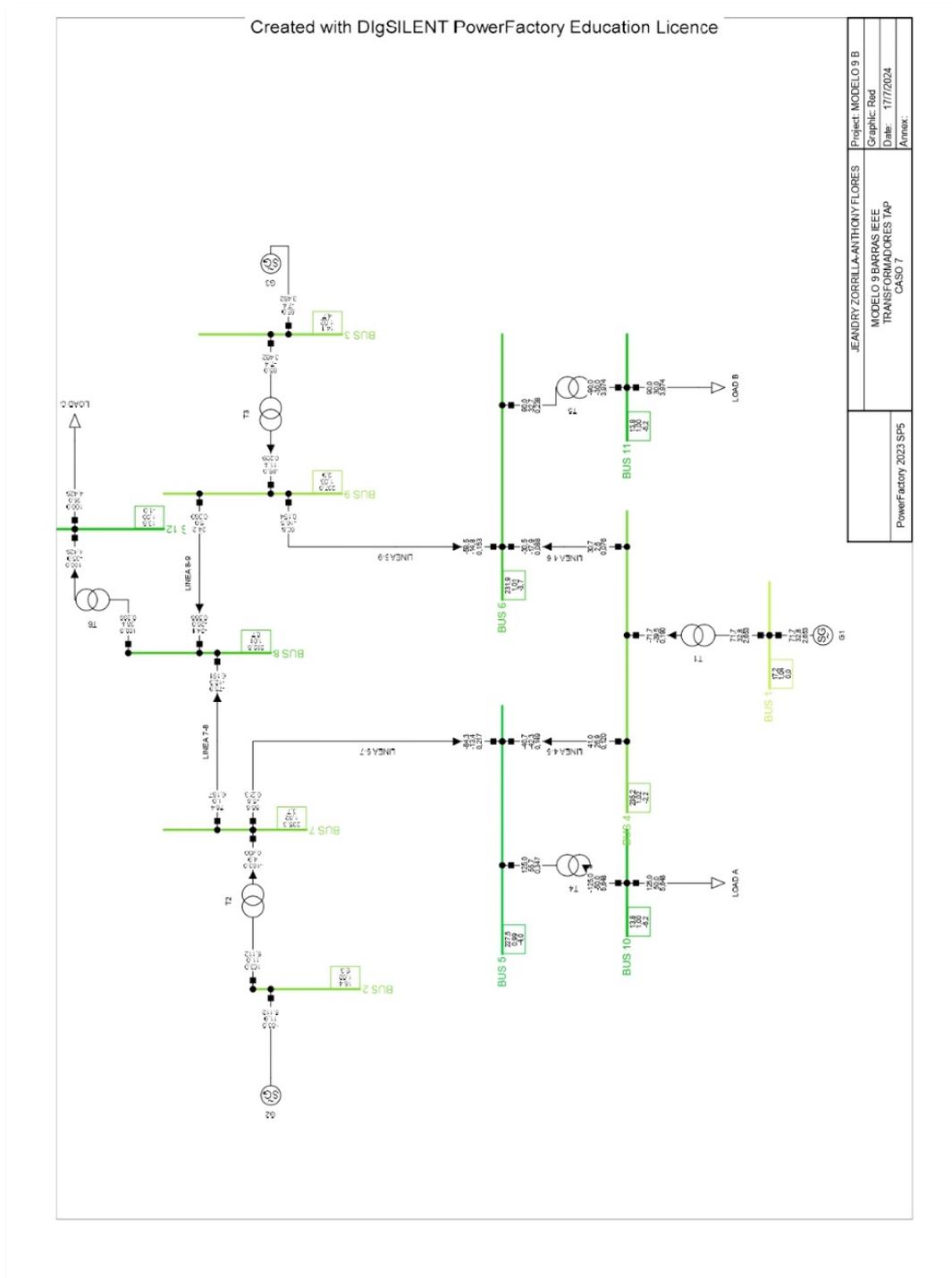


Gráfico 3.44 Simulación con 10 barras aplicando transformador de tap
Adaptación; Autores

Reporte del flujo de potencia en el software DIGSILENT

En la Grafica 3.44 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en DIGSILENT donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 12 barras del Grafico 3.43. Con

cambios de taps.

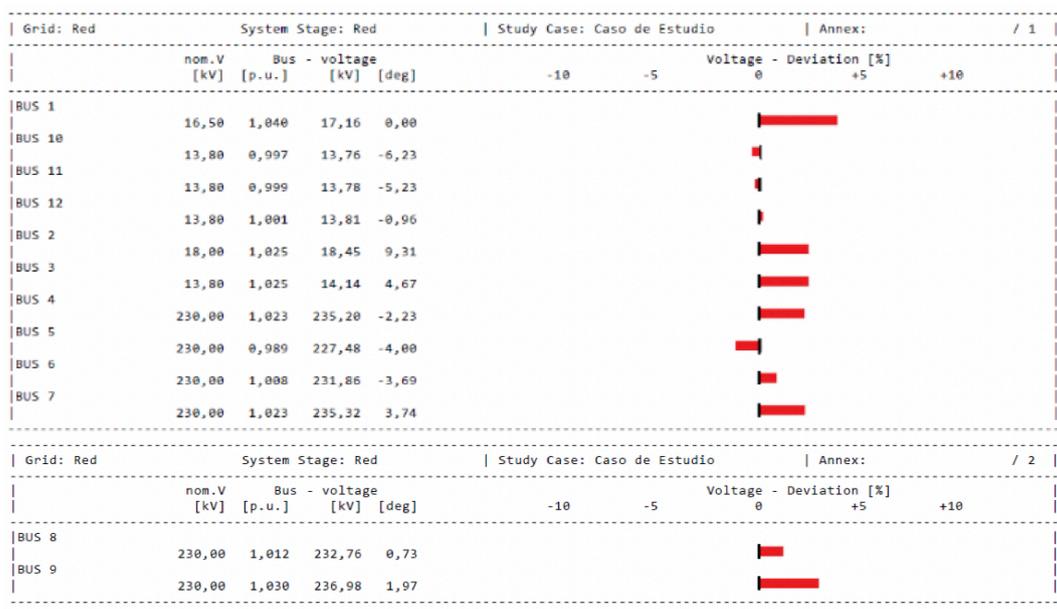


Gráfico 3.45 Reporte en DIGSILENT aplicando transformador de tap=3, tap=1, tap=1
Adaptación; Autores

Reporte del flujo de potencia en el software MATLAB

En la Grafica 3.45 se muestra resultado del flujo de potencia realizado en MATLAB donde se observa el sistema de 9 barra modificado a 12 barras del Grafico 3.43. Con cambios de taps.

NUMERO DE ITERACIONES = 3

Bus No.	Voltage Mag.	Angle Degree	-----Load-----		---Generation---		Injected Mvar
			MW	Mvar	MW	Mvar	
1	1.040	0.000	0.000	0.000	71.718	32.800	0.000
2	1.025	9.311	0.000	0.000	163.000	10.991	0.000
3	1.025	4.669	0.000	0.000	85.000	-7.375	0.000
4	1.023	-2.226	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5	0.989	-3.997	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6	1.008	-3.694	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7	1.023	3.736	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8	1.012	0.732	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9	1.030	1.965	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.997	-6.230	125.000	50.000	0.000	0.000	0.000
11	0.999	-5.231	90.000	30.000	0.000	0.000	0.000
12	1.001	-0.965	100.000	35.000	0.000	0.000	0.000
Total			315.000	115.000	319.718	36.417	0.000

Gráfico 3.46 Reporte en MATLAB aplicando transformador de tap=3, tap=1, tap=1
Adaptación; Autores

CAPÍTULO IV

4.1 ANÁLISIS Y RESULTADOS

Como resultado de la aplicación exhaustiva del modelo matemático existente en el sistema planteado, se logra determinar con precisión el valor del voltaje al ejercer un efecto específico sobre el tap de los transformadores. Este enfoque metodológico permite una evaluación rigurosa de las variables involucradas, facilitando así la compensación efectiva de la caída de voltaje en las barras del sistema eléctrico, en las cuales se implementa un control estratégico frente a las perturbaciones originadas por las cargas variables.

En el caso de estudio específico, los transformadores seleccionados para llevar a cabo el control son aquellos que se encuentran en las secciones entre las barras 5-10, 6-11 y 8-12, según lo establecido en el diagrama unifilar propuesto para cada escenario de análisis. Estos transformadores han sido elegidos en función de su capacidad para influir en las condiciones de voltaje en las barras mencionadas, optimizando así la compensación necesaria para mantener el equilibrio y la eficiencia del sistema eléctrico.

El diagrama unifilar propuesto en cada caso presenta una representación gráfica detallada del sistema, incluyendo todos los componentes eléctricos relevantes, tales como líneas de transmisión, transformadores, interruptores y barras. Este diagrama sirve como una herramienta esencial para la planificación y ejecución de las estrategias de control de voltaje, permitiendo una visión clara de las interconexiones y las rutas de flujo de energía en el sistema.

A través del análisis del diagrama unifilar y la aplicación del modelo matemático, se puede realizar una evaluación de las posibles estrategias de ajuste de voltaje, maximizando la estabilidad operativa del sistema frente a diversas perturbaciones y asegurando que el sistema eléctrico funcione dentro de los parámetros de diseño especificados.

4.2 CASO DE ESTUDIO

El sistema de prueba ilustrado en el gráfico 3.1 permite determinar inicialmente el flujo de potencia bajo condiciones normales. Se examinan siete escenarios, descritos a continuación, considerando los transformadores habilitados para ajustar sus taps.

Caso 1: Aplicación del transformador de taps en la carga A de 125MW-50MVAR ubicado entre la barra 5-10 ejerciendo control en la barra 10. Como se muestra sin perturbación en la Tabla 8 y con perturbación en la Tabla 9.

Caso 2: Aplicación del transformador de taps en la carga B de 90MW-30MVAR ubicado entre la barra 6-10 ejerciendo control en la barra 10. Como se muestra sin perturbación en la Tabla 10 y con perturbación en la Tabla 11.

Caso 3: Aplicación del transformador de taps en la carga c de 100MW-35MVAR ubicado entre la barra 8-10 ejerciendo control en la barra 10. Como se muestra sin perturbación en la Tabla 12 y con perturbación en la Tabla 13.

Caso 4: Aplicación del transformador de taps en la carga A de 150MW-60MVAR ubicado entre la barra 5-10 ejerciendo control en la barra 10. Como se muestra sin perturbación en la Tabla 14 y con perturbación en la Tabla 15.

Caso 5: Aplicación del transformador de taps en la carga B de 120MW-50MVAR ubicado entre la barra 6-10 ejerciendo control en la barra 10. Como se muestra sin perturbación en la Tabla 16 y con perturbación en la Tabla 17.

Caso 6: Aplicación del transformador de taps en la carga C de 150MW-80MVAR ubicado entre la barra 8-10 ejerciendo control en la barra 12. Como se muestra sin perturbación en la Tabla 18 y con perturbación en la Tabla 19.

Caso 7: Aplicación del transformador de taps en la carga A de 125MW-50MVAR ubicado entre la barra 5-10 ejerciendo control en la barra 10. En la carga B de 90MW-30MVAR ubicado entre la barra 6-11 ejerciendo control en la barra 11. En la carga C de

100MW-35MVAR ubicado entre la barra 8-12 ejerciendo control en la barra 12. Como se muestra sin perturbación en la Tabla 20 y con perturbación en la Tabla 21.

Desde el Grafico 4.1 hasta el Grafico 4.7 se presentan los resultados del perfil de voltaje, mostrando el flujo de potencia inicial mediante el método de Newton-Raphson explicado en el Capítulo 2 y 3, etiquetado como -SIN PERTURBACIÓN-, que utiliza los datos iniciales del sistema de prueba. Estos resultados se comparan con la aplicación del control de voltaje en alguna de las barras mencionado anteriormente, designado en las gráficas como -CON PERTURBACIÓN- para cada caso.

4.3 RESULTADOS

El objetivo del presente trabajo al realizar el modelamiento del transformador con cambiador de taps es ajustar el valor del tap de tal forma que se logre conseguir que la magnitud de voltaje en la barra de conexión del transformador sea lo cercano a su valor nominal. Este ajuste tiene como objetivo principal mejorar la estabilidad del sistema eléctrico frente a las perturbaciones continuas y diversas que resultan de las fluctuaciones en las cargas. El modelado se enfoca en el análisis minucioso de cómo el cambiador de taps puede ser en algunos casos utilizado de forma eficaz para regular el voltaje y, en consecuencia, optimizar el rendimiento general del sistema de potencia.

Para alcanzar este objetivo, se recurre al método de Newton-Raphson para realizar un análisis del flujo de potencia en el sistema eléctrico. Este método es ampliamente reconocido por su capacidad para resolver problemas no lineales mediante un proceso iterativo que ajusta las estimaciones del voltaje y la potencia hasta obtener una solución precisa para el flujo de potencia del sistema bajo condiciones iniciales predefinidas.

En el estudio, se exponen los resultados obtenidos a partir de las simulaciones de flujo de potencia, comenzando con las condiciones iniciales del sistema y evaluando el impacto del control de los taps del transformador en la magnitud del voltaje en las barras de conexión. Estos resultados son presentados de manera detallada para cada escenario específico, ilustrando cómo los ajustes en el valor del tap afectan el voltaje en las barras y contribuyen a la mejora de la estabilidad del sistema.

Se considera que el valor del tap en su estado neutro es 0, lo que establece una configuración de referencia para las simulaciones realizadas. A partir de esta configuración neutra, se exploran diversas modificaciones del tap para observar su

influencia en el sistema y evaluar la eficacia del control del voltaje en la compensación de las caídas provocadas por las variaciones de carga. El análisis se centra en comparar los resultados del flujo de potencia antes y después de los ajustes en el tap, con el fin de identificar las configuraciones óptimas que aseguren un funcionamiento estable y eficiente del sistema eléctrico.

Caso 1:

Aplicación del transformador de taps en la carga A de 125MW-50MVAR ubicado entre la barra 5-10 ejerciendo control en la barra 10. Mostrado en la Tabla 6 los valores en condiciones inicial.

*Tabla 6 Valores en condición inicial caso 1
Adaptación; Autores*

Barra	V.n pu	Angulo	Control	Tap
1	1.040	0	No	0
2	1.025	9.29	No	0
3	1.025	4.66	No	0
4	1.024	-2.22	No	-
5	0.990	-3.99	No	-
6	1.011	-3.70	No	-
7	1.024	3.81	No	-
8	1.015	0.72	No	-
9	1.032	1.96	No	-
10	0.962	-6.22	No	0

Al ajustar la magnitud del voltaje en la barra 5-10, y se controla específicamente en la barra 10, se presentan a continuación en la Tabla 7 los valores de los taps del transformador correspondiente y las magnitudes de voltaje:

Tabla 7 Magnitud de voltaje con tap aplicado en la barra 10 caso 1
Adaptación; Autores

Barra	V.n pu	Angulo	Control	Tap
1	1.040	0	No	0
2	1.025	9.28	No	0
3	1.025	4.65	No	0
4	1.024	-2.223	No	-
5	0.990	-3.989	No	-
6	1.011	-3.701	No	-
7	1.024	3.72	No	-
8	1.015	0.72	No	-
9	1.032	1.956	No	-
10	1	-6.217	Si	3

En base a los valores arrojados. Se indica que en la barra 10 se fija el valor deseado, observando un incremento de 0.038 con respecto al valor inicial tomando en cuenta el diagrama modificado a 10 barras. Como se muestra en el grafico 4.1.

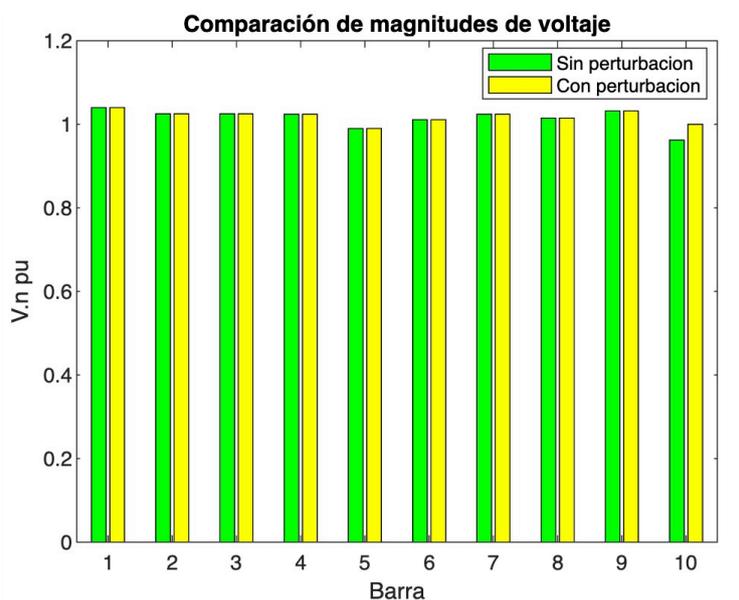


Gráfico 4.1 Magnitudes en gráficos ejerciendo el control en la barra 10
Adaptación; Autores

Caso 2:

Aplicación del transformador de taps en la carga B de 90MW-30MVAR ubicado entre la barra 6-10 ejerciendo control en la barra 10. Siendo estos mostrados en la Tabla 8.

*Tabla 8 Valores en condición inicial caso 2
Adaptación; Autores*

Barra	V.n pu	Angulo	Control	Tap
1	1.040	0	No	0
2	1.025	9.279	No	0
3	1.025	4.666	No	0
4	1.025	-2.219	No	-
5	0.995	-3.995	No	-
6	1.010	-3.679	No	-
7	1.025	3.718	No	-
8	1.015	0.725	No	-
9	1.032	1.967	No	-
11	0.988	-5.209	No	0

Al ajustar la magnitud del voltaje en la barra 6-10, y se controla específicamente en la barra 10, se presentan a continuación en la Tabla 9 los valores de los taps del transformador correspondiente y las magnitudes de voltaje:

*Tabla 9 Magnitud de voltaje con tap aplicado en la barra 11 caso 2
Adaptación; Autores*

Barra	V.n pu	Angulo	Control	Tap
1	1.040	0	No	0
2	1.025	9.279	No	0
3	1.025	4.666	No	0
4	1.025	-2.219	No	-
5	0.995	-3.995	No	-
6	1.010	-3.679	No	-
7	1.025	3.718	No	-
8	1.015	0.726	No	-
9	1.032	1.967	No	-
11	1.001	-5.209	Si	1

Teniendo el siguiente caso. Se indica que se realiza el control en la barra 10 y se fija el valor deseado, habiendo un incremento de 0.002, obteniendo una modificación pequeña con respecto al valor inicial tomando en cuenta el diagrama modificado a 10 barras.

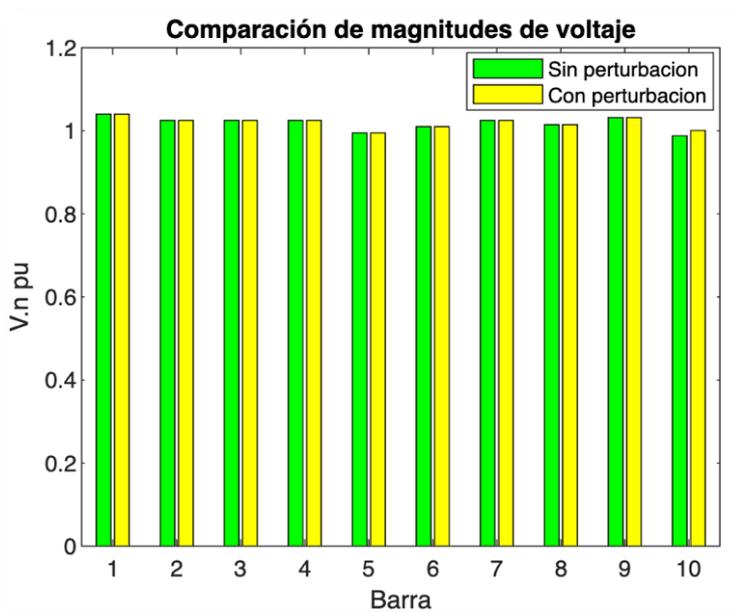


Gráfico 4.2 Magnitudes en gráficos ejerciendo el control en la barra 11
Adaptación; Autores

Caso 3:

Aplicación del transformador de taps en la carga c de 100MW-35MVAR ubicado entre la barra 8-10 ejerciendo control en la barra 10. Mostrado en la Tabla 10 valores en condiciones iniciales.

Tabla 10 Valores en condición inicial caso 3
Adaptación; Autores

Barra	V.n pu	Angulo	Control	Tap
1	1.040	0	No	0
2	1.025	9.302	No	0
3	1.025	4.676	No	0
4	1.025	-2.218	No	-
5	0.995	-3.990	No	-
6	1.012	-3.688	No	-
7	1.025	3.736	No	-
8	1.013	0.743	No	-
9	1.032	1.976	No	-
12	0.998	-0.949	No	0

De igual manera se ajusta la magnitud del voltaje en la barra 8-10, y se controla específicamente en la barra 10, se presentan a continuación en la Tabla 11 los valores de los taps del transformador correspondiente y las magnitudes de voltaje:

Tabla 11 Magnitud de voltaje con tap aplicado en la barra 12 caso 3 Adaptación; Autores

Barra	V.n pu	Angulo	Control	Tap
1	1.040	0	No	0
2	1.025	9.302	No	0
3	1.025	4.676	No	0
4	1.025	-2.18	No	-
5	0.995	-3.990	No	-
6	1.012	-3.688	No	-
7	1.025	3.736	No	-
8	1.013	0.743	No	-
9	1.032	1.976	No	-
12	1.003	-0.949	Si	1

En este caso, como se muestra en el Grafico 4.3, se lleva a cabo el control en la barra 10 y se observa un incremento de 0.005 en comparación con el valor inicial. Esto se debe a la modificación del diagrama de 10 barras, en el cual, para este caso, la barra se denomina 10 debido a su nueva posición. Como se muestra en el Grafico 4.3

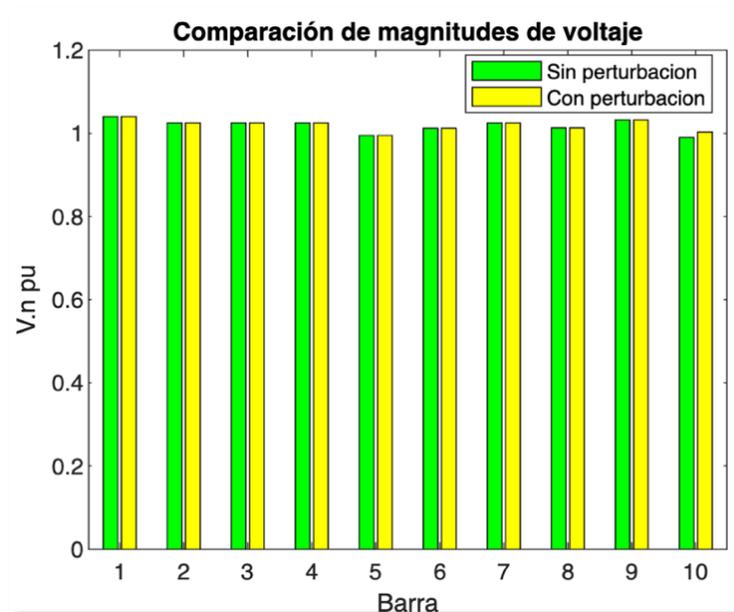


Gráfico 4.3 Magnitudes en gráficos ejerciendo el control en la barra 12 Adaptación; Autores

Caso 4:

Aplicación del transformador de taps en la carga A de 150MW-60MVAR ubicado entre la barra 5-10 ejerciendo control en la barra 10. Como se muestra en la Tabla 12 siendo esto los valores iniciales.

*Tabla 12 Valores en condición inicial caso 4
Adaptación; Autores*

Barra	V.n pu	Angulo	Control	Tap
1	1.040	0	No	0
2	1.025	7.741	No	0
3	1.025	3.362	No	0
4	1.018	-3.028	No	-
5	0.975	-5.875	No	-
6	1.007	-4.696	No	-
7	1.021	2.152	No	-
8	1.012	-0.750	No	-
9	1.030	0.658	No	-
10	0.955	-8.65	No	0

Se ajusta la magnitud del voltaje en la barra 5-10, y se controla específicamente en la barra 10, para esto se aumenta la carga y el tap, se presentan a continuación en la Tabla 13, los valores de los taps del transformador correspondiente y las magnitudes de voltaje:

*Tabla 13 Magnitud de voltaje con tap aplicado en la barra 10 caso 4
Adaptación; Autores*

Barra	V.n pu	Angulo	Control	Tap
1	1.040	0	No	0
2	1.025	7.741	No	0
3	1.025	3.362	No	0
4	1.018	-3.028	No	-
5	0.975	-5.875	No	-
6	1.007	-4.696	No	-
7	1.021	2.152	No	-
8	1.012	-0.750	No	-
9	1.030	0.658	No	-
10	1.002	-8.648	Si	4

En este caso, se lleva a cabo el control en la barra 10 y se observa un incremento de 0.059 con un tap de 4 en comparación con el valor inicial. Esto se debe a la modificación del diagrama 10 barras. Como se muestra en el Grafico 4.4

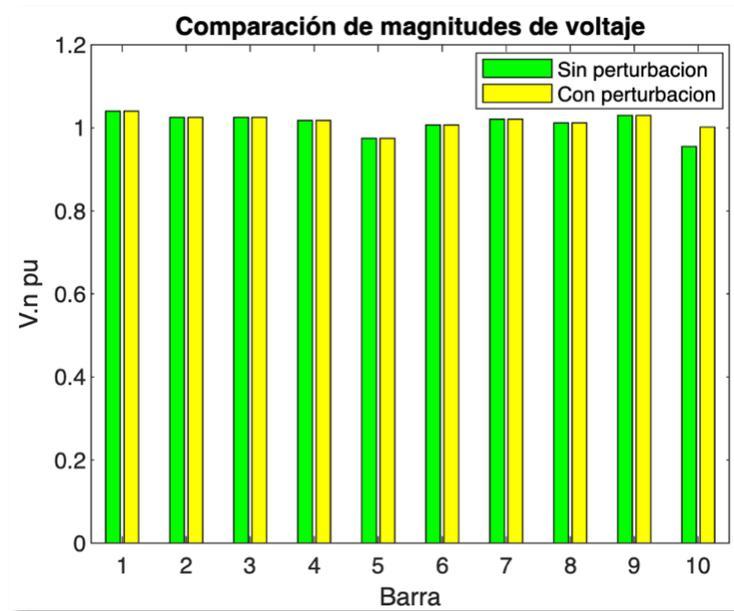


Gráfico 4.4 Magnitudes en gráficos ejerciendo el control en la barra 10
Adaptación; Autores

Caso 5:

Aplicación del transformador de taps en la carga B de 120MW-50MVAR ubicado entre la barra 6-10 ejerciendo control en la barra 10. Como se muestra en la Tabla 14 siendo esto los valores iniciales.

Tabla 14 Valores en condición inicial caso 5
Adaptación; Autores

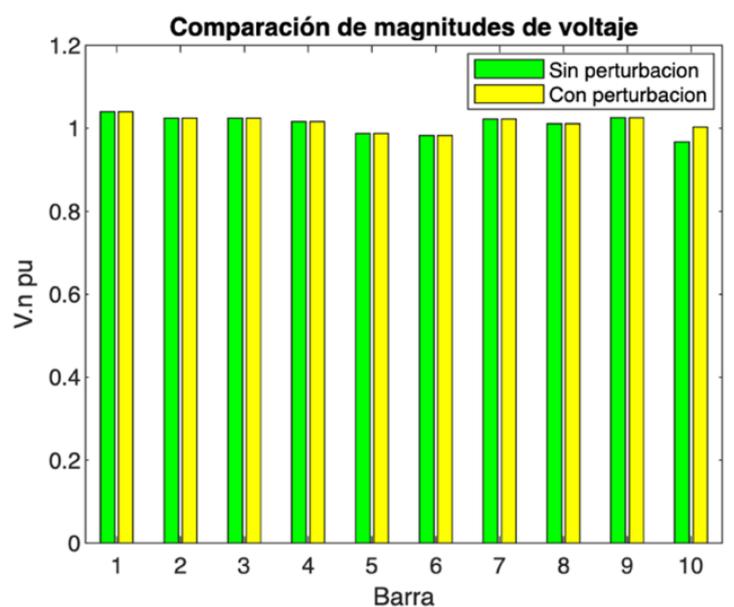
Barra	V.n pu	Angulo	Control	Tap
1	1.040	0	No	0
2	1.025	7.726	No	0
3	1.025	2.729	No	0
4	1.016	-3.195	No	-
5	0.988	-5.208	No	-
6	0.983	-5.958	No	-
7	1.023	2.149	No	-
8	1.011	-1.022	No	-
9	1.026	0.014	No	-
11	0.967	-8.218	No	0

La magnitud del voltaje se ajusta en la barra 6-10, con control específico en la barra 10. Para lograr esto, se incrementa la carga y se ajusta el tap del transformador. A continuación, en la Tabla 15, se detallan los valores de los taps del transformador correspondiente y las magnitudes de voltaje:

*Tabla 15 Magnitud de voltaje con tap aplicado en la barra 11 caso 5
Adaptación; Autores*

Barra	V.n pu	Angulo	Control	Tap
1	1.040	0	No	0
2	1.025	7.726	No	0
3	1.025	2.729	No	0
4	1.016	-3.195	No	-
5	0.988	-5.208	No	-
6	0.983	-5.958	No	-
7	1.023	2.149	No	-
8	1.011	-1.022	No	-
9	1.026	0.014	No	-
11	1.003	-8.128	Si	3

En esta situación como se observa en el Grafico 4.5, el control se lleva a cabo en la barra 10, donde se observa un aumento de 0.036 con un ajuste de tap de 3 en comparación con el valor inicial. Este cambio se debe a la modificación en el diagrama de 10 barras.



*Gráfico 4.5 Magnitudes en gráficos ejerciendo el control en la barra 11
Adaptación; Autores*

Caso 6:

Aplicación del transformador de taps en la carga C de 150MW-80MVAR ubicado entre la barra 8-10 ejerciendo control en la barra 10. Como se muestra en la Tabla 16.

*Tabla 16 Valores en condición inicial caso 6
Adaptación; Autores*

Barra	V.n pu	Angulo	Control	Tap
1	1.040	0	No	0
2	1.025	4.375	No	0
3	1.025	-0.183	No	0
4	1.023	-3.764	No	-
5	0.989	-6.797	No	-
6	1.006	-6.451	No	-
7	1.006	-1.293	No	-
8	0.969	-5.452	No	-
9	1.017	-2.923	No	-
12	0.943	-8.275	No	0

Se indica que se ajusta la magnitud del voltaje en la línea entre las barras 6 y 10, enfocándose especialmente en la barra 10. Para lograr esto, se aumenta la carga y se ajusta el tap del transformador. A continuación, en la Tabla 17, se presentan los valores de los taps del transformador correspondiente y las magnitudes de voltaje alcanzadas.

*Tabla 17 Magnitud de voltaje con tap aplicado en la barra 11 caso 6
Adaptación; Autores*

Barra	V.n pu	Angulo	Control	Tap
1	1.040	0	No	0
2	1.025	4.375	No	0
3	1.025	-0.183	No	0
4	1.023	-3.764	No	-
5	0.989	-6.797	No	-
6	1.006	-6.451	No	-
7	1.006	-1.293	No	-
8	0.969	-5.452	No	-
9	1.017	-2.923	No	-
12	1.001	-8.275	Si	5

En esta ocasión, el control se lleva a cabo en la barra 10, donde se observa un aumento de 0.058 con un ajuste de tap de 5 en comparación con el valor inicial. Este cambio se debe a la modificación en el diagrama de 10 barras, como se muestra en el Grafico 4.6.

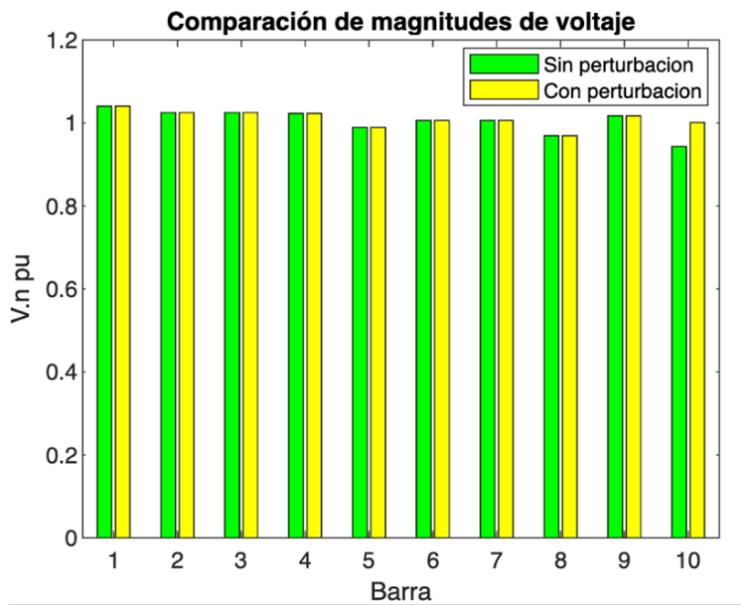


Gráfico 4.6 Magnitudes en gráficos ejerciendo el control en la barra 12
Adaptación; Autores

Caso 7:

Aplicación del transformador de taps en la carga A de 125MW-50MVAR ubicado entre la barra 5-10 ejerciendo control en la barra 10. En la carga B de 90MW-30MVAR ubicado entre la barra 6-11 ejerciendo control en la barra 11. En la carga C de 100MW-35MVAR ubicado entre la barra 8-12 ejerciendo control en la barra 12. Como se muestra en la Tabla 18.

*Tabla 18 Valores en condición inicial caso 7
Adaptación; Autores*

Barra	V.n pu	Angulo	Control	Tap
1	1.040	0	No	-
2	1.025	9.31	No	-
3	1.025	4.67	No	-
4	1.023	-2.23	No	-
5	0.989	-3.997	No	-
6	1.008	-3.694	No	-
7	1.023	3.736	No	-
8	1.012	0.732	No	-
9	1.030	1.965	No	-
10	0.963	-6.230	No	0
11	0.989	-5.231	No	0
12	0.991	-0.965	No	0

Para este caso, se utilizarán tres transformadores con ajuste de tap, que operarán simultáneamente en las barras indicadas. Adicional a esto le aumentaran 3 barras, uno para cada transformador. El ajuste de la magnitud del voltaje se realizará en las líneas entre las barras (6-11), (8-12) y (5-10), con un enfoque especial en las barras 10, 11 y 12. Para conseguir este ajuste, se aumentará la carga y se modificará el tap de los transformadores. En la tabla 19 se presentan los valores de los taps de los transformadores correspondientes y las magnitudes de voltaje obtenidas.

Tabla 19 Magnitud de voltaje con tap aplicado en la barra 10,11,12 caso 7
Adaptación; Autores

Barra	V.n pu	Angulo	Control	Tap
1	1.040	0	No	-
2	1.025	9.31	No	-
3	1.025	4.67	No	-
4	1.023	-2.23	No	-
5	0.989	-4.0	No	-
6	1.008	-3.69	No	-
7	1.023	3.74	No	-
8	1.012	0.73	No	-
9	1.030	1.97	No	-
10	0.997	-6.230	Si	3
11	0.999	-5.231	Si	1
12	1.001	-0.965	Si	1

En esta ocasión, el control se lleva a cabo en las barras 10-11-12, donde se observa un aumento de 0.034, 0.01, 0.01 correspondiente, con un ajuste de tap de 3 en la barra 10, tap 1 en la barra 11 y 12, en comparación con el valor inicial. Este cambio se debe a la modificación en el diagrama de 12 barras, tomando como referencia las barras 10,11,12. Como se muestra en el Grafico 4.7.

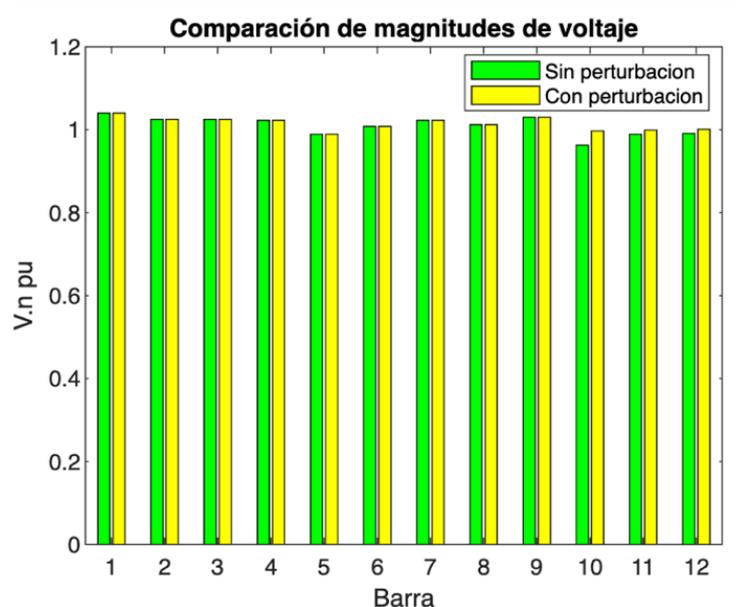


Gráfico 4.7 Magnitudes en gráficos ejerciendo el control en la barra 10,11,12
Adaptación; Autores

5. CONCLUSIONES

El estudio realizado ha incluido una revisión detallada de cómo los cambiadores de taps en los transformadores afectan el sistema. Mediante el uso de simulación para la resolución del flujo de potencia, obteniendo el valor de los perfiles de voltaje en las barras del sistema eléctrico donde se planea implementar el control.

- El análisis de los diferentes casos de estudio ha revelado que las variaciones en la carga afectan significativamente los perfiles de voltaje en las barras del Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) como se muestra desde las gráficas 4.1 al 4.7. En particular, bajo condiciones de alta carga, los niveles de voltaje disminuyen notablemente en las barras conectadas a las cargas, debido a la caída de tensión a lo largo de las líneas de transmisión y la resistencia del sistema.
- Al observar el método de variación de taps en transformadores permite ajustar el voltaje de manera precisa, incluso en situaciones de alta demanda como se puede observar en los casos 4,5 y 6, lo cual es crucial para mantener un suministro eléctrico constante y fiable en sistemas con variaciones de carga. La eficacia del método de ajuste de voltaje con transformadores de tap variable depende de las características del transformador, como el número de taps disponibles y el tamaño de los incrementos porcentuales. Si estas características son limitadas, el ajuste de voltaje podría no ser suficiente, lo que puede requerir soluciones adicionales. Por lo tanto, es crucial evaluar estas características y el sistema en su totalidad antes de depender únicamente de este método.
- Al evaluar la estrategia matemática propuesta, que en este caso implica el uso del método iterativo de Newton-Raphson implementado en MATLAB, se concluye que ha demostrado ser altamente preciso para el análisis del flujo de potencia. La adaptación del método para incluir los datos de los taps de los transformadores ha aumentado su relevancia y utilidad en el proyecto, convirtiéndolo en una herramienta indispensable para el análisis detallado del sistema eléctrico.
- Los resultados obtenidos muestran que la implementación de transformadores de tap variable puede efectivamente compensar las variaciones de voltaje y mejorar la estabilidad de la red de distribución. Las simulaciones confirmaron que, al ajustar los tapones de los transformadores en respuesta a las fluctuaciones de carga y otros factores, se puede mantener el voltaje dentro de los límites aceptables y evitar caídas de tensión que podrían afectar el suministro eléctrico.

6. RECOMENDACIONES

- Se sugiere realizar un análisis de distribución de carga detallado. Este análisis permitirá identificar y redistribuir las cargas de manera más equilibrada a través del sistema, lo que puede reducir las caídas de voltaje locales y mejorar la eficiencia general del sistema.
- Para optimizar el análisis del método iterativo de Newton-Raphson, se recomienda emplear una variedad de programas de simulación. Este enfoque proporciona una base más sólida para validar y mejorar la precisión del análisis matemático. El objetivo es permitir una comparación más completa y precisa de los datos, asegurando que el método sea fiable y efectivo en diferentes contextos.
- Se sugiere la Implementación de una estrategia matemática para determinar el valor óptimo de los taps del transformador, lo que permitirá la regulación automática del voltaje y mejorará la estabilidad y eficiencia del sistema eléctrico.
- Se recomienda la sincronización con otros dispositivos de protección, es decir la coordinación de los ajustes de los transformadores de tap variable con otros dispositivos de protección y control en la red, tales como: los reguladores de voltaje y sistemas de compensación reactiva, para generar una estabilidad general mas confiable y efectiva

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] X. Li, Z. Li, L. Guan, L. Zhu, and F. Liu, "Review on Transient Voltage Stability of Power System," in *iSPEC 2020 - Proceedings: IEEE Sustainable Power and Energy Conference: Energy Transition and Energy Internet*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Nov. 2020, pp. 940–947. doi: 10.1109/iSPEC50848.2020.9351059.
- [2] C. C. Liu and F. F. Wu, "Steady-state voltage stability regions of power systems," *Syst Control Lett*, vol. 6, no. 1, pp. 23–31, Jun. 1985, doi: 10.1016/0167-6911(85)90049-0.
- [3] "MATLAB - El lenguaje del cálculo técnico." Accessed: May 18, 2024. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>
- [4] D. E. Jimenez Bacca *et al.*, "Solicitud de evaluación."
- [5] A. Ymeri, L. Dervishi, and A. Qorolli, "Impacts of distributed generation in energy losses and voltage drop in 10 kV line in the distribution system," in *ENERGYCON 2014 - IEEE International Energy Conference*, IEEE Computer Society, 2014, pp. 1315–1319. doi: 10.1109/ENERGYCON.2014.6850593.
- [6] M. Alberto Ríos Estudiante de Doctorado, A. M. Torres Profesor Dpto, and M. Teresa de Torres, "El análisis modal del voltaje se."
- [7] "¿Qué es Matlab y para qué sirve? - Formadores IT." Accessed: May 18, 2024. [Online]. Available: <https://formadoresit.es/que-es-matlab-y-para-que-sirve/>
- [8] "PowerFactory - DIGSILENT." Accessed: May 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>
- [9] "ETAP | Solución de gestión de la energía | Plataforma gemela digital eléctrica." Accessed: May 18, 2024. [Online]. Available: <https://etap.com/es>
- [10] A. Tiranuchit and R. J. Thomas, "A POSTURING STRATEGY AGAINST VOLTAGE INSTABILITIES IN ELECTRIC POWER SYSTEMS," 1988.
- [11] P. Powerflow, S. Simulations, and S. P. Arabi Kundur, "A VERSATILE FACTS DEVICE MODEL FOR," 1996.
- [12] P. Rao, M. L. Crow, and Z. Yang, "STATCOM Control for Power System Voltage Control Applications," 2000.
- [13] C. Dai, Y. Baghzouz, and S. Member, "Impact of Distributed Generation on Voltage Regulation by LTC Transformer," 2004.
- [14] U. Datta and M. S. Rahman, "MATHEMATICAL MODELLING OF A TRANSFORMER WITH TAPS AT BOTH WINDING IN THE POSITIVE-SEQUENCE POWER FLOW."
- [15] M. Constantin, M. Eremia, and L. Toma, "Comparative analysis between conventional voltage control using reactors and continuous voltage control using TCR in the Romanian Transmission Grid."
- [16] "Secondary Voltage Control Enhancing power system voltage profile".
- [17] S. Kilyeni, A. Kilyeni, M. Biriescu, and C. Barbulescu, *Optimizing Intensive Automatic Voltage Regulator parameters*. IEEE, 2009.
- [18] S. Chatterjee and V. Mukherjee, "Comparative performance analysis of classical controllers for automatic voltage regulator."
- [19] F. Manuel and H. Acevedo, "Voltaje, corriente y potencia eléctrica."
- [20] "Capítulo 3. DIGSILENT PowerFactory 3.1 Introducción."
- [21] P. Pruvot, C. Launay, Y. Harmand, and I. Member, "AN IMPROVED VOLTAGE CONTROL ON LARGESCALE POWER SYSTEM," 1996.
- [22] "aplicación del programa del diseño de líneas de transmisión".
- [23] D. P. Kothari *et al.*, "MODERN POWER SYSTEM ANALYSIS 3 rd Edition Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited NEW DELHI McGraw-Hill Offices."
- [24] "Power-System-Stability-and-Control-by-Prabha-Kundur".
- [25] "HOJA DE DATOS Transformador de Poder en Aceite."
- [26] P. Rivera, A. E. Oleas, and C. A. Barrera, *Control De Voltaje En Sistemas Eléctricos De Potencia Usando Transformadores Con Taps*. 2019.

- [27] “newton Raphson power flow - File Exchange - MATLAB Central.” Accessed: Jul. 30, 2024. [Online]. Available: <https://la.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/44463-newton-raphson-power-flow?focused=3803137&tab=function>
- [28] “Flujo de potencia en el Sistema de 9 barras”, Accessed: Aug. 09, 2024. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://fglongatt.org/OLD/Reportes/RPT2007-14.pdf>

8. ANEXOS

```

CÁLCULO DEL FLUJO DE POTENCIA

basemva=100; tolerancia =0.0001; maxiter=100;
%Se ingresan datos de los Buses donde:
% Columna 1      Columna 2      columnas 3-4
% #de BUS Tipo de Bus      3 - magnitud de voltaje/4 - angulo de fase

Columnas 5-6      Columnas 7-8
5 - carga MW /6 - carga MVARs  7 - MW generados/  8 - MVARs generados

Columna 9-10      Columna 11
9 - MW (min y max)/ 10- MVARs (min y max)  MVARs inyectados-shunt capacitor

%      0 - bus de carga
%      1 - bus de referencia
%      2 - bus de voltaje controlado
busdata = [ 1 1 1.04 0.0 0 0.0 0 0.0 0 0.0 0 0.0 0;
            2 2 1.025 0.0 0 0.0 163 0.0 0 0.0 0;
            3 2 1.025 0.0 0 0.0 85 0.0 0 0.0 0;
            4 0 1.00 0.0 0 0.0 0.0 0.0 0 0.0 0;
            5 0 1.00 0.0 125 50 0.0 0.0 0 0.0 0;
            6 0 1.00 0.0 90 30 0.0 0.0 0 0.0 0;
            7 0 1.00 0.0 0 0.0 0.0 0.0 0 0.0 0;
            8 0 1.00 0.0 100 35 0.0 0.0 0 0.0 0;
            9 0 1.00 0.0 0 0.0 0.0 0.0 0 0.0 0];
%Se ingresan los parametros de las lineas:
% Columna 1-2
%
% bus(p)a bus(q) 0 - bus de carga /1 - bus de referencia/ 2 - bus de voltaje
controlado
columnas 3-5
%3 - Resistencia pu
%4 - Reactancia pu
%5 - 1/2 admitancia en derivacion
%Columnas 6
%datos de tap de transformador

linedata = [ 1 4 0.0 0.0576 0.0 1;
            4 5 0.010 0.085 0.088 1;
            4 6 0.017 0.092 0.079 1;
            5 7 0.032 0.161 0.153 1;
            6 9 0.039 0.170 0.179 1;
            2 7 0.0 0.0625 0.0 1;
            3 9 0.0 0.0586 0.0 1;
            7 8 0.0085 0.072 0.0745 1;
            8 9 0.0119 0.1008 0.1045 1];

% PROGRAMA PARA CONTRUCCION DE YBUS
% Copyright (c) 1998 by H. Saadat
j=sqrt(-1); i = sqrt(-1);
nl = linedata(:,1); nr = linedata(:,2); R = linedata(:,3);
X = linedata(:,4); Bc = j*linedata(:,5); a = linedata(:, 6);
nbr=length(linedata(:,1)); nbus = max(max(nl), max(nr));
Z = R + j*X; y= ones(nbr,1)./Z; %ADMITANCIA DE RAMAL
for n = 1:nbr
if a(n) <= 0 a(n) = 1; else
end
Ybus=zeros(nbus,nbus); % SE INICIA PARA YBUS CERO

```

Gráfico 8.1 Código de flujo de potencia parte A [27]
Adaptación; Autores

```

                                % FORMACION DE LOS ELEMENTOS FUERA DE LA DIAGONAL
for k=1:nbr
    Ybus(nl(k),nr(k))=Ybus(nl(k),nr(k))-y(k)/a(k);
    Ybus(nr(k),nl(k))=Ybus(nl(k),nr(k));
end
end

                                % FORMACION DE LOS ELEMENTOS DE LA DIAGONAL
for n=1:nbus
    for k=1:nbr
        if nl(k)==n
            Ybus(n,n) = Ybus(n,n)+y(k)/(a(k)^2) + Bc(k);
        elseif nr(k)==n
            Ybus(n,n) = Ybus(n,n)+y(k) +Bc(k);
        else, end
    end
end
clear Pgg
% PROGRAMA PARA ANALISIS DE FLUJOS DE POTENCIA POR NEWTON-RAPHSON
ns=0; ng=0; Vm=0; delta=0; yload=0; deltad=0;
nbus = length(busdata(:,1));
kb=[];Vm=[]; delta=[]; Pd=[]; Qd=[]; Pg=[]; Qg=[]; Qmin=[]; Qmax=[];
Pk=[]; P=[]; Qk=[]; Q=[]; S=[]; V=[];
for k=1:nbus
    n=busdata(k,1);
    kb(n)=busdata(k,2); Vm(n)=busdata(k,3); delta(n)=busdata(k, 4);
    Pd(n)=busdata(k,5); Qd(n)=busdata(k,6); Pg(n)=busdata(k,7); Qg(n) =
    busdata(k,8);
    Qmin(n)=busdata(k, 9); Qmax(n)=busdata(k, 10);
    Qsh(n)=busdata(k, 11);
    if Vm(n) <= 0 Vm(n) = 1.0; V(n) = 1 + j*0;
    else delta(n) = pi/180*delta(n);
        V(n) = Vm(n)*(cos(delta(n)) + j*sin(delta(n)));
        P(n)=(Pg(n)-Pd(n))/basemva;
        Q(n)=(Qg(n)-Qd(n)+ Qsh(n))/basemva;
        S(n) = P(n) + j*Q(n);
    end
end
for k=1:nbus
if kb(k) == 1, ns = ns+1; else, end
if kb(k) == 2 ng = ng+1; else, end
ngs(k) = ng;
nss(k) = ns;
end
Ym=abs(Ybus); t = angle(Ybus);
m=2*nbus-ng-2*ns;
maxerror = 1; converge=1;
iter = -1;
%%% PARA LINEAS EN PARALELO
mline=ones(nbr,1);
for k=1:nbr
    for m=k+1:nbr
        if((nl(k)==nl(m)) & (nr(k)==nr(m)));
            mline(m)=2;
        elseif ((nl(k)==nr(m)) & (nr(k)==nl(m)));
            mline(m)=2;
        else, end
    end
end
end
%%% FIN

```

Gráfico 8.2 Código de flujo de potencia parte B [27]
Adaptación; Autores

```

% INICIO DE ITERACIONES
clear A DC J DX
while maxerror >= tolerancia & iter <= maxiter % COMPARACION DEL RESULTADO
CON LA TOLERANCIA
for ii=1:m
for k=1:m
    A(ii,k)=0; %CONTRUCCION DE JACOBIANO
end
end
iter = iter+1;
for n=1:nbus
nn=n-nss(n);
lm=nbus+n-ngs(n)-nss(n)-ns;
J11=0; J22=0; J33=0; J44=0;
    for ii=1:nbr
        if mline(ii)==1
            if nl(ii) == n | nr(ii) == n
                if nl(ii) == n , l = nr(ii);
                end
                if nr(ii) == n , l = nl(ii);
                end
                J11=J11+ Vm(n)*Vm(l)*Ym(n,l)*sin(t(n,l)- delta(n) + delta(l));
                J33=J33+ Vm(n)*Vm(l)*Ym(n,l)*cos(t(n,l)- delta(n) + delta(l));
                if kb(n)~=1
                    J22=J22+ Vm(l)*Ym(n,l)*cos(t(n,l)- delta(n) + delta(l));
                    J44=J44+ Vm(l)*Ym(n,l)*sin(t(n,l)- delta(n) + delta(l));
                else
                    end
                    if kb(n) ~= 1 & kb(l) ~=1
                        lk = nbus+l-ngs(l)-nss(l)-ns;
                        ll = l -nss(l);
                        % ELEMENTOS FUERA DE LA DIAGONAL J1
                        A(nn, ll) =-Vm(n)*Vm(l)*Ym(n,l)*sin(t(n,l)-
delta(n) + delta(l));
                        if kb(l) == 0 % ELEMENTOS FUERA DE LA DIAGONAL J2
                        A(nn, lk) =Vm(n)*Ym(n,l)*cos(t(n,l)- delta(n) +
delta(l));end
                        if kb(n) == 0 % ELEMENTOS FUERA DE LA DIAGONAL J3
                        A(lm, ll) =-Vm(n)*Vm(l)*Ym(n,l)*cos(t(n,l)-
delta(n)+delta(l)); end
                        if kb(n) == 0 & kb(l) == 0 % ELEMENTOS FUERA DE LA
DIAGONAL J4
                        A(lm, lk) =-Vm(n)*Ym(n,l)*sin(t(n,l)- delta(n) +
delta(l));end
                    else
                        end
                    else
                        end
                end
            else
                end
            end
        end
        PK = Vm(n)^2*Ym(n,n)*cos(t(n,n))+J33;
        Qk = -Vm(n)^2*Ym(n,n)*sin(t(n,n))-J11;
        if kb(n) == 1 P(n)=Pk; Q(n) = Qk; end % BUS DE REFERENCIA P
        if kb(n) == 2 Q(n)=Qk;
            if Qmax(n) ~= 0
                Qgc = Q(n)*basemva + Qd(n) - Qsh(n);
                if iter <= 7 % ENTRE LA 2DA Y 7MA ITERACION
                    if iter > 2 % MVARS DEL BUS DE GENERACION

```

Gráfico 8.3 Código de flujo de potencia parte C [27]
Adaptación; Autores

```

V(m)          if Qgc < Qmin(n)      % EXAMINA DENTRO DE LOS LIMITES DE
              Vm(n) = Vm(n) + 0.01; %
              elseif Qgc > Qmax(n) % DENTRO DE PARAMETROS
              Vm(n) = Vm(n) - 0.01;
              end % ESPECIFICACION DE LIMITES
              else
              end
              else
              end
              else
              end
              end
              if kb(n) ~= 1
              A(nn,nn) = J11; %ELEMETOS DE LA DIAGONAL DEL JACOBIANO J1
              DC(nn) = P(n)-Pk;
              end
              if kb(n) == 0
              A(nn,lm) = 2*Vm(n)*Ym(n,n)*cos(t(n,n))+J22; %ELEMETOS DE LA DIAGONAL
DEL JACOBIANO J2
              A(lm,nn)= J33; %ELEMETOS DE LA DIAGONAL DEL JACOBIANO J3
              A(lm,lm) =-2*Vm(n)*Ym(n,n)*sin(t(n,n))-J44; %ELEMETOS DE LA DIAGONAL
DEL JACOBIANO J4
              DC(lm) = Q(n)-Qk;
              end
              end
DX=A\DC';
for n=1:nbus
  nn=n-nss(n);
  lm=nbus+n-ngs(n)-nss(n)-ns;
  if kb(n) ~= 1
  delta(n) = delta(n)+DX(nn); end
  if kb(n) == 0
  Vm(n)=Vm(n)+DX(lm); end
end
maxerror=max(abs(DC));
if iter == maxiter & maxerror > accuracy
fprintf('\nCUIDADO: LA SOLUCION ITERATIVA NO CONVERGE DESPUES ')
fprintf('%g', iter), fprintf(' ITERACIONES.\n\n')
fprintf('PRESIONA ENTER PARA TERMINAR LAS ITERACIONES Y MOSTRAR LOS
RESULTADOS \n')
converge = 0; pause, else, end

end
if converge ~= 1
tech= (' ITERATIVE SOLUTION DID NOT CONVERGE'); else
tech=(' SOLUCION DE FLUJO DE POTENCIA POR EL METODO DE NEWTON-
RAPHSON');
end
V = Vm.*cos(delta)+j*Vm.*sin(delta);
deltad=180/pi*delta;
i=sqrt(-1);
k=0;
for n = 1:nbus
  if kb(n) == 1
  k=k+1;
  S(n)= P(n)+j*Q(n);
  Pg(n) = P(n)*basemva + Pd(n);
  Qg(n) = Q(n)*basemva + Qd(n) - Qsh(n);

```

Gráfico 8.4 Código de flujo de potencia parte D [27]
Adaptación; Autores

```

    Pgg(k)=Pg(n);
    Qgg(k)=Qg(n);
    elseif kb(n) ==2
        k=k+1;
        S(n)=P(n)+j*Q(n);
        Qg(n) = Q(n)*basemva + Qd(n) - Qsh(n);
        Pgg(k)=Pg(n);
        Qgg(k)=Qg(n);
    end
yload(n) = (Pd(n)- j*Qd(n)+j*Qsh(n))/(basemva*Vm(n)^2);
end
busdata(:,3)=Vm'; busdata(:,4)=deltad';
Pgt = sum(Pg); Qgt = sum(Qg); Pdt = sum(Pd); Qdt = sum(Qd); Qsht = sum(Qsh);
% EL PROGRAMA MUESTRA LOS RESULTADOS EN FORMA TABULADA
% SOBRE LA PANTALLA.
%
% Copyright (C) 1998 by H. Saadat.
%clc
disp(tech)
fprintf('                Error = %g \n', maxerror)
fprintf('                NUMERO DE ITERACIONES = %g \n\n', iter)
head =['      Bus Voltage Angle  -----Load-----  ---Generation---
Injected'
      '      No. Mag. Degree MW Mvar MW Mvar
Mvar '
      '
      '];
disp(head)
for n=1:nbus
    fprintf(' %5g', n), fprintf(' %7.3f', Vm(n)),
    fprintf(' %8.3f', deltax(n)), fprintf(' %9.3f', Pd(n)),
    fprintf(' %9.3f', Qd(n)), fprintf(' %9.3f', Pg(n)),
    fprintf(' %9.3f', Qg(n)), fprintf(' %8.3f\n', Qsh(n))
end
    fprintf('          \n'), fprintf(' Total          ')
    fprintf(' %9.3f', Pdt), fprintf(' %9.3f', Qdt),
    fprintf(' %9.3f', Pgt), fprintf(' %9.3f', Qgt), fprintf(' %9.3f\n\n',
Qsht)
% ESTE PROGRAMA ES UTILIZADO CONJUNTO A lfgauss O lf Newton
% PARA EL COMPUTO DE LAS PERDIDAS EN LAS LINEAS Y EL FLUJO EN LAS LINEAS
%
% Copyright (c) 1998 H. Saadat
SLT = 0;
fprintf('\n')
fprintf('                Flujos y Perdidas en la Linea \n\n')
fprintf('      --Line-- Power at bus & line flow  --Line loss--
Transformer\n')
fprintf('      from to MW Mvar MVA MW Mvar
tap\n')
for n = 1:nbus
busprt = 0;
    for L = 1:nbr;
        if busprt == 0
            fprintf(' \n'), fprintf('%6g', n), fprintf(' %9.3f',
P(n)*basemva)
            fprintf('%9.3f', Q(n)*basemva), fprintf('%9.3f\n', abs(S(n)*basemva))
            busprt = 1;
        else, end
        if n1(L)==n k = nr(L);

```

Gráfico 8.5 Código de flujo de potencia parte E [27]
Adaptación; Autores

```

In = (V(n) - a(L)*V(k))*y(L)/a(L)^2 + Bc(L)/a(L)^2*V(n);
Ik = (V(k) - V(n)/a(L))*y(L) + Bc(L)*V(k);
Snk = V(n)*conj(In)*basemva;
Skn = V(k)*conj(Ik)*basemva;
SL = Snk + Skn;
SLT = SLT + SL;
elseif nr(L)==n k = n1(L);
In = (V(n) - V(k)/a(L))*y(L) + Bc(L)*V(n);
Ik = (V(k) - a(L)*V(n))*y(L)/a(L)^2 + Bc(L)/a(L)^2*V(k);
Snk = V(n)*conj(In)*basemva;
Skn = V(k)*conj(Ik)*basemva;
SL = Snk + Skn;
SLT = SLT + SL;
else, end
    if n1(L)==n | nr(L)==n
        fprintf('%12g', k),
        fprintf('%9.3f', real(Snk)), fprintf('%9.3f', imag(Snk))
        fprintf('%9.3f', abs(Snk)),
        fprintf('%9.3f', real(SL)),
        if n1(L) ==n & a(L) ~= 1
            fprintf('%9.3f', imag(SL)), fprintf('%9.3f\n', a(L))
        else, fprintf('%9.3f\n', imag(SL))
        end
    else, end
end
end
SLT = SLT/2;
fprintf(' \n'), fprintf(' PERRIDAS TOTALES ')
fprintf('%9.3f', real(SLT)), fprintf('%9.3f\n', imag(SLT))
clear Ik In SL SLT Skn Snk

```

Gráfico 8.6 Código de flujo de potencia parte F [27]
Adaptación; Autores