



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO PARA OPTIMIZAR LA DISTRIBUCIÓN
MEDIANTE PROGRAMACIÓN ENTERA MIXTA Y MODELO CÓNICO DE SEGUNDO
ORDEN”**

**PROYECTO DE TITULACIÓN PRESENTADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR:

Harry Alexander Herrera Miranda

TUTOR:

Ing. MSc. Luigi Orlando Freire Martínez

LATACUNGA – ECUADOR

2024



DECLARACIÓN DE AUDITORÍA

Yo, **HERRERA MIRANDA HARRY ALEXANDER** con **C.C: 1804857801**, declaro ser autor del presente proyecto de Investigación: **“SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO PARA OPTIMIZAR LA DISTRIBUCIÓN MEDIANTE PROGRAMACIÓN ENTERA MIXTA Y MODELO CÓNICO DE SEGUNDO ORDEN”**, siendo el **Ing. MSc. Luigi Orlando Freire Martínez** el tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo Investigativo, son de nuestra exclusiva responsabilidad.

Atentamente,

Herrera Miranda Harry Alexander

C.C. 1804857801



AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de Tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

“SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO PARA OPTIMIZAR LA DISTRIBUCIÓN MEDIANTE PROGRAMACIÓN ENTERA MIXTA Y MODELO CÓNICO DE SEGUNDO ORDEN”, de **Herrera Miranda Harry Alexander** de la carrera de Ingeniería en Electricidad, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Agosto, 2024

.....
Ing. Luigi Orlando Freire Martínez Ms.C

C.C. 0502529589



APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**; por cuanto, el postulante: **Harry Alexander Herrera Miranda** con el título de Proyecto de titulación: **“SIMULACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO PARA OPTIMIZAR LA DISTRIBUCIÓN MEDIANTE PROGRAMACIÓN ENTERA MIXTA Y MODELO CÓNICO DE SEGUNDO ORDEN”** han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, Agosto 2024

Para constancia firman:

Firma

Ing. Salazar Achig Edgar Roberto, Msc.

C.C. 050284761-9

LECTOR 1(PRESIDENTE)

Firma

Ing. Jiménez Jiménez Diego Leonardo, Msc.

C.C. 050349370-2

LECTOR 2 (MIEMBRO)

Firma

Ing. Castillo Fiallos Jessica Nataly, Msc.

C.C. 060459021-6

LECTOR 3 (MIEMBRO)



DEDICATORIA

"Dedico el presente trabajo a mis padres Teresa Miranda e Iban Herrera, y a mi hermana Andreina Herrera, por apoyarme incondicionalmente y saber guiarme de la mejor manera tanto en la parte moral como económica durante mi estancia académica universitaria."

Harry Alexander Herrera Miranda

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme la fortaleza y sabiduría para alcanzar este logro. A mis padres, Teresa Miranda e Iban Herrera, y a mi hermana, Andreina Herrera, por su apoyo incondicional y por ser mi inspiración en cada paso de este camino.

A mi tutor, Ing. MSc. Luigi Orlando Freire Martínez, por su orientación y paciencia a lo largo de esta investigación. Gracias por confiar en mí y por guiarme con sabiduría.

A Jadira Tibanlombo, mi persona especial, por su amor y apoyo constante, por estar a mi lado en los momentos más difíciles y ser mi fuente de alegría y motivación.

A mis profesores y compañeros de la carrera de Ingeniería en Electricidad, y a todas aquellas personas que contribuyeron de alguna manera a la culminación de este trabajo, les expreso mi más sincero agradecimiento.

*Este logro es fruto del esfuerzo y apoyo de todos ustedes.
¡Gracias de todo corazón!*

Harry Alexander Herrera Miranda

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

Título: “Simulación del sistema eléctrico para optimizar la distribución mediante programación entera mixta y modelo cónico de segundo orden”.

Autor: Herrera Miranda Harry Alexander

Tutor: Luigi Orlando Freire Martínez Ing. MSc.

RESUMEN

En el campo de la reconfiguración óptima de los sistemas eléctricos de distribución (SED), se ha adoptado un enfoque literario que facilita la linealización de los modelos, al permitir el uso de la programación cónica de segundo orden. Esta técnica busca resolver el problema no lineal entero mixto y disminuir las pérdidas de potencia activa (PA) y reactiva (PR), a fin de mejorar la eficiencia y confiabilidad del sistema. Este requiere de un desarrollo computacional debido a la complejidad del modelo. El modelo de reconfiguración no lineal del SED se basa en el estado de operación en régimen permanente y en las ecuaciones de los seccionadores. Además, utiliza un enfoque mixto y convexo para garantizar una solución óptima e incorporan restricciones como el balance de potencia, límites de voltaje y corriente, y radialidad del sistema. Las ecuaciones del modelo se implementan en Python y utilizan librerías como Pandas, Pyomo y Matplotlib cuyo propósito es manejar grandes cantidades de datos, realizar la modelización y resolución del problema no lineal entero mixto (PNLEM), y facilitar la visualización gráfica. Esta combinación simplifica el desarrollo de modelos complejos y mejora la eficiencia y precisión en la obtención de soluciones óptimas.

Palabras clave: modelo cónico, reconfiguración óptima, programación entera mixta, sistemas eléctricos.

UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

THEME: “Optimal reconfiguration of electrical distribution systems using mixed integer programming and a second-order cone model”.

Autor: Herrera Miranda Harry Alexander

Tutor: Luigi Orlando Freire Martínez Ing. MSc.

ABSTRACT

In the field of optimal reconfiguration of electrical distribution systems (EDS), a literary approach has been adopted that facilitates the linearization of the models, allowing the use of second-order conical programming. This technique seeks to solve the mixed integer nonlinear problem and reduce active (PA) and reactive power (PR) losses, improving the efficiency and reliability of the system. This requires computational development due to the complexity of the model. The nonlinear reconfiguration model of the SED is based on the steady-state operating state and the equations of the disconnectors. Furthermore, it uses a mixed and convex approach to ensure an optimal solution, incorporating constraints such as power balance, voltage and current limits, and system radiality. The model equations are implemented in Python, using libraries such as Pandas, Pyomo and Matplotlib whose purpose is to handle large amounts of data, perform the modeling and resolution of the nonlinear mixed integer problem (PNLEM), and facilitate graphical visualization. This combination simplifies the development of complex models and improves efficiency and precision in obtaining optimal solutions.

Keyword: conical model, optimal reconfiguration, mixed integer programming, electrical systems.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y
APLICADAS

CARRERA DE ELECTRICIDAD

Nombre del estudiante:

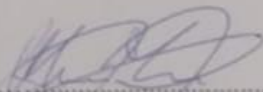
HERRERA MIRANDA HARRY ALEXANDER

AVAL DE TRADUCCIÓN- Profesional Externo

Malena Nataly Tapia Vargas con cédula de identidad número: 0550251185 Licenciada: **En Ciencias de la educación mención inglés**, con número de registro de la SENESCYT: 1020-2022-2461526; CERTIFICO haber revisado y aprobado la traducción al idioma Inglés del resumen del trabajo de investigación con el título: **“Simulación del sistema eléctrico para optimizar la distribución mediante programación entera mixta y modelo cónico de segundo orden”** de Herrera Miranda Harry Alexander, egresado de la **Carrera De Ingeniería en Electricidad**, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**.

En virtud de lo expuesto y para constancia de lo mismo se registra la firma respectiva.

Latacunga, 16 Agosto, 2024


.....
Lic.: Malena Nataly Tapia Vargas
CI: 0550251185

1 ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	10
ÍNDICE DE TABLAS.....	13
ÍNDICE DE FIGURAS.....	14
ACRÓNIMOS	15
1 INFORMACIÓN GENERAL	18
2 INTRODUCCIÓN.....	19
2.1 Antecedentes.....	19
2.2 Planteamiento del problema	21
2.3 Formulación del Problema	21
2.4 Justificación.....	21
2.5 Hipótesis	22
2.6 Objetivos.....	23
2.6.1 Objetivo General	23
2.6.2 Objetivos Específicos.....	23
2.7 Sistema de tareas	23
3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	25
3.1 Antecedentes de la investigación.....	25
3.2 Marco conceptual referencial	27
3.2.1 Introducción a los SED	27
3.2.2 Modelo de programación matemática	27
3.2.3 Programación no lineal entera mixta (PNLEM)	30
3.2.4 Modelos cónicos de segundo orden (MC2O).....	30

3.2.5	Flujo óptimo de potencia.....	31
3.2.6	Operación del SED.....	33
3.2.7	Modelo de llaves de interconexión.....	37
3.2.8	Restricción del SED radial.....	38
4	MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS	39
4.1	Descripción del proyecto.....	39
7.1	Contextualización de variables.....	42
7.1.1	Variables independientes.....	42
7.1.2	Variables dependientes.....	43
7.2	Diagrama de flujo.....	43
7.3	Datos de entrada.....	44
7.4	Métodos de cálculo.....	47
7.4.1	Modelo inicial.....	47
7.4.2	Modelo de optimización.....	50
7.4.3	Visualización del modelo.....	54
8	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	60
8.1	Análisis de Casos Base.....	60
8.2	Resultados del modelo inicial.....	62
8.2.1	IEEE 34 sin LLI.....	62
8.2.2	IEEE 118 sin LLI.....	63
8.3	Resultados del modelo final.....	65
8.3.1	IEEE 34 con LLI.....	65
8.3.2	IEEE 118 con LLI.....	68

8.4	Evaluación de resultados	70
8.5	Validación del modelo.....	72
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
9.1	Conclusiones.....	75
9.2	Recomendaciones	76
10	BIBLIOGRAFÍA	77
11	ANEXOS	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Sistemas de tareas en relación con los objetivos específicos.....	23
Tabla 2. Tipos de programación matemática.....	29
Tabla 3. Ramos de la IEEE 34 y 118.....	45
Tabla 4. Nodos de la IEEE 34 y 118.....	45
Tabla 5. LLI en la IEEE 34 y 118.....	47
Tabla 6. Diccionarios para las variables del modelo inicial	48
Tabla 7. Diccionarios para las variables del modelo final	51
Tabla 8. Posición de los nodos en la IEEE 34 y 118	55
Tabla 9. Aristas al grafo de los nodos IEEE 34 y 118	56
Tabla 10. Comparativa de corrientes entre los modelos inicial/final del IEEE 34	70
Tabla 11. Comparativa de pérdidas PA entre los modelos inicial/final del IEEE 34	71
Tabla 12. Comparativa de voltaje entre los modelos inicial/final del IEEE 34	71
Tabla 13. Comparativa de corrientes entre los modelos inicial/final del IEEE 118	71
Tabla 14. Comparativa de pérdidas PA entre los modelos inicial/final del IEEE 118	72
Tabla 15. Comparativa de voltaje entre los modelos inicial/final del IEEE 118	72
Tabla 16. Validación del modelo IEEE 118 nodos	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Región factible en 3D.....	29
Figura 2. Representación gráfica de un MC2O	31
Figura 3. Representación Ramo General SED radial	34
Figura 4. Modelo de llave de interconexión	37
Figura 5. Diagrama de flujo del modelo de optimización	44
Figura 6. Modelo inicial.....	47
Figura 7. Procedimiento del modelo final	51
Figura 8. Grafo del modelo final	55
Figura 9. Ejemplo del grafo IEEE 34 sin LLI.....	57
Figura 10. Ejemplo del grafo IEEE 34 con LLI	58
Figura 11. Sistema de 34 nodos sin LLI	60
Figura 12. Sistema de 34 nodos con LLI.....	60
Figura 13. Sistema de 118 nodos con LLI.....	61
Figura 14. Corrientes iniciales para el modelo IEEE 34 sin LLI.....	62
Figura 15. Pérdidas de potencias iniciales para el modelo IEEE 34 sin LLI.....	63
Figura 16. Voltajes iniciales para el modelo IEEE 34 sin LLI	63
Figura 17. Corrientes iniciales para el modelo IEEE 118 sin LLI.....	64
Figura 18. Pérdidas de potencias iniciales para el modelo IEEE 118 sin LLI.....	64
Figura 19. Voltajes iniciales para el modelo IEEE 118 sin LLI	65
Figura 20. Resultado de reconfiguración LLI para el modelo IEEE 34	66
Figura 21. Corrientes para el modelo IEEE 34 con LLI.....	66
Figura 22. Pérdidas de potencia para el modelo IEEE 34 con LLI	67
Figura 23. Voltajes para el modelo IEEE 34 con LLI	67
Figura 24. Resultado de reconfiguración LLI para el modelo IEEE 118	68
Figura 25. Corrientes para el modelo IEEE 118 con LLI.....	69
Figura 26. Pérdidas de potencia para el modelo IEEE 118 con LLI	69
Figura 27. Voltajes para el modelo IEEE 118 con LLI	70

ACRÓNIMOS

- AG: algoritmo genético.
- GD: generación distribuida.
- FACTS: Flexible AC Transmission Systems, por sus siglas en inglés; lo que se traduce como sistemas de transmisión de corriente alterna flexibles.
- FP: flujo de potencia.
- FOP: flujo de potencia óptimo.
- ICD: interruptores controlados a distancia.
- LLI: llaves de interconexión o seccionadores.
- OCH: optimización por colonia de hormigas.
- PA: potencia activa.
- PC2O: programación cónica de segundo orden.
- PCM: programación cónica mixta.
- PEM: programación entera mixta.
- PL: programación lineal.
- PLEM: programación lineal entera mixta.
- PNL: problema no lineal.
- PNLEM: programación no lineal entera mixta.
- PR: potencia reactiva.
- SED: sistema eléctrico de distribución.

Notación

Indices

n, m Nodos de red eléctrica

Conjuntos

Ω_n Conjunto de nodos asociados a la red eléctrica

ω Escenarios

o Condiciones de operación del sistema eléctrico

Parámetros

c_n^c Costo de producir $p_{no\omega}$ [MW] en el nodo n .

$p_{no\omega}^D$ Potencia de consumida por el usuario en el nodo n [MW].

$p_{no\omega}^{Gmin}$ Potencia mínima de generación en el nodo n del escenario ω bajo el punto de operación o [MW].

$p_{no\omega}^{Gmax}$ Potencia máxima de generación en el nodo n del escenario ω bajo el punto de operación o [MW].

F_{nm}^{max} Flujo máximo que puede atravesar una línea de transmisión conectada entre los nodos n y m [MW].

B_{nm} Susceptancia de las líneas de transmisión del sistema eléctricos conectadas entre los nodos n y m [S].

Variables Continuas

$\lambda_{no\omega}$ Precio de compensación de mercado (LMP) en el nodo n del escenario ω bajo el punto de operación o [MW].

$p_{no\omega}^G$ Producción de energía en el nodo n del escenario ω bajo el punto de operación o [MW].

$\theta_{no\omega}$ Ángulo de voltaje en el nodo n del escenario ω bajo el punto de operación o [MW].

Para modelar diversos problemas de optimización en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica es necesario modelar el régimen permanente de la red de distribución. Por lo tanto, para modelar el estado estable de los sistemas de distribución se deben considerar varias premisas características de estos sistemas como:

- Ω_b : conjunto de nodos.
- Ω_l : conjunto de ramos.
- Ω_d : conjunto de niveles de demanda
- $R_{ij}I_{ij,d}^2$: Perdida de potencia activa, del nivel de demanda d
- $R_{ij}I_{ij,d}^2$: Perdida de potencia activa, del nivel de demanda d
- R_{ij} : Resistencia del circuito ij
- X_{ij} : Reactancia del circuito ij
- $P_{ij,d}$: Flujo de potencia activa en el circuito ij de nivel de demanda d
- $Q_{ij,d}$: Flujo de reactiva en el circuito ij de nivel de demanda d
- $P_{i,d}^S$: Potencia activa inyectada en el nodo i de nivel de demanda d
- $Q_{i,d}^S$: Potencia reactiva inyectada en el nodo i de nivel de demanda d
- $P_{i,d}^D$: Demanda de potencia activa en el nodo i de nivel de demanda d
- $Q_{i,d}^D$: Demanda de potencia reactiva en el nodo i de nivel de demanda d

2 INFORMACIÓN GENERAL

Título: Reconfiguración óptima de sistemas eléctricos de distribución utilizando programación entera mixta y un modelo cónico de segundo orden.

Fecha de inicio: 18 de febrero 2024

Fecha de finalización: 20 de agosto de 2024

Lugar de ejecución: Latacunga

Facultad que auspicia: Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.

Carrera que auspicia: Carrera de Ingeniería en Electricidad.

Proyecto Marco asociado: Desarrollo de sistemas eficientes para el abastecimiento y uso de energía eléctrica a nivel local, regional o nacional.

Equipo de Trabajo: Herrera Miranda Harry Alexander

Tutor de Titulación: Msc. Freire Martínez Luigi Orlando

Área de conocimiento: 07 Ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0713 Electricidad y Energía.

Línea de investigación: Energías Alternativas y Renovables, Eficiencia Energética y Protección Ambiental.

Sublíneas de investigación de la Carrera: Conversión y uso racional de la energía eléctrica.

Grupos Temáticos:

1. Eficiencia energética y desarrollo sostenible.
2. Generación con fuentes convencionales y no convencionales.

3 INTRODUCCIÓN

3.1 Antecedentes

En un sistema eléctrico de potencia (SEP), el subsistema de distribución conforma la red más grande, por lo tanto, produce la mayor cantidad de pérdidas de potencia que conlleva a varios efectos no deseados en la red eléctrica [1]. Específicamente, en un sistema eléctrico de distribución (SED) la cantidad de pérdidas de acuerdo con [2] conforman el 70% del total del SEP, particularmente se presentan en los alimentadores primarios y secundarios. Para reducir este efecto es imperante para el correcto funcionamiento de un SED y junto con esto se mejora intrínsecamente la confiabilidad del sistema. Existen otros fenómenos adicionales que se presentan en estos tipos de redes, como la fluctuación de los niveles de voltajes fuera de sus límites, especialmente en los puntos más alejados de la generación [3], desbalance de carga en ciertos puntos del SED [4], entre otros.

Otra característica del SED es, su configuración topográfica que establece una red mallada interconectada con otras. Actualmente, las redes eléctricas de distribución han sufrido varios cambios debido a la inserción de nuevas tecnologías como la generación distribuida (GD), nuevos dispositivos modernos como FACTS, medidores inteligentes, y técnicas de comunicación e información más efectivas, esto con el fin de ser capaz de lograr una red más segura y confiable [5],[6].

El principal objetivo de un SED es transmitir energía al usuario final, este proceso lo realiza mediante alimentadores mediante una topología radial, donde todos los puntos de carga son abastecidos por un único alimentador. Al presentarse una contingencia con este tipo de configuración parte de carga puede ser afectada quedado sin conexión, sin embargo, la topología radial soluciona estos tipos de fallas mediante dispositivos como seccionadores para dar selectividad al sistema y evitar el desabastecimiento de carga [7].

El SED está compuesto por seccionadores o llaves de interconexión (LLI), ubicados en puntos estratégicos del mismo. Estas llaves se pueden encontrar en estado abierto o cerrado y permiten obtener la topología radial en el sistema, además dan paso a la posibilidad de modificar las topologías y de transferir la demanda existente entre alimentadores. Se debe considerar que todas las topologías representan un punto de operación estable diferente y es necesario mantener la

característica radial del sistema.

Al considerar el avance de nuevas tecnologías de comunicación y control al igual que la importancia del SED, estos equipos de seccionamiento pueden ser controlados remotamente por los operadores del sistema, ya sea en una situación de estado estable o en caso de una contingencia. Esto permite que el operador responda de forma rápida y efectiva ante algún evento.

Los operadores del sistema utilizan estas llaves antes mencionadas a lo largo del día en caso de cambios de generación o demanda con el fin de disminuir pérdidas de potencia activa (PA), balancear los flujos por los alimentadores o controlar el nivel de voltaje. Estos objetivos se consideran para plantear el problema de reconfiguración óptima en el SED.

Por lo expuesto, para mitigar estas pérdidas, balancear cargas, mejorar niveles de voltaje y la confiabilidad del SED existen diferentes técnicas como la reconfiguración de la red. Este proceso proporciona la selectividad que necesita el sistema mediante los seccionadores, quienes pueden pasar de sus estados normales abiertos o cerrados y aislar subsistemas para prevenir contingencias y buscar una operación óptima del sistema [2].

El objetivo fundamental de la reconfiguración de un SED es encontrar la topología óptima donde se incluya una carga balanceada y un sistema con capacidad de restauración ante cualquier falla. Este cambio se los realiza mediante la operación de interruptores que puede ser remota o manual, sin embargo, al analizarlo de manera matemática esta permutación de cerrado y abierto incluye variables binarias por lo tanto el problema se convierte en NP-hard. La resolución óptima de este tipo de modelos es desafiante ya que puede llegar a convertirse en un problema no lineal entero mixto (PNLEM) al incluir el flujo de potencia (FP). La no convexidad de este obliga a buscar un método que permita relajar el problema y obtener la solución óptima. Para esta investigación se considera resolver el problema mediante una programación cónica de segundo orden que permite obtener un resultado óptimo de la reconfiguración del SED [8].

En conclusión, la reconfiguración óptima es una importante herramienta para mejorar uno o varios índices de desempeño de un SED y debido a la inclusión de nuevas tecnologías en la red (redes inteligentes, GD, movilidad eléctrica), esta herramienta incrementa su importancia y accesibilidad para las empresas distribuidoras de energía eléctrica.

3.2 Planteamiento del problema

Una de las características de los SED es que los planifican como redes malladas interconectadas, pero operan con una topología radial debido a razones como la facilidad de coordinación de protecciones o el descenso de la corriente de corto circuito. En el SED existen seccionadores o LLI, ubicados en puntos estratégicos del mismo. Estas llaves se pueden encontrar en estado abierto o cerrado y permiten obtener la topología radial en el sistema, además dan paso a la posibilidad de modificar las topologías y de transferir la demanda existente entre alimentadores. Se debe considerar que todas las topologías representan un punto de operación estable diferente y es necesario mantener la característica radial del sistema.

Estos equipos de seccionamiento pueden ser controlados remotamente por los operadores del SED, ya sea en una situación de estado estable o en caso de una contingencia. Esto permite que el operador responda de forma rápida y efectiva ante algún evento. Los operadores del sistema utilizan estas llaves antes mencionadas a lo largo del día en caso de cambios de generación o demanda con el propósito de disminuir las pérdidas de PA, balancear los flujos por los alimentadores o controlar el nivel de voltaje.

En conclusión, la reconfiguración óptima es una importante herramienta para mejorar uno o varios índices de desempeño de un SED y debido a la inclusión de nuevas tecnologías en la red (redes inteligentes, GD, movilidad eléctrica), esta herramienta incrementa su importancia y accesibilidad para las empresas distribuidoras de energía eléctrica.

3.3 Formulación del Problema

Debido a que la reconfiguración óptima es una importante herramienta para la operación del SED, es necesario realizar un modelo que permita representar tanto el problema de reconfiguración como la red de distribución, de forma que se obtenga posibles estrategias de operación de los elementos de seccionamiento.

3.4 Justificación

El principal objetivo de un SED es transmitir energía al usuario final, este proceso lo realiza mediante alimentadores para seguir una topología radial, donde todos los puntos de carga son abastecidos por un único alimentador. Al presentarse una contingencia con este tipo de

configuración parte de carga puede ser afectada quedado sin conexión, sin embargo, la topología radial soluciona estos tipos de fallas mediante dispositivos como seccionadores para dar selectividad al sistema y evitar el desabastecimiento de carga [7].

Por otro lado, en un SED también existen gran cantidad de pérdidas y de acuerdo con [2] el 70% de las pérdidas de un SEP, se presentan en los alimentadores primarios y secundarios a nivel de distribución. En este sentido, reducir este efecto es imperante para el correcto funcionamiento de un SED, junto con esto se mejora intrínsecamente la confiabilidad del sistema. Existen otros fenómenos adicionales que se presentan en estos tipos de redes, como la fluctuación de los niveles de voltajes fuera de sus límites, especialmente en los puntos más alejados de la generación [3], desbalance de carga en ciertos puntos del SED [4].

Por lo expuesto, para mitigar estas pérdidas, balancear cargas, mejorar niveles de voltaje y la confiabilidad del SED existen diferentes técnicas como la reconfiguración de la red. Este proceso proporciona la selectividad que necesita el sistema mediante los seccionadores, quienes pueden pasar de sus estados normales abiertos o cerrados y aislar subsistemas para prevenir contingencias y buscar una operación óptima del sistema [2].

El objetivo fundamental de la reconfiguración de un SED es encontrar la topología óptima donde se incluya una carga balanceada y un sistema con capacidad de restauración ante cualquier falla. Este cambio se los realiza mediante la operación de interruptores que puede ser remota o manual, sin embargo, al analizarlo de manera matemática esta permutación de cerrado y abierto incluye variables binarias por lo tanto el problema se convierte en NP-hard. La resolución óptima de este tipo de modelos es desafiante ya que puede llegar a convertirse en un PNLEM al incluir el FP. La no convexidad de este obliga a buscar un método que permita relajar el problema y obtener la solución óptima. Para esta investigación se considera resolver el problema mediante una programación cónica de segundo orden que permite obtener un resultado óptimo de la reconfiguración del SED [8].

3.5 Hipótesis

Si se realiza un cambio de topología en la red eléctrica de distribución mediante la operación de seccionadores, los índices de calidad y pérdidas de este SED mejorarán y disminuirán respectivamente.

3.6 Objetivos

3.6.1 Objetivo General

Efectuar un modelo matemático para resolver el problema de la reconfiguración óptima de redes eléctricas de distribución.

3.6.2 Objetivos Específicos

- Recopilar información bibliográfica de modelos matemáticos aplicados para la reconfiguración óptima de sistema eléctrico de distribución.
- Formular matemáticamente el problema utilizando una relajación cónica de segundo orden.
- Simular la formulación propuesta utilizado en un software de programación.
- Analizar los resultados para varios casos de estudio base.

3.7 Sistema de tareas

Tabla 1. Sistemas de tareas en relación con los objetivos específicos

OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES	RESULTADOS DE LAS ACTIVIDADES	MEDIOS DE VERIFICACIÓN
Recopilar información bibliográfica de modelos matemáticos aplicados para la reconfiguración óptima de sistema eléctrico de distribución	Búsqueda de información en medios físicos y digitales acerca de la reconfiguración óptima en redes eléctricas de distribución.	Fundamentación teórica base para la investigación	Fuentes bibliográficas
	Indagación en textos, libros y publicaciones científicas de métodos para la solución del problema de reconfiguración.	Metodología por utilizarse para resolver el problema propuesto	Ecuaciones Esquema general del algoritmo
Formular matemáticamente el problema utilizando una relajación cónica de segundo orden.	Modelar matemáticamente la red de distribución.	Modelo de la red de distribución.	Modelos matemáticos base.
	Formular la reconfiguración óptima de redes de distribución.	Modelo para el problema de reconfiguración óptima de redes de distribución.	Relajación Cónica de segunda Orden.

	Reformular el problema de optimización como una relajación cónica de segundo orden.	Formulación de la relajación cónica de segundo orden.	
Simular la formulación propuesta utilizado en un software de programación.	Programar el problema de optimización.	Algoritmo programado.	Tablas de resultados.
	Simular el problema de reconfiguración.	Tablas de resultados de casos base utilizados.	
Analizar los resultados para varios casos de estudio base.	Analizar resultados de la simulación.	Maximización o minimización de función objetivo.	Tabla comparativa.
	Cálculo de los beneficios obtenidos después de la optimización.	Punto de operación estable en la relajación propuesta, al considerar el estado de las llaves como variables de control.	Análisis de puntos de operación.

4 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

4.1 Antecedentes de la investigación

Existen algunos modelos de optimización que ayudan a la reducción de pérdidas de PA y mejoras de los perfiles de voltaje en la red. Un caso de ellos, es Ramos et al. [9], el cual presenta un modelo para la reconfiguración de un SED mallada pero que como radial. Se linealiza la función objetivo con un algoritmo genético (AG) y a sus restricciones; convirtiéndoles en un problema lineal entero mixto (PLEM).

Khodr et al. [10], en cambio presenta una reconfiguración SED basada en un flujo óptimo de potencia (FOP) y la descomposición de Benders. Al igual que con el caso Ramos et al., la configuración de su red es mallada, pero se opera de forma radial. A partir de los cortes lineales de Benders, se linealiza el modelo y se conectan los subproblemas maestro y esclavo; estos a su vez se tratan como una PNLEM y un problema no lineal (PNL); respectivamente.

El FOP puede ser multi periodo para resolverse el problema de PNLEM. En este caso, Capitanescu et al. [11] integra dos redes, una de distribución y otra con operación dinámica mediante interruptores controlados a distancia (ICD) a fin de gestionar congestiones en tiempo real. Gracias al uso de coordenadas rectangulares en las tensiones, se reduce la no linealidad del problema. Además, con el algoritmo empleado, al problema se lo distribuye en períodos críticos para disminuir su tamaño y complejidad. Y así se maximiza la capacidad de alojamiento de GD en el SED.

Se tiene otro caso de estudio, en la que se implementa un modelo cuadráticamente restringido de PNLEM propuesto por Romero-Ramos et al. [12]. Este coloca variables no convencionales que simplifican las restricciones eléctricas a fin de obtener ecuaciones lineales. Además, utiliza un algoritmo de límite y rama para ofrecer una solución precisa y se resuelva el problema de reconfiguración.

A pesar de que las redes estudiadas son malladas, todos los investigadores para sus modelos de estudio, las operan de manera radial. Así mismo, Tabares et al. [13] utiliza una PLEM bajo esta modalidad del SED y opera con un modelo linealizado FP por partes. Este algoritmo computacional permite encontrar soluciones de alta calidad y disminuir las pérdidas de PA, con el

propósito de mejorar la confiabilidad del sistema.

Algunos estudios aplican modelos PLEM para la reducción de pérdidas, pero no se pueden considerar exactos ya que utilizan ecuaciones lineales y no convexas como el caso de [9]. También existen otras investigaciones propuestas por [10], [11], [12], [13], que a pesar de utilizar una PNLEM, tampoco son exactos debido a la naturaleza no convexa y a su gran dificultad para resolverlos. Generalmente, utiliza un proceso computacional grande y demanda mucho tiempo en su resolución a medida que los nodos de la red se incrementan. Para evitar estos problemas, se aplica una programación cónica de segundo orden (PC2O), tal como lo menciona Jabr [14] para un modelo de FP para reducir tanto las pérdidas de PA y PR en el SED. Este utiliza aspectos lineales para la formulación del problema, restricciones, conos cuadráticos rotados y el método de puntos interiores con el software de optimización comercial MOSEK.

Jabr et al. [15] presenta un caso de estudio de optimización para la reconfiguración de SED radial con el uso de seccionadores e interruptores de enlace para facilitar la coordinación de los sistemas de protección. Esta linealización se realiza por medio de un PC2O en las ecuaciones de FP. Además, combina la PNLEM y PC2O con las herramientas computacionales CPLEX de IBM y MOSEK, para conseguir soluciones globales óptimas, aumentar la eficiencia y reducir las pérdidas exactas de la red.

De manera similar Zhang et al. [16] propone el mismo método, pero en vez de los seccionadores, utiliza recursos energéticos distribuidos para ofrecer generación local y restaurar cargas críticas durante interrupciones del SEP, además de puntos abiertos suaves para la regulación del flujo de PA y compensación de PR. A partir de la combinación de relajación cónica, aproximación de series de Taylor y el método Big-M se realiza una linealización del SED, lo que permite una reducción de pérdidas. Esto se lleva a cabo con las herramientas computacionales del optimizador GUROBI en el entorno de Matlab y la caja YALMIP.

A nivel nacional, se examinan diversos estudios [17], [18], [19], [20] para resolver este problema de reconfiguración del SED, al aplicar técnicas heurísticas como el AG u optimización por colonias de hormigas (OCH); sin embargo, no garantiza la calidad de la solución encontrada. En contraste, el modelo propuesto debe ser capaz de garantizar una solución óptima al considerar el modelo relajado de FP radial. Además, los seccionadores son representados mediante variables binarias y

el modelo del SED de tipo continuo.

4.2 Marco conceptual referencial

La fundamentación teórica contempla dar una visión general sobre ciertos aspectos del tema propuesto, como el SED, modelo de programación matemática, PNLEM y ecuaciones del flujo de potencia.

4.2.1 Introducción a los SED

Un SED tiene como finalidad enviar energía eléctrica desde la subestación hacia el medidor del cliente final. Este sistema se conforma de líneas primarias/secundarias, transformadores, acometidas y medidores [21]. Además, suelen contener dos tipos de redes, radial y mallada. El primer tipo suele tener líneas abiertas y se sitúan en zonas rurales, por el cual la energía fluye en un solo sentido desde la subestación hasta el transformador. A pesar de ser simple y menos costosa, se vuelve más vulnerable a interrupciones, ya que una falla puede dejar sin servicio a todos los clientes [22].

Por otro lado, las redes subterráneas presentan una configuración en malla y están presentes en entornos urbanos. Este tipo incrementa la fiabilidad y seguridad del suministro. Además, tiene la capacidad de tener múltiples rutas para el flujo de energía, lo que reduce las interrupciones ante una falla y mejora la estabilidad del sistema [23].

El SED sufre grandes cambios debido al uso de nuevas tecnologías como la GD con energías renovables, almacenamiento de energía y/o diversos tipos de demanda como estaciones de carga de vehículos eléctricos. Estos cambios incluyen modificaciones en generación y demanda dentro de la red por lo tanto es necesario analizar si la configuración del SED es la adecuada [24], [25]. Esto conlleva a que sea necesario un estudio de la configuración actual del sistema y una posible reconfiguración con el propósito de minimizar pérdidas de potencia o posibles cambios en la calidad de energía que se entrega al usuario final. Debido a la cantidad de variables, se convierte en un proceso complejo. Por lo que se emplean modelos matemáticos y técnicas de investigación operativa como la PNLEM [26].

4.2.2 Modelo de programación matemática

La programación matemática es una técnica fundamental para la toma de decisiones cuantitativas,

en base a un modelo matemático que sirve para la representación y resolución eficiente de cualquier tipo de problemas [27]. Estos modelos contienen en esencia tres componentes como variables de decisión, funciones objetivas y restricciones, los cuales sirven para estructurar y analizar las relaciones en un sistema [28].

A las variables de decisión se las define como las decisiones cuantificables que afectan el valor de la función objetivo y las restricciones. La función objetivo es la medida cuantificable del desempeño de un sistema y está conformada en función de las variables de decisión, esta generalmente busca ser maximizada o minimizada. Las restricciones son un el conjunto de relaciones que el sistema está obligado a cumplir, normalmente suelen estar expresadas con desigualdades e igualdades [28].

Adicionalmente es importante conocer que el modelo matemático presente características únicas que dependen del creador con un compromiso existente entre el grado de detalle en el modelo y la capacidad para obtener soluciones. Estas deben mantenerse en equilibrio ya que los dos extremos que pueden presentarse son un modelo muy preciso pero muy difícil o imposible de resolver o uno muy simple con una respuesta que se aleja mucho de la realidad del sistema. Una vez revisado los conceptos anteriores la optimización se la define como el proceso de encontrar los valores que deben asumir las variables de decisión en un modelo matemático para obtener una función objetivo óptima y satisfacer un conjunto de restricciones. De forma general, un problema de optimización presenta la siguiente forma [29]:

Función Objetivo

$$\text{Min/Max } f(x) \tag{1}$$

Sujeto a

$$h(x) = 0 \tag{2}$$

$$g(x) \leq 0 \tag{3}$$

$$x \in \Omega$$

Donde: $f(x)$ es la función objetivo en función y " x " representa las variables de decisión. $h(x)$ y $g(x)$ son las restricciones de igualdad y desigualdad; respectivamente. Finalmente, Ω es el espacio

o región de soluciones factibles. A manera de ejemplo, se tiene en las siguientes ecuaciones, los datos de un problema de maximización, cuya región factible se observa en la Figura 1.

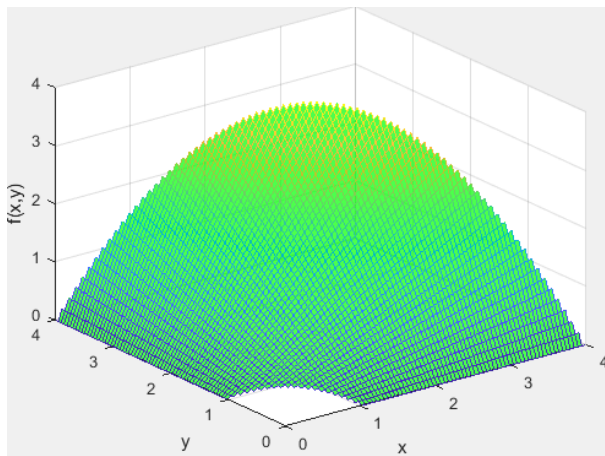


Figura 1. Región factible en 3D

Función objetivo:

$$\text{Max } f(x, y) = x * y \quad (4)$$

Sujeto a:

$$x + y \leq 4 \quad (5)$$

$$2x + 2y \geq 2 \quad (6)$$

$$x, y \geq 0 \quad (7)$$

Para este ejemplo la función objetivo (4) es de característica no lineal, específicamente cuadrática mientras que las restricciones (5), (6) y (7) son lineales y las variables de decisión son continuas por lo que el ejemplo se lo clasifica como un problema de programación cuadrática. Gráficamente el espacio de solución se muestra en la Figura 1, se considera que el eje z corresponde a la función objetivo y los demás ejes como variables de decisión. En sí, la programación matemática consiste en maximizar/minimizar una función objetivo, además que toma en cuenta sus restricciones y variables; por lo que, se produce diversos modelos, ya sean de tipo lineal, no lineal, enteros, mixtos o una combinación de estos, tal como se visualiza en la Tabla 2 [27].

Tabla 2. Tipos de programación matemática

Programación	Función Objetivo		Restricciones		Tipo de variables	
	Lineal	No lineal	Lineal	No lineal	Continuas	Enteras
Lineal (PL)	X		X		X	
No lineal (PNL)		X		X	X	
Entera (PE)	X		X			X
Mixta (PM)	X		X		X	X
Lineal Entera Mixta (PLEM)	X		X		X	X
No Lineal Entera Mixta (PNLEM)		X		X	X	X

4.2.3 Programación no lineal entera mixta (PNLEM)

La PNLEM utiliza variables no lineales ya sean de tipo enteras y continuas, los cuales ayudan a la resolución de problemas orientados a procesos complejos de ingeniería; en especial, cuando la PL o PE no pueden solventar estas dificultades [30]. Un ejemplo yace en la optimización a los SED, donde se requieren tomar decisiones sobre la gestión de recursos energéticos y configuración de la red, estos deben ser eficientes y adaptables a cualquier modificación [31].

Debido a la naturaleza de las variables de la PNLEM, su multiplicación da presencia a una terminología bilineal, la cual se expresa de forma matricial [32]. Por ejemplo, se desea maximizar una función objetivo $f(x, y) = x^T Ay$, donde las variables de decisión "x", "y", y la matriz de coeficientes "A" se representa de la siguiente manera:

$$x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}, y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}, A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix}$$

Entonces, el término bilineal $x^T Ay$ es igual a:

$$x^T Ay = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix}$$

$$x^T Ay = x_1(a_{11}y_1 + a_{12}y_2) + x_2(a_{21}y_1 + a_{22}y_2)$$

$$x^T Ay = a_{11}x_1y_1 + a_{12}x_1y_2 + a_{21}x_2y_1 + a_{22}x_2y_2$$

Cada elemento $a_{ij}x_iy_j$ es una expresión bilineal que conlleva la multiplicación de las variables de decisión (x_i, y_j) y el coeficiente correspondiente a_{ij} . Se resuelve el problema al aplicar técnicas de linealización como lo hace Capitanescu et al. [31]. Se coloca una variable auxiliar z_{ij} , resultado del producto x_iy_j y restricciones adecuadas se puede obtener un enfoque manejable y lineal. También existen otras maneras resolver los problemas como el PNLEM, por ejemplo, a través de algoritmos de descomposición, lo cual distribuye la complejidad en subproblemas manejables y pequeños [32]. Otra forma es mediante las técnicas de aprendizaje automático que son implementadas para mejorar la eficiencia de este método y genera soluciones heurísticas y aproximaciones rápidas que complementa la PNLEM [31].

4.2.4 Modelos cónicos de segundo orden (MC2O)

Se dice que los MC2O son técnicas capaces de convertir problemas no convexos en convexos (ver

Figura 2), con el propósito de obtener soluciones óptimas. Normalmente, se utiliza en la optimización de SEP para manejar variables y restricciones de forma eficaz. Además, la resolución del sistema contempla el uso de conos de segundo orden y el método de puntos interiores para representar las restricciones complejas y los algoritmos de optimización; respectivamente, cuya finalidad es simplificar la estructura del problema [33].

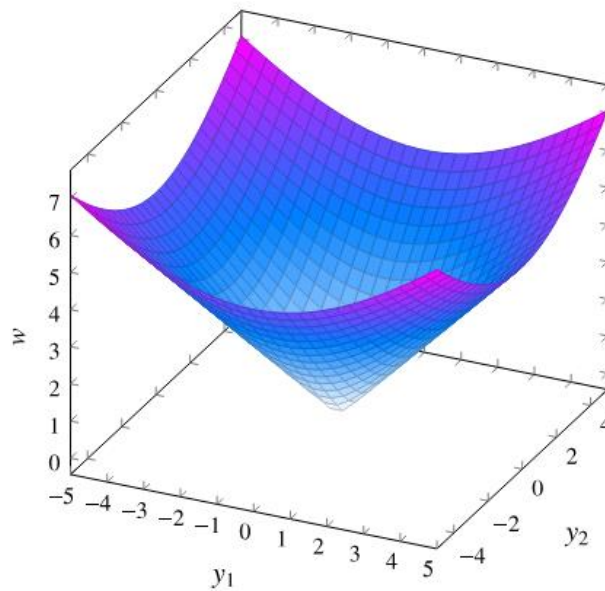


Figura 2. Representación gráfica de un MC2O

Cuando la resolución del problema es intratable a nivel computacional, se utiliza una funcionalidad del MC2O, que es la conversión de la PNLEM a MC2O entera mixta [33]. Además, el MC2O puede emplear varias restricciones con PA y PR en el SED, con la finalidad de optimizar la capacidad y ubicación de dispositivos FACTS o sistemas de almacenamiento de energía [33], [34]. Este modelo no solo mejora la estabilidad del voltaje sino también reduce las pérdidas de línea, al ser una técnica viable y robusta en diversas aplicaciones reales [33].

4.2.5 Flujo óptimo de potencia

Es importante revisar varios tipos de representaciones del SEP que reflejan el comportamiento del sistema en estado estable. Existen algunas ecuaciones empleadas para el análisis del FP en los SEP, tales como el balance de corrientes en un nodo i , visto en la ecuación (8). Este se produce por la ley de Kirchhoff para corrientes, donde la suma de corrientes que entran en un nodo debe ser igual a la suma de las corrientes que salen del nodo.

$$\vec{I}_i^g - \vec{I}_i^d = \sum_{ij} \vec{I}_{ij} + \sum_{ji} \vec{I}_{ji} \quad (8)$$

La segunda ecuación (9) se obtiene a través de la Ley de Ohm, donde la corriente \vec{I}_{ij} fluye del nodo i a j y se relaciona con la diferencia de potencial $(\vec{V}_i - \vec{V}_j)$ por la admitancia Y_{ij} .

$$\vec{I}_{ij} = Y_{ij}(\vec{V}_i - \vec{V}_j) \quad (9)$$

Por último, se define la potencia compleja de línea \vec{S}_{ij} al resultado entre la tensión en el nodo i por la corriente de línea \vec{I}_{ij} , tal como se indica en la ecuación (10).

$$\vec{S}_{ij} = \vec{V}_i \vec{I}_{ij} \quad (10)$$

Estas ecuaciones están conformadas por valores complejos y representan las leyes antes mencionadas. Una vez combinadas se definen los flujos de potencia $(\vec{S}_i^g - \vec{S}_i^d)$ y (\vec{S}_{ij}) , indicados en la ecuaciones (11) y (12); respectivamente.

$$\vec{S}_i^g - \vec{S}_i^d = \sum_{ij} \vec{S}_{ij} + \sum_{ji} \vec{S}_{ji} \quad (11)$$

$$\vec{S}_{ij} = \mathbf{Y}_{ij}^*(\vec{V}_i \vec{V}_j^*) - \mathbf{Y}_{ij}(\vec{V}_i \vec{V}_j^*) \quad (12)$$

A lo largo de la literatura estas ecuaciones han sido expresadas ya sea en su forma polar o en su forma rectangular y equivalentes unas con otras. Los problemas del SED requieren tomar en cuenta un flujo de potencia completo AC. Además, envuelve una formulación no lineal, por lo que en el presente trabajo se maneja magnitudes reales que se adapten mejor a un entorno de programación [35]. A continuación, se define la formulación del problema del FOP [36], [37]:

- En la ecuación (13) se establece una función objetivo, cuya finalidad consiste en minimizar la PA generada en cada nodo dentro del SED.

$$\min_{\Delta_L} \sum_n p_{no\omega}^G \quad (13)$$

- La ecuación (14) representa el balance de PA en un nodo n y se calcula como la suma de la PA desbalanceada $p_{no\omega}^{DEV}$ debido a la generación o carga y la susceptancia B_{nm} entre nodos

(n, m) por la diferencia de los ángulos de fase $(\theta_{no\omega} - \theta_{mo\omega})$, restado la potencia de generación $p_{no\omega}^G$.

$$p_{no\omega}^{DEV} + B_{nm}(\theta_{no\omega} - \theta_{mo\omega}) - p_{no\omega}^G = 0 \quad : \lambda_{no\omega} \quad \forall_n \quad (14)$$

- Se tiene como restricción a la PA de generación $p_{no\omega}^G$ en cada nodo n , el cual presenta límites inferior $p_{no\omega}^{Gmin}$ y superior $p_{no\omega}^{Gmax}$, tal como se indica en la ecuación (15).

$$p_{no\omega}^{Gmin} \leq p_{no\omega}^G \leq p_{no\omega}^{Gmax} \quad \forall_n \quad (15)$$

- Se establece una restricción del FP entre dos nodos n y m en el SED, siempre y cuando sea menor a la capacidad máxima de línea F_{nm}^{max} , visto en la ecuación (16).

$$B_{nm}(\theta_{no\omega} - \theta_{mo\omega}) \leq F_{nm}^{max} \quad \forall_n \forall_m \in \Omega_n \quad (16)$$

- Los ángulos de fase $\theta_{no\omega}$ se sitúan en el rango de $[-\pi, \pi]$ con un valor referencial en cero, tal como se detallan en las ecuaciones (17) y (18).

$$-\pi \leq \theta_{no\omega} \leq \pi \quad \forall_n \quad (17)$$

$$\theta_{no\omega} = 0 \quad n = ref \quad (18)$$

4.2.6 Operación del SED

Se escoge el modelo cónico debido a que proporciona una aproximación confiable y eficiente al problema de reconfiguración del SED, el cual es formulado como un PNLEM. Este puede garantizar una solución óptima debido a su naturaleza convexa. Los problemas de optimización en el SED se modelan bajo el régimen permanente de la red. Por lo tanto, se deben considerar varias características tales como la topología radial, demandas constantes representadas como PA y PR, sistema balanceado y expresado como un circuito equivalente monofásico. De la Figura 3 se obtiene la representación de un ramo del sistema, descritos a continuación:

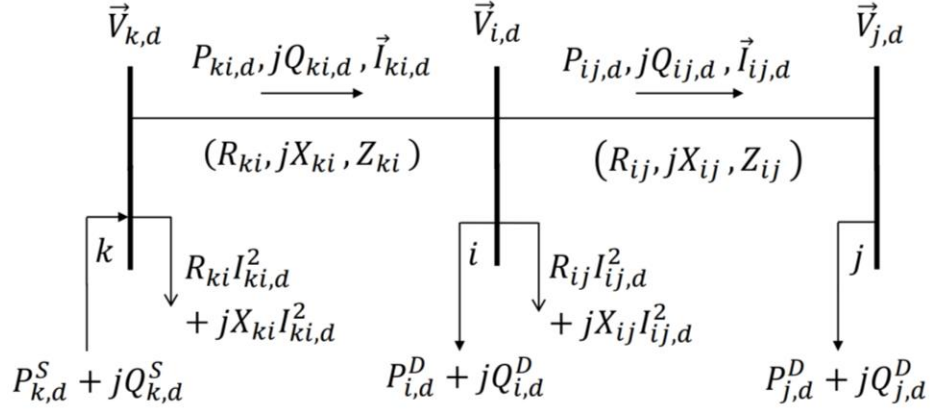


Figura 3. Representación Ramo General SED radial

- Voltajes $\vec{V}_{k,d}$, $\vec{V}_{i,d}$ y $\vec{V}_{j,d}$ en los nodos k , i y j ; respectivamente.
- Corrientes $I_{ki,d}$ y $I_{ij,d}$ en los ramos $k - i$ e $i - j$; respectivamente
- Impedancias complejas $(R_{ki} + jX_{ki})$ y $(R_{ij} + jX_{ij})$ en los ramos.

Se aplica los criterios de voltaje y corriente de las leyes de Kirchhoff se tiene que la PA total generada $P_{ki,d}$ menos la suma de potencias total consumidas es igual a la PA demandada, tal como se indica en la ecuación (19). En cuanto se refiere a la parte reactiva, se sigue una analogía similar al PA, a fin de determinar balance de PR, visto en la ecuación (20).

$$\sum_{ki \in \Omega_l} P_{ki,d} - \sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij,d} + R_{ij} I_{ij,d}^2) + P_{i,d}^S = P_{i,d}^D \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (19)$$

$$\sum_{ki \in \Omega_l} Q_{ki,d} - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ij,d} + X_{ij} I_{ij,d}^2) + Q_{i,d}^S = Q_{i,d}^D \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (20)$$

Donde Ω_b , Ω_l representa el conjunto de nodos y ramos y las demás variables se designan en función de los niveles de demanda “ d ”:

- Ω_d : conjunto de niveles de demanda.
- $R_{ij} I_{ij,d}^2$: Pérdidas PA.
- $P_{ij,d}$ y $Q_{ij,d}$: Flujos PA y PR en el circuito ij .
- $P_{i,d}^S$ y $Q_{i,d}^S$: PA y PR inyectadas en el nodo i .

- $P_{i,d}^D$ y $Q_{i,d}^D$: demandas PA y PR en el nodo i .

Aplicando algunos criterios eléctricos y matemáticas detallados en el Anexo 1, se determina la ecuación (21) para la caída de voltaje y el flujo de potencia en una red de distribución radial.

$$[V_{i,d}^2 - 2(R_{ij}P_{ij,d} + X_{ij}Q_{ij,d})]V_{j,d}^2 - Z_{ij,d}(P_{ij,d}^2 - Q_{ij,d}^2) - V_{j,d}^4 = 0 \quad (21)$$

$$\forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d$$

De la ecuación (21) se elimina la diferencia angular entre los voltajes y se caracteriza por ser un polinomio de cuarto grado que calcula la caída de voltaje en el circuito ij , en un nivel de demanda d . De esta forma es posible obtener la magnitud de voltaje del último nodo en términos de la magnitud del nodo inicial, los parámetros del ramo ij , los flujos PA y PR.

$$I_{ij,d}^2 = \frac{P_{ij,d}^2 + Q_{ij,d}^2}{V_{j,d}^2} \quad (22)$$

Se sustituye (22) en (21) se obtiene (23).

$$V_{i,d}^2 - 2(R_{ij}P_{ij,d} + X_{ij}Q_{ij,d}) - Z_{ij,d}I_{ij,d}^2 - V_{j,d}^2 = 0 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (23)$$

Para este caso la diferencia angular se mantiene eliminada, pero el polinomio que calcula la magnitud de caída de voltaje en el circuito ij es de grado 2 por lo que es posible obtener la magnitud de voltaje en función de los mismos términos anteriormente mencionados e incluir el valor de corriente en el ramo. En los SED donde existen mallas es necesario considerar las siguientes ecuaciones (24) y (25).

$$\cos(\theta_{i,d} - \theta_{j,d}) = \frac{V_{j,d}^2 + (R_{ij}P_{ij,d} + X_{ij}Q_{ij,d})}{V_{i,d}V_{j,d}} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (24)$$

$$\sen(\theta_{i,d} - \theta_{j,d}) = \frac{R_{ij}P_{ij,d} - X_{ij}Q_{ij,d}}{V_{i,d}V_{j,d}} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (25)$$

Por lo tanto, se considerará a lo largo del trabajo que el SED se mantendrá radial. Para presentar el modelo de flujo en ramos es posible realizar un cambio de variables en las variables de corriente de los circuitos y los voltajes en los nodos ya que ambas magnitudes se encuentran solamente en funciones al cuadrado como se muestra en las ecuaciones (26) y (27), luego se elimina la no linealidad en estas dos variables. Una vez resuelto el problema de PNL se obtienen las magnitudes

de variables modificadas con el valor positivo de la raíz cuadrada.

$$I_{ij,d}^2 = I_{ij,d}^{qrd} \quad (26)$$

$$V_{j,d}^2 = V_{j,d}^{qrd} \quad (27)$$

Realizado este cambio de variable es posible definir un el modelo para obtener el punto de operación estable en régimen permanente y considerar el criterio de minimizar las pérdidas de energía en el sistema, tal como se muestra a continuación:

Función
Objetivo

$$\min v = \sum_{d \in \Omega_d} \sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} I_{ij,d}^{qdr} \quad (28)$$

Sujeto
a:

$$\sum_{ki \in \Omega_l} P_{ki,d} - \sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij,d} + R_{ij} I_{ij,d}^{qdr}) + P_{i,d}^S = P_{i,d}^D \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (29)$$

$$\sum_{ki \in \Omega_l} Q_{ki,d} - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ij,d} + X_{ij} I_{ij,d}^{qdr}) + Q_{i,d}^S = Q_{i,d}^D \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (30)$$

$$v_{i,d}^{qdr} - 2(R_{ij} P_{ij,d} + X_{ij} Q_{ij,d}) - Z_{ij}^2 I_{ij,d}^{qdr} - V_{j,d}^{qdr} = 0 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (31)$$

$$I_{ij,d}^{qdr} V_{j,d}^{qdr} = P_{ij,d}^2 + Q_{ij,d}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (32)$$

$$I_{ij,d}^{qdr} \geq 0 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (33)$$

$$V_{i,d}^{qdr} \geq 0 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (34)$$

Se analiza el modelo anterior y se aprecia que la no linealidad está presente en la restricción (32) debido a que contienen dos variables elevadas al cuadrado y un producto de dos variables. Una vez identificado esta ecuación los esfuerzos se debe enfocar en transformar este problema no lineal a un problema convexo. Ya que con eso podemos utilizar herramientas que obtengan el mínimo del problema planteado.

4.2.7 Modelo de llaves de interconexión

Para el problema de reconfiguración, inicialmente se procede a establecer el modelo de LLI que se presenta a continuación:

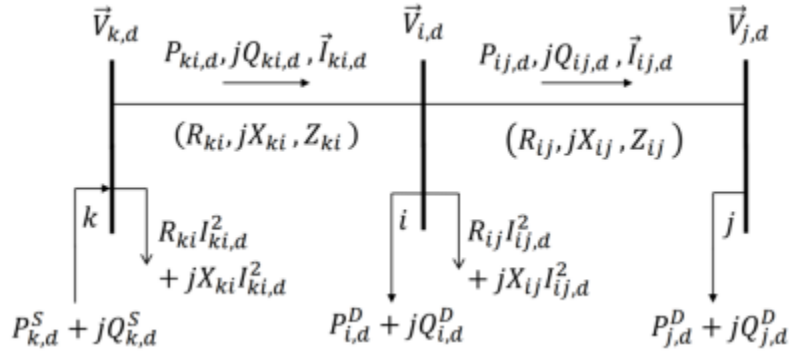


Figura 4. Modelo de llave de interconexión

Donde para simular la operación de LLI es necesario valerse de una variable entera w_{ij} , que representa el estado de Operación de la LLI entre los nodos ij de la siguiente manera:

$$w_{ij} = 1/0 \text{ LLI cerrada/abierta}$$

Una vez definido el modelo de la rama ij con la LLI se definen las nuevas restricciones que gobiernan la operación en esta rama del sistema, donde Ω_{ch} es el conjunto de LLI, $P_{ij,d}^{ch}$ y $Q_{ij,d}^{ch}$ flujos PA y PR; respectivamente, $I_{ij,d}^{ch}$ magnitud de corriente LLI, \bar{I}_{ij}^{ch} y R_{ij}^{ch} máxima magnitud de corriente y resistencia en la LLI.

$$I_{ij,d}^{ch,qdr} V_{j,d}^{qdr} = (P_{ij,d}^{ch})^2 + (Q_{ij,d}^{qdr})^2 \quad (35)$$

$$|V_{j,d}^{qdr} - V_{i,d}^{qdr}| \leq (\bar{V}^2 - \underline{V}^2)(1 - w_{ij}) \quad (36)$$

$$|P_{ij,d}^{ch}| \leq (\bar{V} \bar{I}_{ij}^{ch}) w_{ij} \quad (37)$$

$$|Q_{ij,d}^{ch}| \leq (\bar{V} \bar{I}_{ij}^{ch}) w_{ij} \quad (38)$$

$$0 \leq I_{ij,d}^{ch,qdr} \leq (\bar{I}_{ij}^{ch})^2 w_{ij} \quad (39)$$

$$w_{ij} \text{ binario} \quad (40)$$

Definido este modelo se presenta un problema, ya que estas restricciones en conjunto con las

restricciones del sistema no aseguran una topología radial, ya que al haber varias LLI al estar cerradas o abiertas estas pueden generar mallas dentro del sistema o sistemas aislados. Por tanto, es necesario aplicar en el modelo, ciertas restricciones que aseguren la topología radial del sistema.

4.2.8 Restricción del SED radial

Para afirmar que un SED de n nodos es de topología radial, se necesita satisfacer que la solución cumpla con la condición $n - 1$ ramos y sea una topología convexa, visto en la Ecuación (41).

$$|\Omega_l| + \sum_{ij \in \Omega_{ch}} w_{ij} = |\Omega_b| - 1 \quad (41)$$

Para la condición b se revisa las características del problema de reconfiguración en el SED, como el hecho de que solo existe una subestación activa en para cada ramal del SED, lo que se traduce en el modelo en que solamente existe 1 nodo como barra $V\theta$. Todos los otros nodos son nodos de carga es decir con barras PQ. Se debe cumplir la primera ley de Kirchhoff y el objetivo es encontrar la mejor topología radial. Se analiza la característica de cumplir la primera ley de Kirchhoff, la cual se encuentra presente en la restricción de balance de potencia donde se abastece la demanda de potencia en cada nodo de carga. Por lo tanto, se genera un genera un grafo conexo, es decir que existe un camino entre la subestación y cada nodo de carga. Esto satisface la segunda condición necesaria para la asegurar la radialidad del sistema. Una vez que las restricciones de balance de potencia son combinadas con la primera condición se puede considerar que se cumple ambas condiciones para la operación radial del sistema sin mallas ni nodos aislados de carga.

5 MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS

La presente investigación propone un enfoque cuantitativo al encontrar la configuración óptima de la SED. El tipo de investigación plantea la experimentación en un caso de estudio de un SED donde se busca la mejor opción donde los reconectores deben estar activos y funcionamiento de los reconectores en la red.

5.1 Descripción del proyecto

El SED es la última etapa del SEP ante el usuario final y en los últimos años ha pasado por una serie de transformaciones como la integración de nuevas tecnologías, el incremento del tamaño de la red, entre otras lo que muestra la importancia que tiene la operación en estado estable del sistema. Además, presenta una gran cantidad de pérdidas y de acuerdo con [2] el 70% de las pérdidas del SEP, se presentan en los alimentadores primarios y secundarios a nivel de distribución. En este sentido, reducir este efecto es imperante para el correcto funcionamiento de un SED, junto con esto se mejora intrínsecamente la confiabilidad del sistema. En este contexto, los equipos de maniobra y protección que pueden ser controlador remotamente y pueden ser utilizados a la par con otros objetivos tales como la disminución de pérdidas, mejoramiento del perfil de voltaje, balanceo de carga entre otras. El proceso de encontrar la mejor forma de utilizar los equipos antes mencionados se lo considera como reconfiguración óptima y cuyo resultado dependerá de la función objetivo a ser elegida entre las anteriores indicadas.

Para la fundamentación es necesario partir del modelo de reconfiguración de redes de distribución no lineal, el cual tiene como base el estado de operación en régimen permanente del SED y las ecuaciones de operación del LLI. Este se compone de ecuaciones algébricas no lineales, por lo que el problema de reconfiguración pasa a ser PNL y al incrementar el modelo de operación de la LLI se convierte en un PNLEM. La función objetivo se determina a través de la Ecuación (42), la cual tiene como propósito minimizar las pérdidas PA del sistema, mientras que las Ecuaciones (43) y (44) representan el balance PA y PR en cada nodo.

$$\min v = \sum_{d \in \Omega_d} c_d^{ls} \alpha_d \left(\sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} I_{ij,d}^{qdr} + \sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij}^{ch} I_{ij,d}^{ch,qdr} \right) \quad (42)$$

$$\sum_{ki \in \Omega_l} P_{ki,d} - \sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij,d} + R_{ij} I_{ij,d}^{qdr}) + \sum_{ki \in \Omega_{ch}} P_{ki,d}^{ch} - \sum_{ki \in \Omega_{ch}} P_{ij,d}^{ch} \quad (43)$$

$$+ P_{i,d}^S = P_{i,d}^D \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d$$

$$\sum_{ki \in \Omega_l} Q_{ki,d} - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q + X_{ij} I_{ij,d}^{qdr}) + \sum_{ki \in \Omega_{ch}} Q_{ki,d}^{ch} - \sum_{ki \in \Omega_{ch}} Q_{ij,d}^{ch} \quad (44)$$

$$+ Q_{i,d}^S + \varepsilon_{i,d} b_i^{sh} V_{i,d}^{qdr} = Q_{i,d}^D \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d$$

La ecuación (46) calcula la caída de voltaje entre nodos, la restricción (47) define la magnitud de corriente a lo largo de los ramos del sistema, (48) es análogo a la ecuación anterior, pero esta se aplica para las LLI.

$$V_{i,d}^{qdr} - 2(R_{ij} P_{ij,d} + X_{ij} Q_{ij,d}) - Z_{ij}^2 I_{ij,d}^{qdr} - V_{j,d}^{qdr} = 0 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (45)$$

$$I_{ij,d}^{qdr} V_{j,d}^{qdr} = P_{ij,d}^2 + Q_{ij,d}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (46)$$

$$I_{ij,d}^{qdr} V_{j,d}^{qdr} = (P_{ij,d}^{ch})^2 + (Q_{ij,d}^{ch})^2 \quad \forall ij \in \Omega_{ch}, \forall d \in \Omega_d \quad (47)$$

6 Componentes de la Restricción:

$I_{ij,d}^{qdr}$: Es la corriente cuadrática en el ramo (i, j) para un nivel de demanda d.

$V_{j,d}^{qdr}$: Es el voltaje cuadrático en el nodo j para el nivel de demanda d.

$P_{ij,d}^2$ y $Q_{ij,d}^2$: flujos de potencia activa y reactiva en el ramo (i, j) para el nivel de demanda d.

Ω_l : Conjunto de ramos en el sistema.

Ω_d : Conjunto de niveles de demanda.

7 Importancia:

En la optimización de sistemas eléctricos de distribución, esta restricción es fundamental para asegurar que el modelo representa correctamente las condiciones físicas del sistema, específicamente cómo la corriente y el voltaje se relacionan con los flujos de potencia en la red.

Esta restricción debe ser manejada con técnicas específicas, como la relajación cónica de segundo orden (SOCP), para convertirla en una forma convexa que sea más manejable para los solvers de

optimización, lo que facilita encontrar soluciones óptimas o cercanas al óptimo en un tiempo razonable.

La ecuación (49) controla el voltaje entre nodos donde se encuentre una LLI, la variable binaria determina si los voltajes entre nodos pueden variar libremente (si la LLI está abierta) o en caso de que los voltajes deben ser iguales (si la LLI se encuentra cerrada).

$$|V_{j,d}^{qdr} + V_{i,d}^{qdr}| \leq (\bar{V}^2 - \underline{V}^2)(1 - w_{ij}) \quad (48)$$

Las ecuaciones (50), (51) y (55) permiten colocar los límites operacionales para las LLI, solo en caso de que la llave sea accionada mientras que las restricciones (53) y (54) definen los límites operacionales de voltaje y corriente en el sistema. La ecuación (52) junto con las ecuaciones de balance de potencia aseguran que la red mantenga su radicalidad y finalmente (55) define a las variables binarias que representan la operación de los capacitores y LLI en la red.

$$|P_{ij,d}^{ch}| \leq (\bar{V}\bar{I}_{ij}^{ch})w_{ij} \quad (49)$$

$$|Q_{ij,d}^{ch}| \leq (\bar{V}\bar{I}_{ij}^{ch})w_{ij} \quad (50)$$

$$|\Omega_l| + \sum_{ij \in \Omega_{ch}} w_{ij} = |\Omega_b| - 1 \quad (51)$$

$$\underline{V}^2 \leq V_{i,d}^{qdr} \leq \bar{V}^2 \quad (52)$$

$$0 \leq I_{ij,d}^{qdr} \leq \bar{I}_{ij}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (53)$$

$$0 \leq I_{ij,d}^{ch,qdr} \leq (\bar{I}_{ij}^{ch})^2 w_{ij} \quad \forall ch \in \Omega_{ch}, \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (54)$$

$$\varepsilon_{i,d}, w_{ij} \text{ binario} \quad (55)$$

Al ser un problema complejo, se realiza un proceso de convexificación para que la solución sea cercana o equivalente al problema no lineal original. Las ecuaciones que albergan no linealidades son (47)-(48) y en caso de que se incluya como variable la operación de los capacitores, un término en la ecuación (45) debe ser reformulado.

Con el término de la operación de los capacitores se procede a incluir una variable auxiliar $Q_{i,d}^{sh}$ la misma que describe a la ecuación (45) y aumenta una nueva restricción que alberga la no

linealidad como se muestra a continuación.

$$\sum_{ki \in \Omega_l} Q_{ki,d} - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q + X_{ij} I_{ij,d}^{qdr}) + \sum_{ki \in \Omega_{ch}} Q_{ki,d}^{ch} - \sum_{ki \in \Omega_{ch}} Q_{ij,d}^{ch} \quad (56)$$

$$+ Q_{i,d}^S + Q_{i,d}^{Sh} = Q_{i,d}^D \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d$$

$$Q_{i,d}^{Sh} = \varepsilon_{i,d} b_i^{sh} V_{i,d}^{qdr} \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (57)$$

Por consiguiente, se aplica la formulación de Fortuny Amat o disyuntiva, en donde se reemplaza la ecuación (57) por dos, las mismas que mantienen una variable discreta, pero eliminan la no linealidad de la restricción. Esta formulación es equivalente y no se la considera como relajación ya que la respuesta de esta reformulación es igual a la del problema original. Las ecuaciones se presentan a continuación:

$$-\varepsilon_{i,d} (b_i^{sh} \bar{V}^2) \leq Q_{i,d}^{Sh} \leq \varepsilon_{i,d} (b_i^{sh} \bar{V}^2) \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (58)$$

$$-(b_i^{sh} \bar{V}^2)(1 - \varepsilon_{i,d}) \leq Q_{i,d}^{Sh} - b_i^{sh} V_{i,d}^{qdr} \leq (b_i^{sh} \bar{V}^2)(1 - \varepsilon_{i,d}) \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \quad (59)$$

Para generar el modelo relajado se substituye las ecuaciones 61-62 por las siguientes.

$$I_{ij,d}^{qdr} V_{j,d}^{qdr} \geq P_{ij,d}^2 + Q_{ij,d}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (60)$$

$$I_{ij,d}^{qdr} V_{j,d}^{qdr} \geq (P_{ij,d}^{ch})^2 + (Q_{ij,d}^{ch})^2 \quad \forall ij \in \Omega_{ch}, \forall d \in \Omega_d \quad (61)$$

Esto se debe a que el problema de reconfiguración cumple con las siguientes particularidades, la función objetivo considera la reducción de pérdidas PA, las resistencias en los ramos son diferentes de cero, la operación del SED es radial y que los variables de voltaje y corriente son cuadráticas.

7.1 Contextualización de variables

7.1.1 Variables independientes

Son las variables que se controlan, manipulan durante la investigación, tales como:

- Revisión bibliográfica y métodos matemáticos.
- Formulación matemática del SED, reconfiguración óptima y relajación cónica de segundo

orden.

- Simulación del problema de la PC2O y software Python.

7.1.2 Variables dependientes

Son los resultados del problema, tales como:

- Minimización de la función objetivo.
- Pérdidas PA.
- Perfil de voltaje.

7.2 Diagrama de flujo

La propuesta consiste en emplear un modelo de optimización basado en la función objetivo junto a sus restricciones para resolver el problema de la reconfiguración óptima del SED en 34 y 118 barras IEEE. En la Figura 5, se detalla un procedimiento general, el cual constan de diversas bibliotecas, asignación de datos iniciales, generación de los modelos inicial (sin LLI) y de optimización (con LLI), visualización de los resultados y registros correspondientes (variables dependientes).

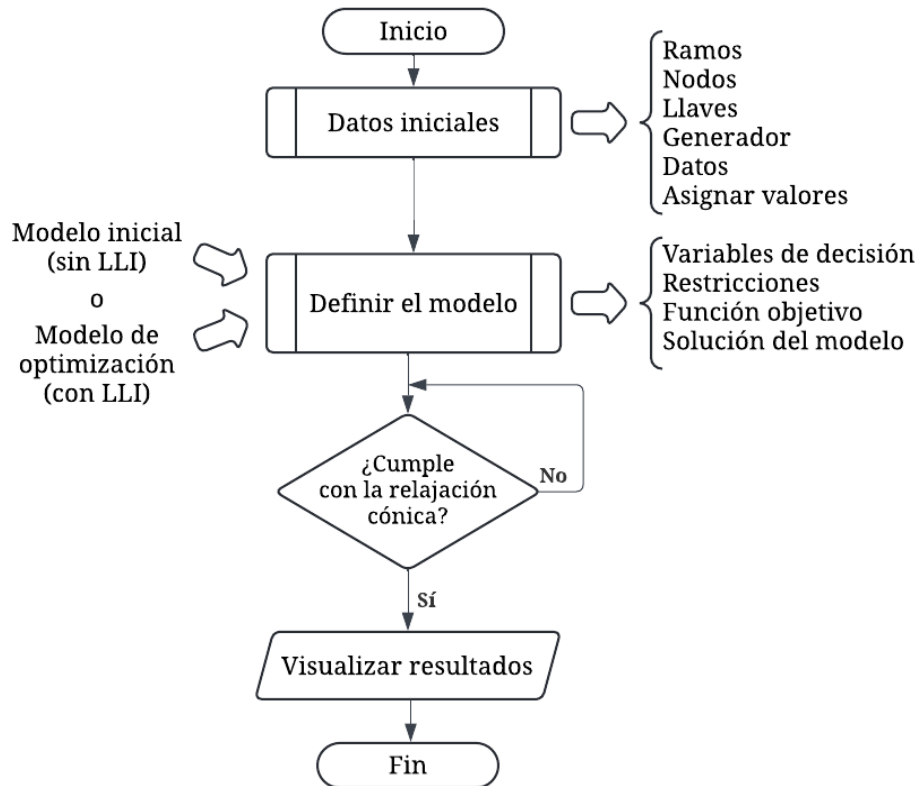


Figura 5. Diagrama de flujo del modelo de optimización

Previo a la carga de datos iniciales y demás procesos del modelo, se importan las siguientes bibliotecas (ver Anexo 2):

- **Pandas.** Utiliza la tabla Dataframe para examinar, limpiar y procesar los datos iniciales de entrada.
- **Pyomo.** Se emplea para la resolución del modelo de optimización con la herramienta Bonmin.
- **Logging.** Se aplica para generar registros de error durante la ejecución del modelo.
- **Networkx.** Con ella, se visualizan los grafos de los casos de estudio.
- **Matplotlib.** Genera cualquier tipo de gráficas de resultados.
- **Numerical Python (NumPy).** Creación de tuplas o listas.

7.3 Datos de entrada

Los valores iniciales corresponden a ciertas características de los ramos, nodos, LLI, generador y

datos. Por medio de las tablas siguientes, se presenta un formato estándar:

- Impedancia (resistencia R (Ω), reactancia X (Ω)) y corriente máxima $I_{m\acute{a}x}$ (A), tal como se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3. Ramos de la IEEE 34 y 118

IEEE 34 barras						IEEE 118 barras					
Ramos	Desde	Hasta	R[Ω]	X[Ω]	Imáx	Ramos	Desde	Hasta	R[Ω]	X[Ω]	Imáx
1	1	2	0,117	0,048	600	1	1	2	0,036	0,01296	3000
2	2	3	0,1073	0,044	600	2	2	3	0,033	0,01188	3000
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
32	32	33	0,1572	0,027	100	116	116	117	0,405	0,367	3000
33	33	34	0,1048	0,018	100	117	117	118	0,489	0,438	3000

- Tres demandas por cada PA y PR, expresadas en kW y kVA_r; respectivamente, tal como se indica en la Tabla 4.

Tabla 4. Nodos de la IEEE 34 y 118

IEEE 34 barras							IEEE 118 barras						
Bus	PA (kW)			PR (kVA _r)			Bus	PA (kW)			PR (kVA _r)		
	1	2	3	1	2	3		1	2	3	1	2	3
1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
2	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	2	133,8	140,53	147,224	101,14	106,2	111,25
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
33	32,3	19	11,4	21,2	12,5	7,5	117	48,78	51,225	53,6635	29,156	30,61	32,07
34	32,3	19	11,4	21,2	12,5	7,5	118	33,9	35,595	37,29	18,98	19,93	20,88

- Estados LLI (ver Tabla 5), junto a parámetros como la resistencia R (Ω) y Corriente I (A).

Tabla 5. LLI en la IEEE 34 y 118

IEEE 34					IEEE 118				
Desde	Hasta	R[Ω]	I (A)	Estado	Desde	Hasta	R[Ω]	I (A)	Estado
1	2	0,001	600	Cerrado	46	27	0,5258	3000	Abierto
16	23	0,001	200	Abierto	17	27	0,5258	3000	Abierto
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
4	34	0,001	200	Abierto	106	107	0.156	3000	Abierto
5	12	0,001	200	Abierto	34	35	0.154	3000	Abierto

- Para los nodos IEEE 34 y 118, el generador situado en el bus 1.
- Los datos se refieren a los voltajes nominales V_{nom} de 6,35 (IEEE 34) y 11 kV (IEEE 118).

No obstante, la información total se refleja a través de las Tablas en los Anexos 2 y 3.

7.4 Métodos de cálculo

7.4.1 Modelo inicial

El modelo inicial contempla una serie de procesos para establecer la función objetivo, restricciones, variables de decisión y otros parámetros, a fin de resolverlo y almacenar sus resultados, tal como se designa en la Figura 6.

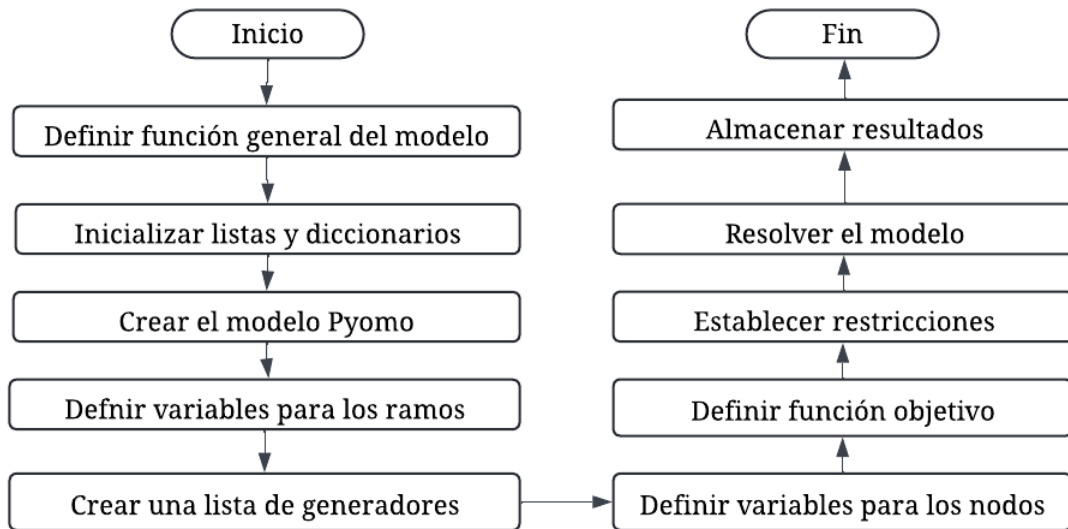


Figura 6. Modelo inicial

Se incluye y crea la biblioteca “Pyomo.environ”, para buscar la solución posible del modelo. A continuación, se describe el proceso de la Figura 6:

Definición general del modelo.

- Se establece una función general del modelo que contiene ramos, nodos, generador y datos.

Inicialización de listas y diccionarios.

- Los diccionarios para el stock de las variables, detalladas en la Tabla 6.

Tabla 6. Diccionarios para las variables del modelo inicial

Variables		Modelo inicial	
		(Apartado 1.2.6)	Python (Anexo 3)
En cada ramo	Corriente cuadrada	$I_{ij,d}^{qdr}$	Iqdr = { }
	PA	$P_{ij,d}$	Pij = { }
	PR	$Q_{ij,d}$	Qij = { }
En cada nodo	PA	$P_{i,d}^S$	Psi = { }
	PR	$Q_{i,d}^S$	Qsi = { }
	Voltaje cuadrado	$V_{i,d}^{qdr}$	Vqdr = { }

- Una lista para el almacenamiento de los resultados iniciales.

Modelo concreto.

- Se forma un modelo concreto con la biblioteca Pyomo y se definen los valores mínimo y máximo de voltaje. Para ello, se escoge un $\pm 20\%$ del V_{nom} .

$$0,8V_{nom} \leq V_{nom} \leq 1.2V_{nom} \quad (62)$$

Dominio de las variables para los ramos.

- El dominio de la corriente $I_{ij,d}^{qdr}$, PA ($P_{ij,d}$) y PR ($Q_{ij,d}$) en cada ramo pertenece a los reales no negativos, es decir, todos los valores mayores e iguales a cero, equivalente a $[0, +\infty]$; tal como se indica en la ecuación (63).

$$\begin{cases} I_{ij,d}^{qdr} \in [0, +\infty] \\ P_{ij,d} \in [0, +\infty] \\ Q_{ij,d} \in [0, +\infty] \end{cases} \quad (63)$$

Lista de generadores.

- Se crea una lista de generadores que existen en el caso de estudio.

Dominio de variables para los nodos.

- El dominio del voltaje $V_{i,d}^{qdr}$ pertenece a los números reales \mathbb{R} entre $[(0,8V_{nom})^2, (1,2V_{max})^2]$. Además, parte de la variable inicial cuyo valor es $(V_{nom})^2$, tal como se designa en la Ecuación (64).

$$\begin{cases} V_{i,d}^{qdr} \in \mathbb{R} \\ V_{i,d}^{qdr} \in [(0,8V_{nom})^2, (1,2V_{max})^2] \\ V_{i,d}^{qdr} \text{ inicial} = (V_{nom})^2 \end{cases} \quad (64)$$

- El dominio de la PA ($P_{i,d}^S$) y PR ($Q_{i,d}^S$) en cada nodo corresponde a todos los valores reales no negativos, es decir, todos los valores mayores e iguales a cero, equivalente a $[0, +\infty]$, visto en la Ecuación (65).

$$\begin{cases} P_{i,d}^S \in [0, +\infty] \\ Q_{i,d}^S \in [0, +\infty] \end{cases} \quad (65)$$

Función objetivo, ver Ecuación (28).

$$\min v = \sum_{d \in \Omega_d} \sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} I_{ij,d}^{qdr}$$

Restricciones.

- Balance PA, ver Ecuación (29).

$$\sum_{ki \in \Omega_l} P_{ki,d} - \sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij,d} + R_{ij} I_{ij,d}^{qdr}) + P_{i,d}^S = P_{i,d}^D \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d$$

- Balance PR, ver Ecuación (30).

$$\sum_{ki \in \Omega_l} Q_{ki,d} - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ij,d} + X_{ij} I_{ij,d}^{qdr}) + Q_{i,d}^S = Q_{i,d}^D \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d$$

- Caída de tensión, ver Ecuación (31).

$$v_{i,d}^{qdr} - 2(R_{ij}P_{ij,d} + X_{ij}Q_{ij,d}) - Z_{ij}^2 I_{ij,d}^{qdr} - V_{j,d}^{qdr} = 0 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d$$

- Corriente en el ramo, ver Ecuación (32).

$$I_{ij,d}^{qdr} V_{j,d}^{qdr} = P_{ij,d}^2 + Q_{ij,d}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d$$

Resolución del modelo.

- Se resuelve el modelo al aplicar el algoritmo de solución Bonmin de tipo B-BB, con la siguiente función: `solver = pyo.SolverFactory('bonmin')`.
- Se almacenan los resultados iniciales con la función: `results = solver.solve(model)`.

Devolución de resultados.

- La función devuelve los resultados iniciales tras resolver el modelo en formato XLSX.

7.4.2 Modelo de optimización

El modelo relajado de reconfiguración del SED presenta un procedimiento similar a la inicial, salvo que en esta ocasión se agregan los LLI, junto a otras funciones y parámetros para llevar a cabo el modelo final.

Como punto de partida, se declaran las siguientes bibliotecas:

- `Pyomo.environ`: base para definir el modelo concreto, componentes y herramientas de solución de problemas.
- `Logging`: muestra advertencias de error.
- De `Pyomo.util.infeasible` se utiliza la librería `log_infeasible_constraints`.

En la Figura 7 se observa un procedimiento para la resolución del modelo de optimización, descritos a continuación:

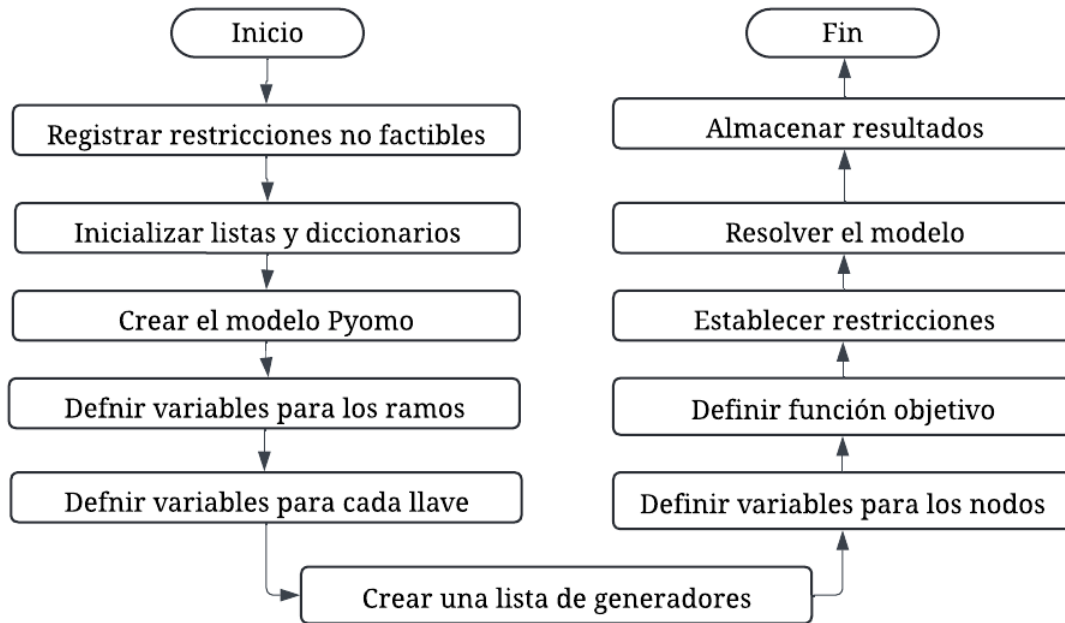


Figura 7. Procedimiento del modelo final

Registro de restricciones no factibles

Se emplea la función denominada `log_infeasible_constraints` para detectar y registrar las restricciones no viables del modelo, es decir que no se pueden cumplir; lo cual ayuda al diagnóstico de problemas de la PNLEM.

Inicialización de listas y diccionarios.

- Los diccionarios para el stock de las variables, designados en la Tabla 7.

Tabla 7. Diccionarios para las variables del modelo final

Variables		Modelo final	
		(Apartado 2.6)	Python (Anexo 3)
En cada ramo	Corriente cuadrada	$I_{ij,d}^{qdr}$	Iqdr = {}
	PA	$P_{ij,d}$	Pij = {}
	PR	$Q_{ij,d}$	Qij = {}
En cada nodo	PA	$P_{i,d}^S$	Psi = {}
	PR	$Q_{i,d}^S$	Qsi = {}
	Voltaje cuadrado	$V_{i,d}^{qdr}$	Vqdr = {}
	Llaves	w_{ij}	W = {}
	Corriente cuadrada	\bar{I}_{ij}^{ch}	Ichsqr = {}

Límites de operación para las LLI	PA	$P_{ij,d}^{ch}$	Pch = { }
	PR	$Q_{ij,d}^{ch}$	Qch = { }

- Tres listas para el almacenamiento de los resultados de corriente, voltaje y LLI.

Modelo concreto.

- Se crea un modelo concreto Pyomo y de la Ecuación (66), se establecen los valores mínimo y máximo de voltaje [38].

$$0,8V_{nom} \leq V_{nom} \leq 1.2V_{nom} \quad (66)$$

Dominio de las variables para los ramos.

- Se define el dominio de la corriente, PA y PR con sus respectivos dominio y límites, tal como se detalla en la Ecuación (67) [38]. Además, se inicializan con los valores obtenidos del modelo de partida del Apartado 4.5.1.

$$\begin{cases} I_{ij,d}^{qdr} \in \mathbb{R} \geq 0 \cap [0, I_{max}^2] \\ P_{ij,d} \in \mathbb{R} \geq 0 \\ Q_{ij,d} \in \mathbb{R} \geq 0 \end{cases} \quad (67)$$

Dominio de las variables para cada llave.

- Se establece el dominio y límites del estado de operación, corriente, PA y PR del LLI, visto en la Ecuación (68) [38]. Además, cabe mencionar que el valor inicial de cada parámetro es nulo.

$$\begin{cases} w_{ij} \in \mathbb{Z} \geq 0 \cap [0,1] \\ \bar{I}_{ij}^{ch} \in \mathbb{R} \geq 0 \\ P_{ij,d}^{ch} \in \mathbb{R} \geq 0 \\ Q_{ij,d}^{ch} \in \mathbb{R} \geq 0 \end{cases} \quad (68)$$

Lista de generadores.

- Se implementa una lista de generadores que existen en el caso de estudio.

Dominio de variables para los nodos.

- De la Ecuación (69), se establece el dominio, límite e inicialización del voltaje [38].

$$\begin{cases} V_{i,d}^{qdr} \in \mathbb{R} \\ V_{i,d}^{qdr} \in [(0,8V_{nom})^2, (1,2V_{max})^2] \\ V_{i,d}^{qdr} \text{ inicial} = (V_{nom})^2 \end{cases} \quad (69)$$

- De la Ecuación (70), se define los dominios de PA y PR [38]. Además, se inicializan con los parámetros obtenidos del modelo de partida (Apartado 4.5.1).

$$\begin{cases} P_{i,d}^S \in [0, +\infty] \\ Q_{i,d}^S \in [0, +\infty] \end{cases} \quad (70)$$

Función objetivo.

$$\min v = \sum_{d \in \Omega_d} c_d^{ls} \alpha_d \left(\sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij} I_{ij,d}^{qdr} + \sum_{ij \in \Omega_l} R_{ij}^{ch} I_{ij,d}^{ch,qdr} \right) \quad (71)$$

Sujeto a.

Ecuaciones de Balance de Potencia

$$\begin{aligned} \sum_{ki \in \Omega_l} P_{ki,d} - \sum_{ij \in \Omega_l} (P_{ij,d} + R_{ij} I_{ij,d}^{qdr}) + \sum_{ki \in \Omega_{ch}} P_{ki,d}^{ch} - \sum_{ki \in \Omega_{ch}} P_{ij,d}^{ch} \\ + P_{i,d}^S = P_{i,d}^D \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \end{aligned} \quad (72)$$

$$\begin{aligned} \sum_{ki \in \Omega_l} Q_{ki,d} - \sum_{ij \in \Omega_l} (Q_{ij,d} + X_{ij} I_{ij,d}^{qdr}) + \sum_{ki \in \Omega_{ch}} Q_{ki,d}^{ch} - \sum_{ki \in \Omega_{ch}} Q_{ij,d}^{ch} \\ + Q_{i,d}^S + Q_{i,d}^{Sh} = Q_{i,d}^D \quad \forall i \in \Omega_b, \forall d \in \Omega_d \end{aligned} \quad (73)$$

Ecuación de Perdida Voltaje

$$V_{i,d}^{qdr} - 2(R_{ij} P_{ij,d} + X_{ij} Q_{ij,d}) - Z_{ij}^2 I_{ij,d}^{qdr} - V_{j,d}^{qdr} = 0 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (74)$$

Restricción de Corriente en el Ramo

$$I_{ij,d}^{qdr} V_{j,d}^{qdr} \geq P_{ij,d}^2 + Q_{ij,d}^2 \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (75)$$

Restricción de Corriente por la LLI

$$I_{ij,d}^{qdr} V_{j,d}^{qdr} \geq (P_{ij,d}^{ch})^2 + (Q_{ij,d}^{ch})^2 \quad \forall ij \in \Omega_{ch}, \forall d \in \Omega_d \quad (76)$$

Restricción de PA y PR máximos en LLI

$$|P_{ij,d}^{ch}| \leq (\bar{V} \bar{I}_{ij}^{ch}) w_{ij} \quad (77)$$

$$|Q_{ij,d}^{ch}| \leq (\bar{V} \bar{I}_{ij}^{ch}) w_{ij} \quad (78)$$

Restricción de Radialidad

$$|\Omega_l| + \sum_{ij \in \Omega_{ch}} w_{ij} = |\Omega_b| - 1 \quad (79)$$

El modelo es un problema de PC2O entero mixto que es equivalente al PNLEM. Además, es convexo por lo que sí existe una solución del modelo, este garantiza que es mínimo.

Resolución del modelo.

- Se resuelve el modelo al emplear el algoritmo de solución Bonmin de tipo B-BB, con la siguiente función: `solver = pyo.SolverFactory('bonmin')`.
- Se establece un número máximo de iteraciones para que encuentre una solución óptima.
- Se define un factor de reducción para que el algoritmo reduzca la inviabilidad de la solución actual en un 90%.
- Se almacenan los resultados de corriente y voltaje con la función: `results = solver.solve(model)`.

Devolución de resultados.

La función devuelve los resultados tras resolver el modelo en formato XLSX.

7.4.3 Visualización del modelo

La visualización del modelo consiste en dos partes, una donde se crea el grafo del SED con LLI y una segunda parte que incluye una gráfica de barras de las corrientes en base a las tres demandas establecidas en los nodos (ver Anexos 2 y 3). Por medio de la Figura 8, se observa el procedimiento para la creación del grafo y descrito a continuación:

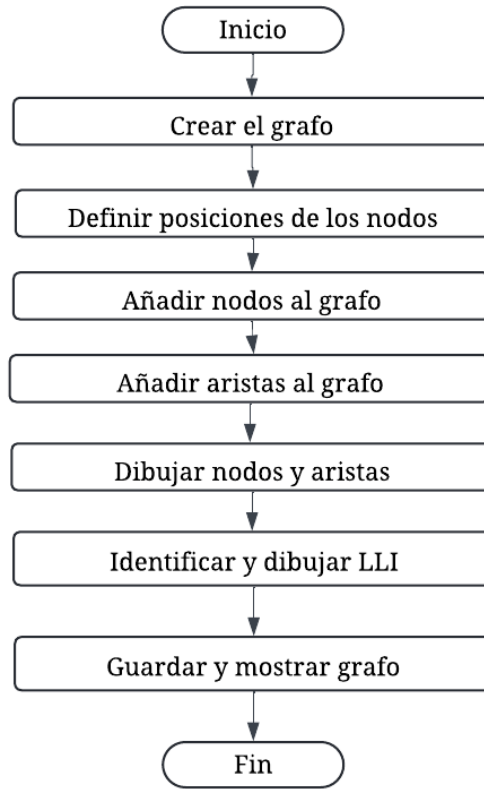


Figura 8. Grafo del modelo final

- Como punto de inicio, se establecen las bibliotecas Networkx (nx) y Matplotlib (plt).

Grafo del modelo de optimización.

- Se utiliza un objeto denominado $G = nx.Graph()$ para representar la red.

Posiciones de los nodos.

- Se establece un diccionario $positions = \{ \}$ para agregar las coordenadas (x, y) de los nodos en el espacio. Estas posiciones provienen de los datos de entrada, detallados en la Tabla 8 y Anexo 3-Anexo 4.

Tabla 8. Posición de los nodos en la IEEE 34 y 118

IEEE 34			IEEE 118		
Bus	Coordenadas en el espacio		Bus	Coordenadas en el espacio	
	x	y		x	y
1	0	0	1	60	360
2	1	0	2	120	120
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

33	3	-2	117	320	580
34	2	-2	118	360	580

Adición de nodos.

- En base a las posiciones definidas en el paso anterior, se agregan los nodos al grafo; a través de la función $G.add_nodes_from(positions)$.

Adición de aristas.

- Se agregan aristas al grafo, estas representan la conexión entre los nodos, tal como se observa en la Tabla 9.

Tabla 9. Aristas al grafo de los nodos IEEE 34 y 118

IEEE 34 barras			IEEE 118 barras		
Ramos	Posición 1	Posición 2	Ramos	Posición 1	Posición 2
	Desde	Hasta		Desde	Hasta
1	1	2	1	1	2
2	2	3	2	2	3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
32	32	33	116	116	117
33	33	34	117	117	118

Dibujo de los nodos y aristas.

Por medio de la biblioteca Matplotlib, se dibujan los nodos y aristas. En la Figura 9, se observa la conversión del modelo IEEE de 34 barras al grafo correspondiente. En este ejemplo, se omite el dibujo de las LLI.

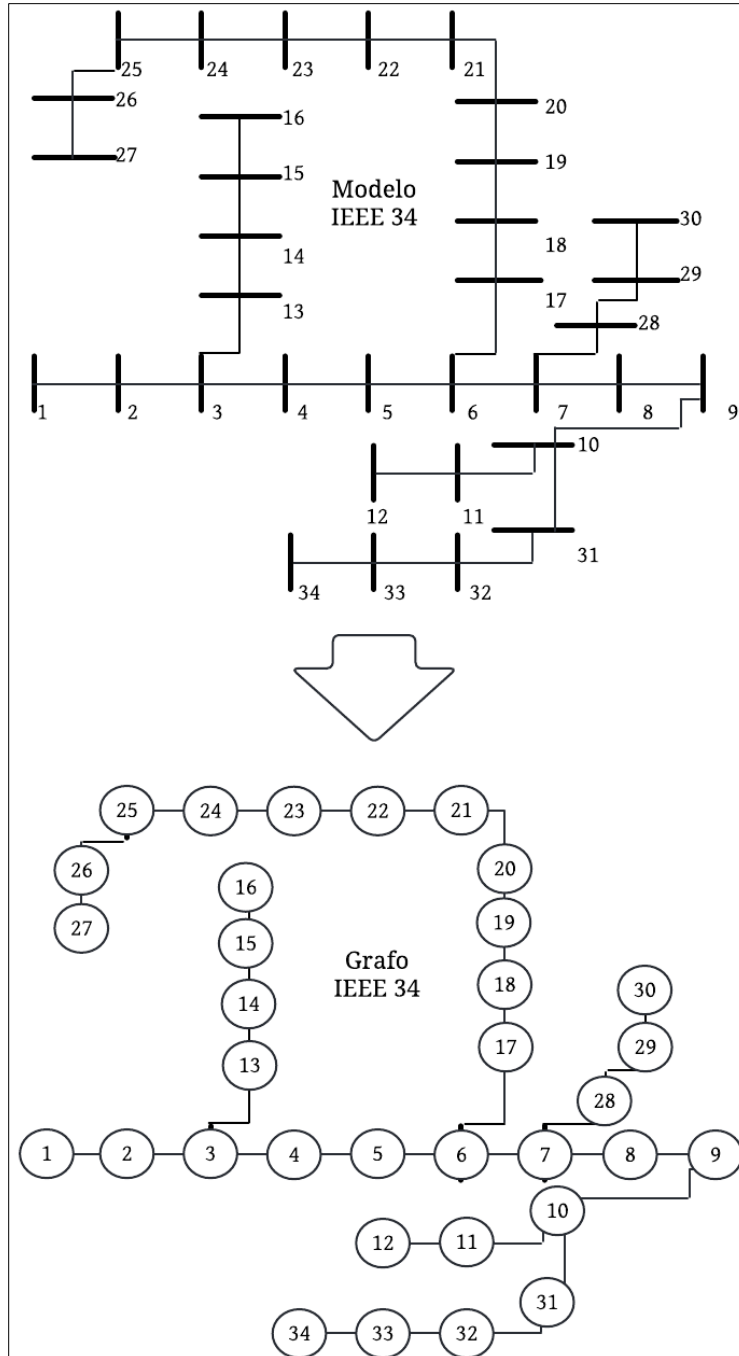


Figura 9. Ejemplo del grafo IEEE 34 sin LLI

Identificación LLI.

- Se identifican los LLI cerrados y se dibujan con líneas de color rojo, tal como se muestra en el ejemplo de la Figura 10.

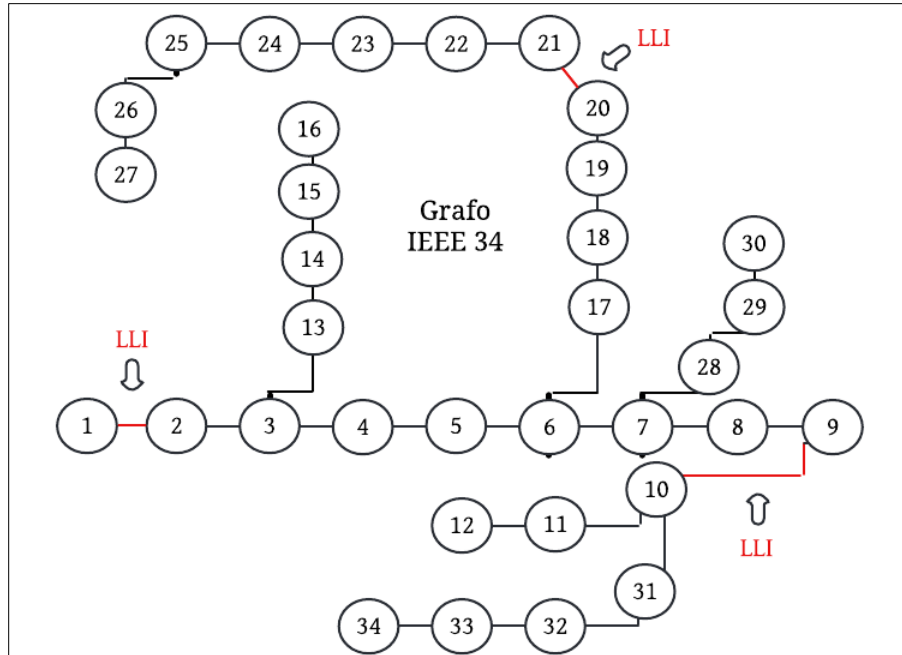


Figura 10. Ejemplo del grafo IEEE 34 con LLI

Guardar grafo.

- Con la función `plt.savefig(f'imageD_{d}.png', format = 'png')` se guarda el grafo bajo la extensión PNG.

Mostrar grafo.

- Con la función `plt.show()` se muestra el grafo del modelo de optimización.

A partir de las bibliotecas NumPy y Matplotlib se realiza lo siguiente:

Resultados en un array.

- Las corrientes calculadas se almacenan en un array (matriz) para facilitar la administración de los datos.

Posiciones y ancho de barras.

- Se establece la cantidad a ser graficadas de las barras, junto a sus posiciones. Además, se define el ancho de estas.

Figura y eje.

- Mediante un objeto, se crea una figura donde va a ser colocadas las barras, similar a la

Figura 14.

Barras para cada iteración.

- Se realiza iteraciones de los datos de corriente y estos se dibujan, a fin de formar un gráfico representativo de los valores calculados.

Guardar figura.

- Con la función `plt.savefig('Corrientes.png', format = 'png')` se guarda el gráfico de barras con extensión PNG.

Mostrar figura.

- Con la función `plt.show()` se visualiza el gráfico de barras de las corrientes calculadas.

8 ANÁLISIS DE RESULTADOS

8.1 Análisis de Casos Base

Una vez ya definido el modelo a implementarse se describen a continuación los casos bases a ser utilizados para la aplicación del modelo antes descrito. El primer caso consiste en un SED de 34 nodos, que consiste en un troncal principal cuya barra conectada a la subestación es la barra 1, pero no incluye las LLI, de esta forma podemos comparar cual es el impacto del uso de LLI una vez colocadas en el sistema. En la Figura 11, se presenta una representación gráfica de la red de 34 nodos; mientras que en la Figura 12, se destaca un sistema modificado y se añaden 6 LLI.

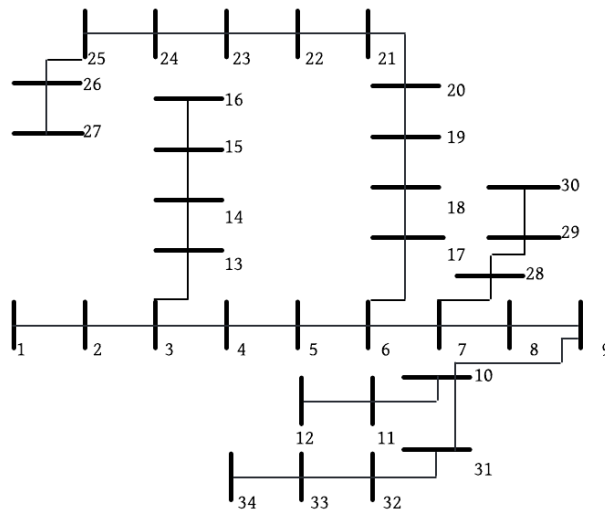


Figura 11. Sistema de 34 nodos sin LLI

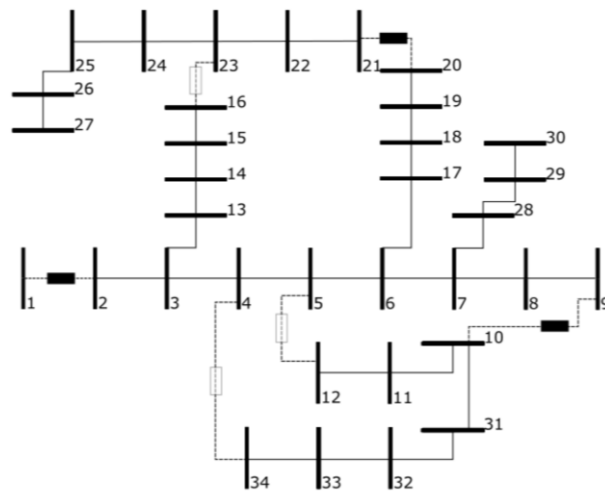


Figura 12. Sistema de 34 nodos con LLI

El segundo caso por utilizarse es un SED con 118 nodos (ver Figura 13) que puede ser encontrado a lo largo de la literatura debido a que es un caso de prueba. Sin embargo, la diferencia radica en que este sistema posee más llaves de LLI. Es relevante destacar el número de LLI en un SED debido a que el problema crece exponencialmente con la implementación de equipos en el sistema.

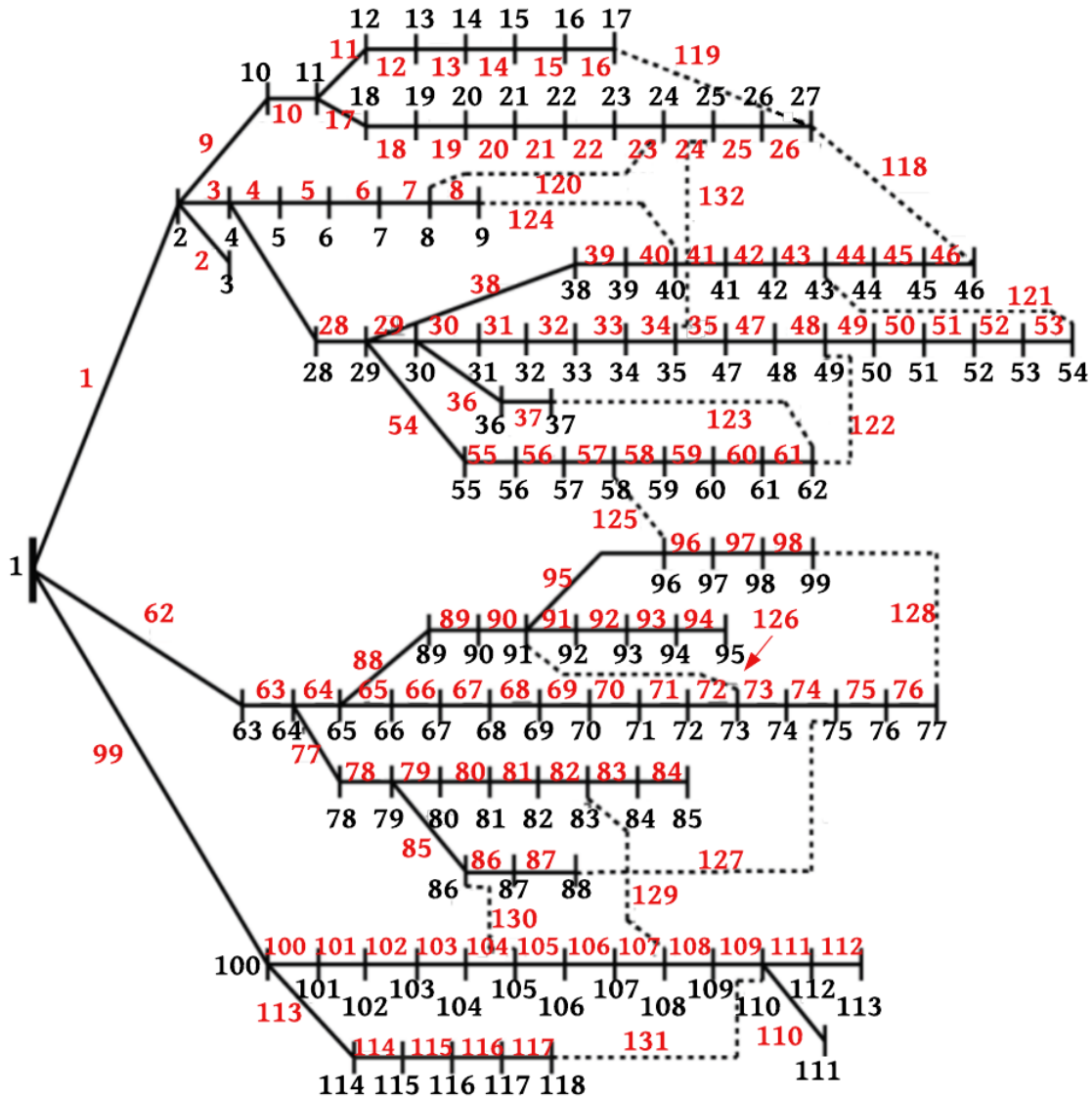


Figura 13. Sistema de 118 nodos con LLI

Para la reconfiguración del SED, el tamaño del problema se determina directamente por la cantidad de LLI presentes $N_c = |\Omega_{ch}|$ por la ecuación 2^{N_c} , es decir que el primer sistema posee un total de 64 topologías, mientras que el segundo caso posee 32768 disposiciones. De estas, un gran número de combinaciones no suelen ser prácticas, debido a que no cumplen con el requisito de radialidad.

8.2 Resultados del modelo inicial

Se realiza un análisis en los modelos iniciales, IEEE 34 y 118 nodos sin las LLI en la operación del SED, resultados de corriente, pérdidas PA y voltaje.

8.2.1 IEEE 34 sin LLI

En la Figura 14 se muestra las corrientes iniciales del modelo IEEE 34 sin LLI, en base a 3 demandas D1, D2 y D3. Además, se observa que las corrientes más altas están situadas en los primeros 5 ramos, donde I_D1, I_D2 e I_D3 alcanza un valor máximo de 425,89, 245,52 y 145,51A; respectivamente. A medida que se recorre en los ramos siguientes, las corrientes se reducen hasta un menor de 50 A, que es a partir de los ramos 10 - 15 y 25 - 33. Esto sugiere que las secciones iniciales del modelo soportan la mayor cantidad de carga en el SED.

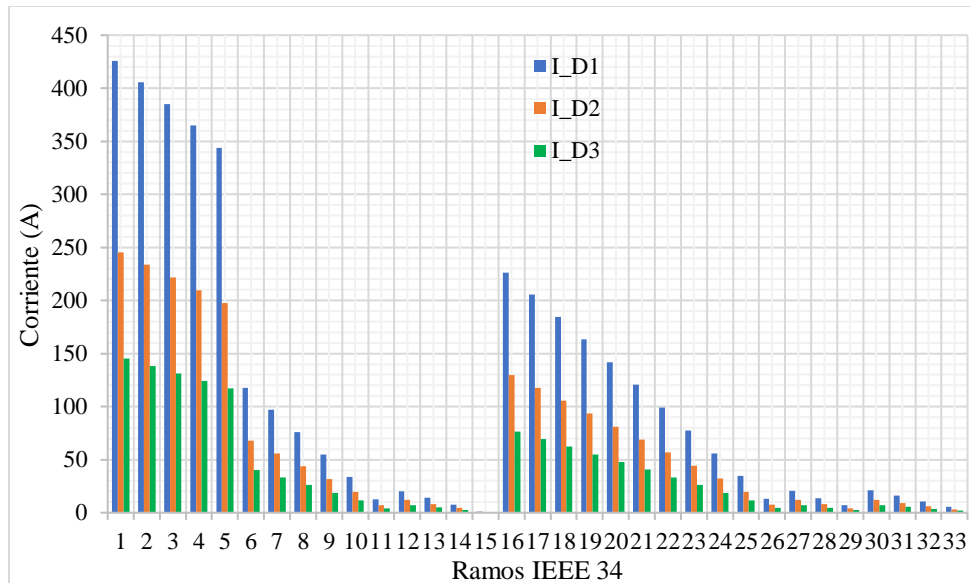


Figura 14. Corrientes iniciales para el modelo IEEE 34 sin LLI

La Figura 15 presenta las pérdidas PA iniciales sin el uso de LLI, en base a 3 demandas. Su característica es similar al de la corriente debido a la proporción directa ($P=I^2R$), por lo que se muestra como los primeros ramos son más significativos ya que ahí se sitúa la mayor cantidad de carga. Además, se observan como sus valores oscilan entre 0,07 W hasta 24,42 kW en la P_D1, el resto de las demandas P_D2 y P_D3, no sobrepasan unas pérdidas mayores a los 10 kW.

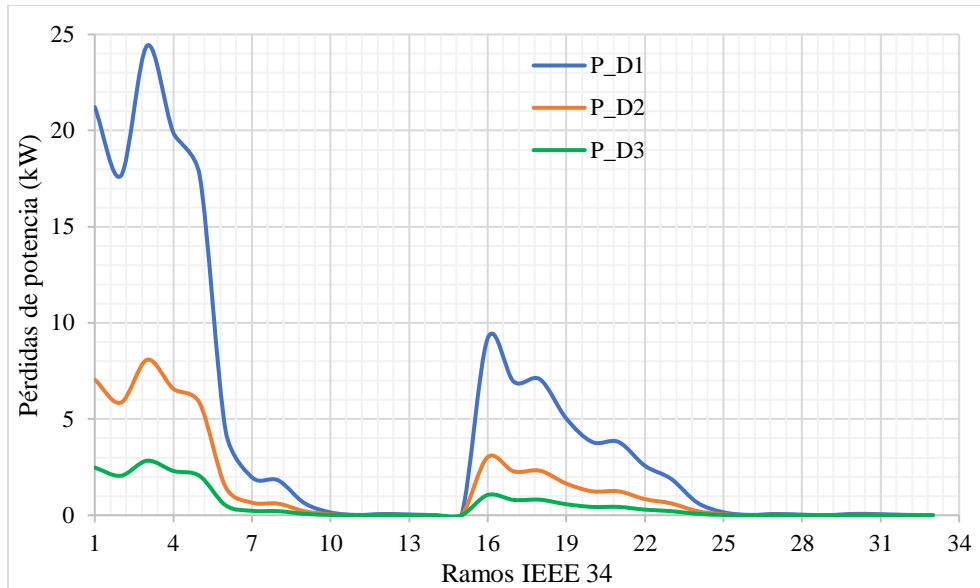


Figura 15. Pérdidas de potencias iniciales para el modelo IEEE 34 sin LLI

En la Figura 16 se indica los voltajes iniciales del modelo sin el uso de LLI, a través de 3 demandas D1, D2 y D3. Estos niveles de voltaje son relativamente constantes en todas sus barras, por lo que oscila entre un rango de 6,35 a 7,62 kV, como es el caso de V_D1; mientras que con V_D2 y V_D3 presenta un rango de $\pm 0,635$ kV; respectivamente.

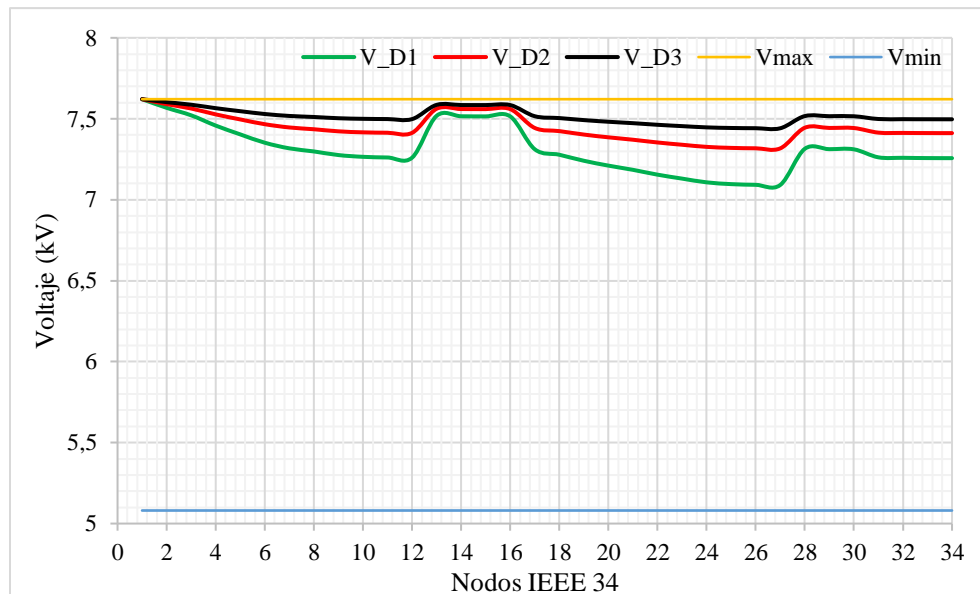


Figura 16. Voltajes iniciales para el modelo IEEE 34 sin LLI

8.2.2 IEEE 118 sin LLI

En la Figura 17 se visualiza las corrientes iniciales del modelo IEEE 118 sin LLI, en base a 3

demandas D1, D2 y D3. Los valores de corriente más alta se ubican en los ramos 1 y 3, mayores a 880 A en I_D1. De ahí con el resto de las demandas I_D2 y I_D3 no sobrepasan esa cantidad.

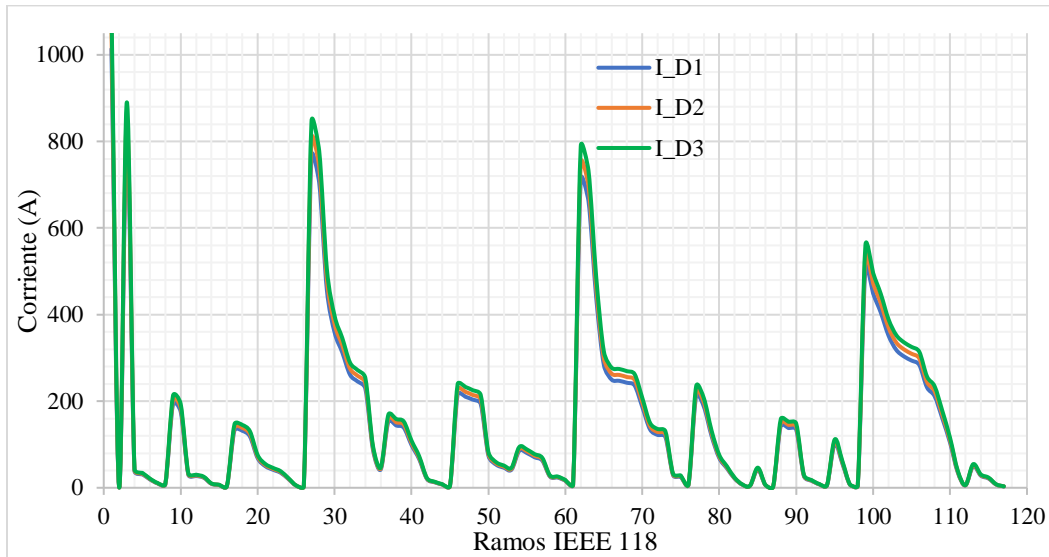


Figura 17. Corrientes iniciales para el modelo IEEE 118 sin LLI

La Figura 18 exhibe las pérdidas PA iniciales sin el uso de LLI, a través de 3 demandas y se obtienen pérdidas mayores a 45 kW en los ramos 1, 64, 69 y 103 con respecto a P_D1. En cambio, no se supera este nivel de pérdidas para las demandas P_D2 y P_D3.

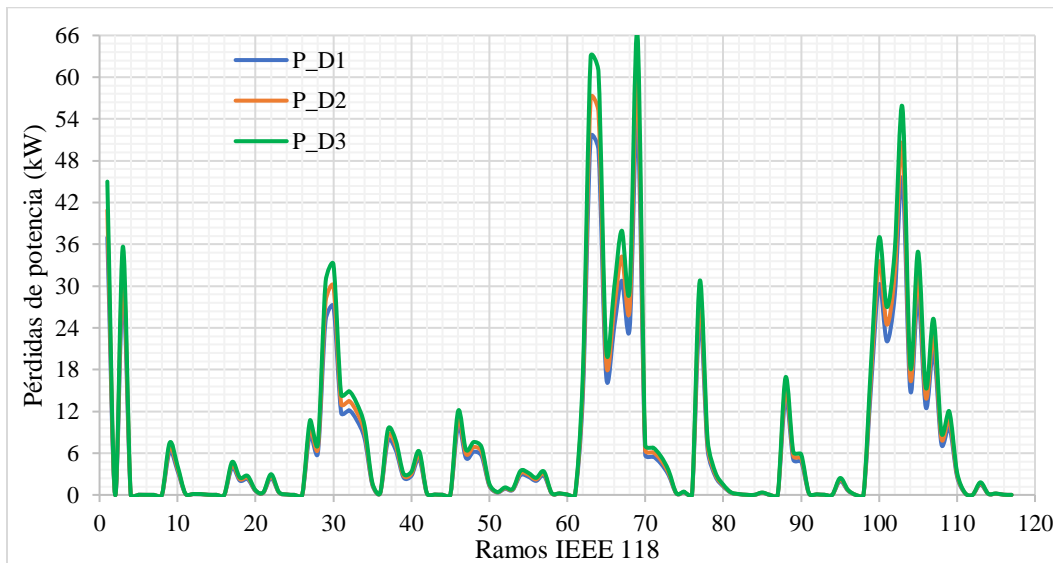


Figura 18. Pérdidas de potencias iniciales para el modelo IEEE 118 sin LLI

En la Figura 19 se ilustra los voltajes iniciales del modelo sin el uso de LLI, junto a 3 demandas D1, D2 y D3. Estos niveles de voltaje son relativamente constantes en todas sus barras a excepción

de V_D1 el cual oscila en $\pm 0,58$ kV. No obstante, los valores de voltajes en las 3 demandas no supera el $\pm 20\%$ de 11 kV.

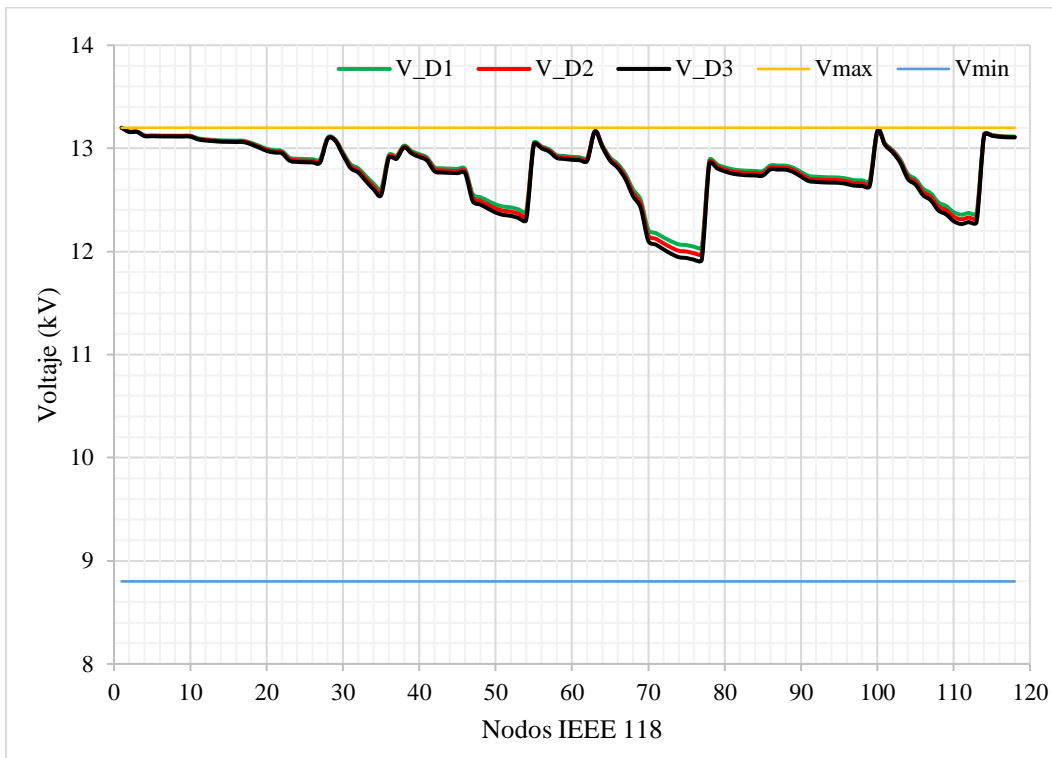


Figura 19. Voltajes iniciales para el modelo IEEE 118 sin LLI

8.3 Resultados del modelo final

Se elabora un análisis en los modelos finales, IEEE 34 y 118 nodos de la reconfiguración óptima del SED con el uso de LLI. De esta manera, se obtiene los resultados de corriente, pérdidas PA y voltaje.

8.3.1 IEEE 34 con LLI

En la Figura 20 se muestra la reconfiguración óptima SED con el uso de las LLI, estas se ubican entre las barras 1-2, 20-21 y 4-34. Cabe mencionar, que las 3 demandas caen en las mismas posiciones.

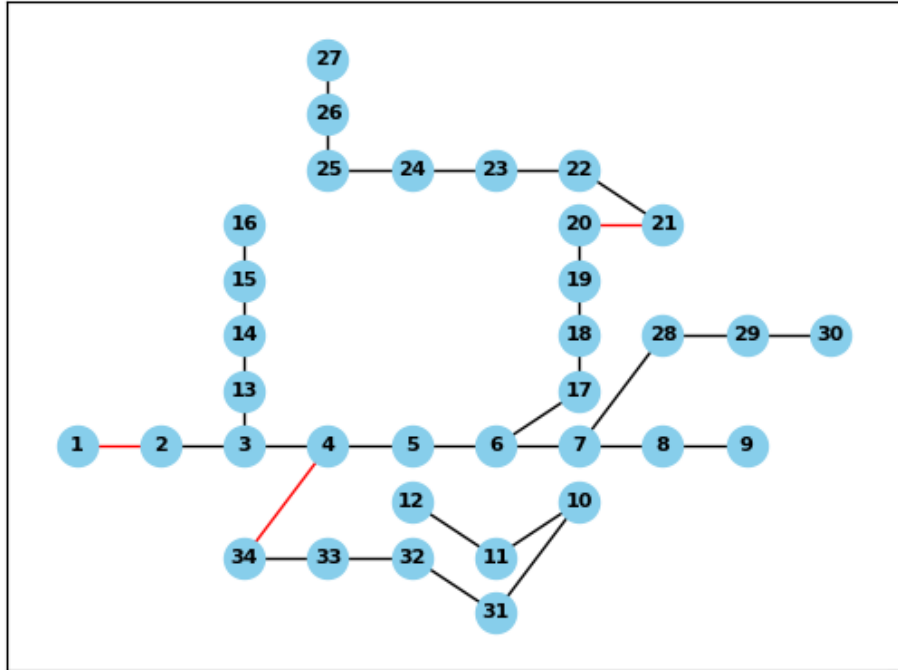


Figura 20. Resultado de reconfiguración LLI para el modelo IEEE 34

En la Figura 21 se indica las corrientes iniciales del modelo IEEE 34 con LLI, mediante 3 demandas D1, D2 y D3. Además, se observa que las corrientes más altas están situadas en los primeros 5 ramos, donde I_{D1} , I_{D2} e I_{D3} alcanza un valor máximo de 419,76, 241,28 y 144,04A; respectivamente. A medida que se recorre en los ramos siguientes, las corrientes se reducen hasta un menor de 100 A, que es a partir de los ramos 6 - 15 y 22 - 33. Esto sugiere que las secciones iniciales del modelo soportan la mayor cantidad de carga en el SED.

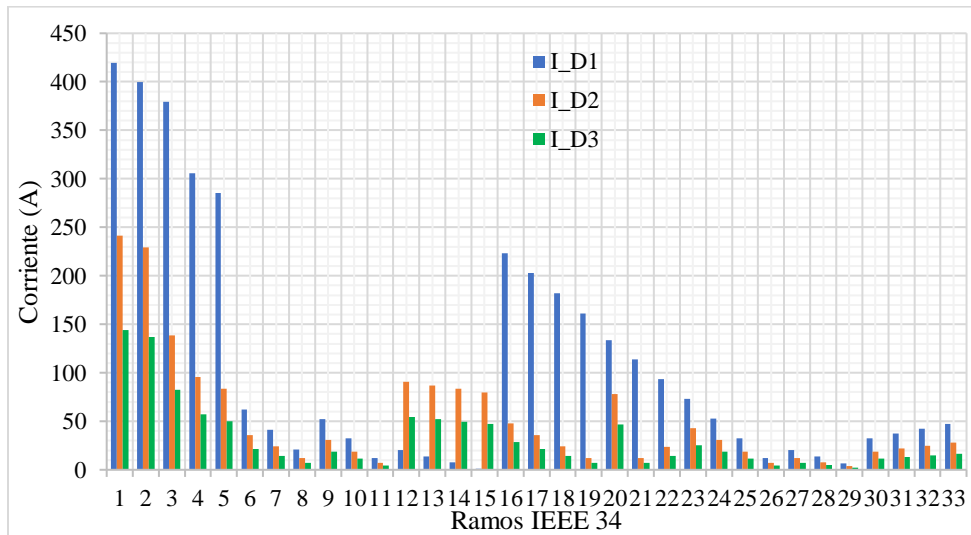


Figura 21. Corrientes para el modelo IEEE 34 con LLI

La Figura 22 exhibe las pérdidas PA iniciales con el uso de LLI, en base a 3 demandas y se obtienen pérdidas mayores a 10 kW en los ramos 2 al 6 con respecto a P_D1. En cambio, no se supera este nivel de pérdidas para las demandas P_D2 y P_D3.

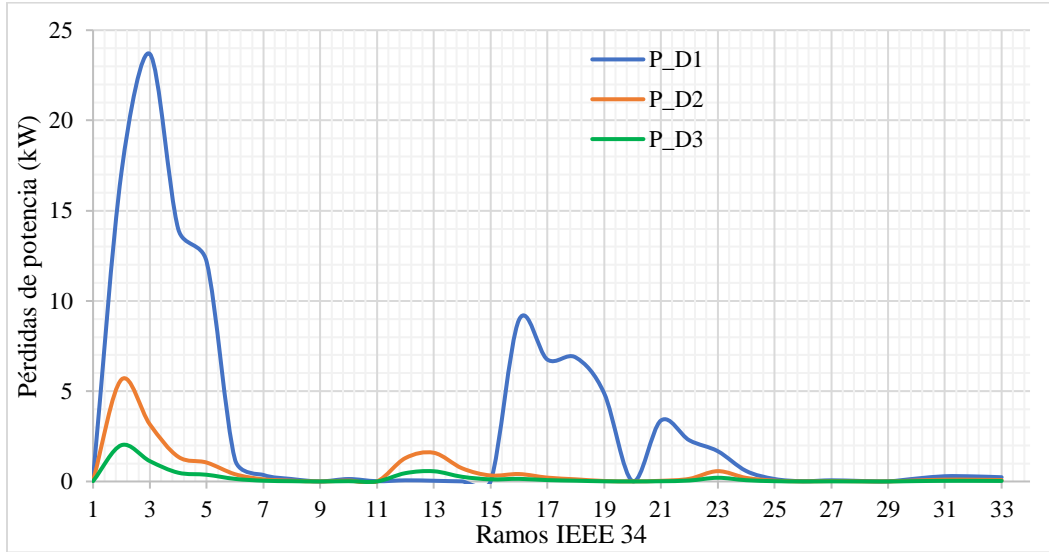


Figura 22. Pérdidas de potencia para el modelo IEEE 34 con LLI

En la Figura 23 se visualiza los voltajes finales del modelo con el uso de LLI, mediante 3 demandas D1, D2 y D3. Estos niveles de voltaje son relativamente constantes en todas sus barras y similares entre sí, por lo que oscila entre un rango de $\pm 0,635$ kV ya sea en V_D1, V_D2 y V_D3. Además, cabe recalcar que este perfil de voltaje está dentro del $\pm 20\%$ permitido.

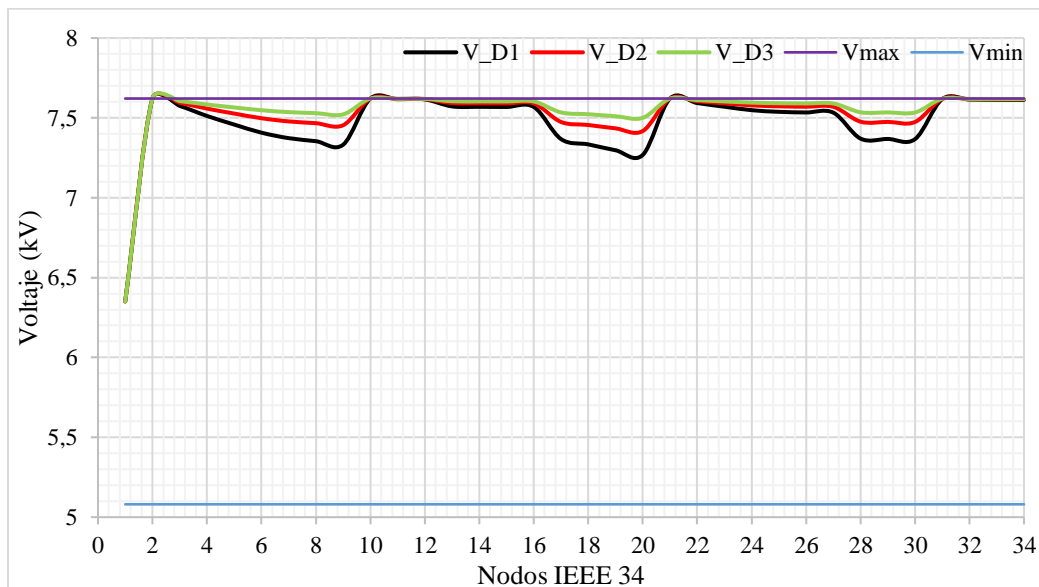


Figura 23. Voltajes para el modelo IEEE 34 con LLI

8.3.2 IEEE 118 con LLI

En la Figura 24 se muestra la reconfiguración óptima SED con el uso de las LLI, estas se posicionan en los siguientes ramos 6, 14, 24, 25, 34, 51, 56, 59, 71, 73, 75, 85, 105 y 106. Cabe mencionar, que las LLI de las 3 demandas caen en las mismas posiciones.

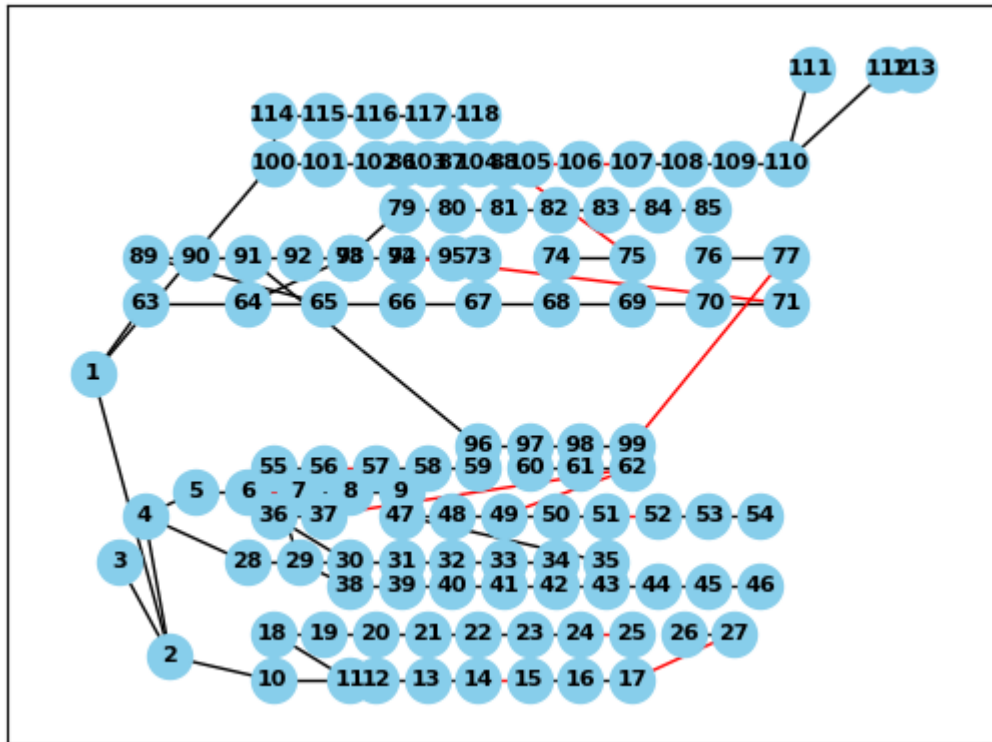


Figura 24. Resultado de reconfiguración LLI para el modelo IEEE 118

En la Figura 25 se visualiza las corrientes finales del modelo IEEE 118 con LLI, junto a sus 3 demandas D1, D2 y D3. Los valores de corriente más alta se ubican en los ramos 1 y 3, mayores a 850 A en I_D3. De ahí con el resto de las demandas I_D2 y I_D3 no sobrepasan esa cantidad.

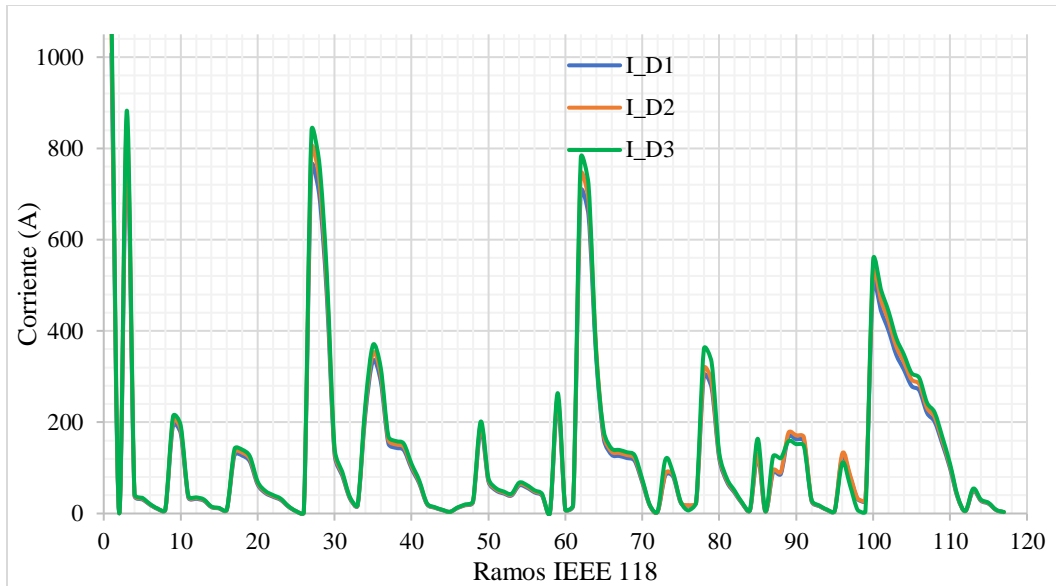


Figura 25. Corrientes para el modelo IEEE 118 con LLI

La Figura 26 exhibe las pérdidas PA finales con el uso de LLI, a través de 3 demandas y se obtiene pérdidas mayores a 45 kW en los ramos 63, 77 y 103 en P_D1, P_D2 y P_D3; además, se visualiza una similitud entre las 3 demandas.

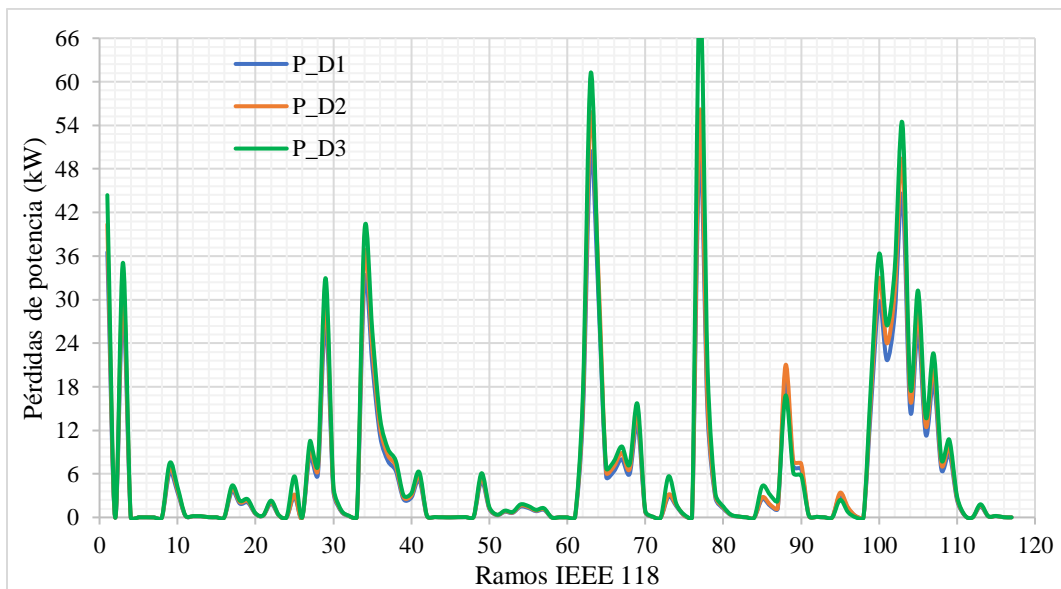


Figura 26. Pérdidas de potencia para el modelo IEEE 118 con LLI

En la Figura 27 se ilustra los voltajes finales del modelo con el uso de LLI, junto a 3 demandas D1, D2 y D3. Estos niveles de voltaje son relativamente constantes en todas las barras, los cuales sus oscilaciones no sobrepasan el $\pm 0,34$ kV; es decir, no superan el $\pm 20\%$ permitido.

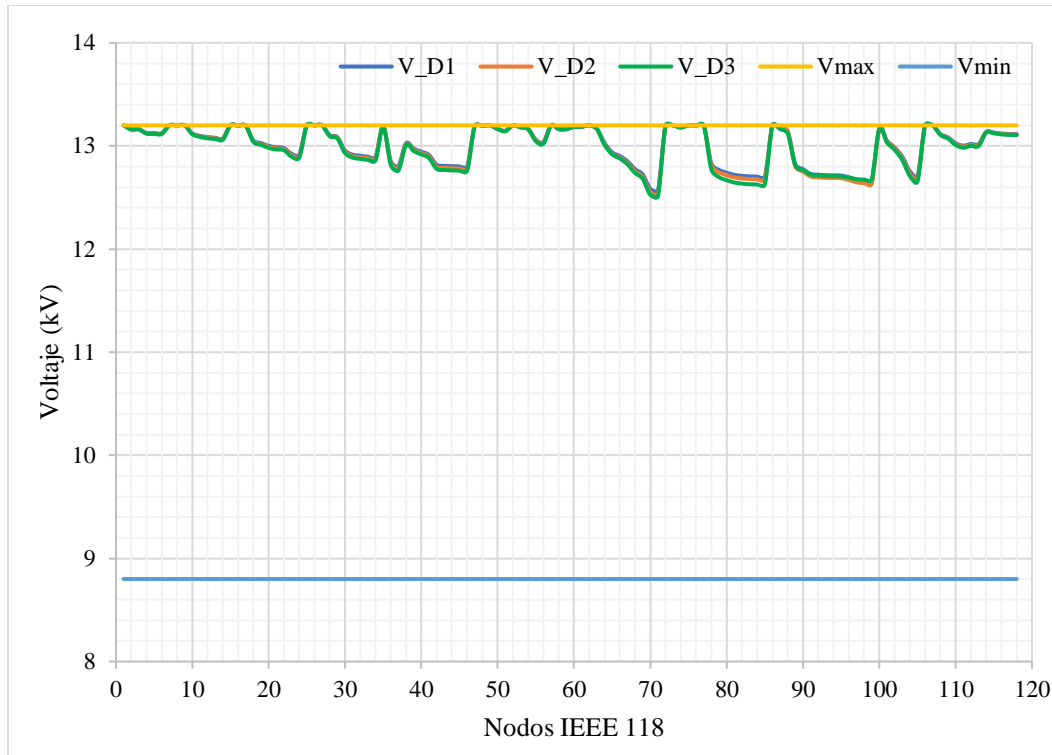


Figura 27. Voltajes para el modelo IEEE 118 con LLI

8.4 Evaluación de resultados

Se agrupa ciertos valores obtenidos de los modelos IEEE de 34 y 118, se destacan los siguientes incrementos/reducciones de:

- I_{D1} , I_{D2} e I_{D3} finales disminuyen con respecto a los valores iniciales, tal como se indica en la Tabla 10.

Tabla 10. Comparativa de corrientes entre los modelos inicial/final del IEEE 34

Corrientes A	Inicial			Final		
	I_{D1}	I_{D2}	I_{D3}	I_{D1}	I_{D2}	I_{D3}
Máxima	425,8858	245,5185	145,5136	419,7571	241,277	144,0435
Mínima	1,1555	0,680947	0,407225	1,147262	3,941097	2,353356
Diferencia	424,7303	244,8375	145,1063	418,6099	237,3359	141,6901
Total (Σ)	3776,888	2170,312	1284,077	3533,116	1708,427	1020,308

- Las pérdidas P_{D1} , P_{D2} y P_{D3} finales disminuyen en 45,57, 31,98 y 11,09 kW; respectivamente, con respecto a los valores iniciales, visto en la Tabla 11.

Tabla 11. Comparativa de pérdidas PA entre los modelos inicial/final del IEEE 34

Pérdidas PA kW	Inicial			Final		
	P_D1	P_D2	P_D3	P_D1	P_D2	P_D3
Máxima	24,41823	8,087	2,835074	23,68319	5,648518	2,012439
Mínima	7E-05	2,43E-05	8,69E-06	6,9E-05	0,000952	0,000342
Diferencia	24,41816	8,086975	2,835066	23,68312	5,647566	2,012097
Total (Σ)	151,3175	49,98771	17,50125	105,7479	18,00569	6,415963

- Los perfiles de voltaje operan dentro del límite permitido, es decir, $\pm 20\%$ de los valores nominales de 6,350853 kV.

Tabla 12. Comparativa de voltaje entre los modelos inicial/final del IEEE 34

Voltaje kV	Inicial			Final		
	V_D1	V_D2	V_D3	V_D1	V_D2	V_D3
Máxima	7,621024	7,621024	7,621024	7,621	7,621	7,621
Mínima	7,091005	7,317161	7,441422	6,351	6,351	6,351
Diferencia	0,530019	0,303862	0,179602	1,27	1,27	1,27

- Las I_D1, I_D2 e I_D3 finales disminuyen con respecto a los valores iniciales, tal como se indica en la Tabla 13.

Tabla 13. Comparativa de corrientes entre los modelos inicial/final del IEEE 118

Corrientes A	Inicial			Final		
	I_D1	I_D2	I_D3	I_D1	I_D2	I_D3
Máxima	1013,40	1065,70	1118,07	1007,20	1058,80	1110,42
Mínima	1,50	1,58	1,65	1,50	1,58	1,65
Diferencia	1011,89	1064,13	1116,42	1005,70	1057,23	1108,77
Total (Σ)	17346,51	18261,00	19179,74	15584,79	16387,34	17119,27

- Las pérdidas P_D1, P_D2 y P_D3 finales disminuyen en 134,65, 151,59 y 166,93 kW; respectivamente, con respecto a los valores iniciales, tal como se ilustra en la Tabla 14.

Tabla 14. Comparativa de pérdidas PA entre los modelos inicial/final del IEEE 118

Pérdidas PA kW	Inicial			Final		
	P_D1	P_D2	P_D3	P_D1	P_D2	P_D3
Máxima	53,72	59,80	66,28	50,67	56,08	72,45
Mínima	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Diferencia	53,72	59,80	66,28	50,67	56,08	72,45
Total (Σ)	852,62	945,72	1044,24	717,97	794,13	877,31

- Los perfiles de voltaje operan dentro del límite permitido, es decir, $\pm 20\%$ del valor nominal de 13,2 kV.

Tabla 15. Comparativa de voltaje entre los modelos inicial/final del IEEE 118

Voltaje kV	Inicial			Final		
	V_D1	V_D2	V_D3	V_D1	V_D2	V_D3
Máxima	13,20	13,20	13,20	13,20	13,20	13,20
Mínima	12,05	11,98	11,92	12,57	12,54	12,51
Diferencia	1,15	1,22	1,28	0,63	0,66	0,69

8.5 Validación del modelo

La validación del modelo IEEE 118 barras, utilizando la herramienta BONMIN, se lleva a cabo al comparar los resultados obtenidos, con el método de la convergencia de Newton implementado en Matpower (ver Anexo 10). A través de la Tabla 16 se observa la comparación para el escenario de demanda (D1), donde el modelo propuesto con BONMIN logra una reducción de pérdidas PA del 15,79% (equivalente a una reducción de 134,65 kW) tras la reconfiguración óptima, con un incremento en los voltajes a 1,182 p.u. Por otro lado, el modelo basado en MATPOWER muestra una reducción de pérdidas del 13,08% (equivalente a 170,00 kW) con un voltaje final de 0,961 p.u.

Tabla 16. Validación del modelo IEEE 118 nodos para la demanda D1

Antes de la reconfiguración		Luego de la reconfiguración		Reducción de pérdidas PA		Modelo
Pérdidas PA (kW)	Vp.u.	Pérdidas PA (kW)	Vp.u.	kW	%	
852,62	1,164	717,97	1,182	134,65	15,79	Bonmin
1300	0,956	1130	0,961	170,00	13,08	Matpower

Estos resultados evidencian que la herramienta BONMIN no solo es efectiva en la reducción de pérdidas de potencia, sino que también tiende a operar a voltajes más altos después de la reconfiguración, lo cual contribuye a la disminución de las pérdidas de potencia en comparación al método de convergencia de Newton.

Aplicando el criterio de varios autores, se valida el modelo IEEE 118 nodos con la demanda (D3) y el voltaje nominal de 11 kV, tal como se indica en la Tabla 17.

Tabla 17. Validación del modelo IEEE 118 nodos

Antes de la reconfiguración		Luego de la reconfiguración			Se reduce las pérdidas PA (%)	Autores
PA (kW)	V _{mín.} (p.u)	PA (kW)	V _{mín.} (p.u)	LLI		
1284,24	0,882	877,31	0,91	23, 26, 34, 39, 42, 51, 58, 70, 73, 75, 95, 109, 122, 129,130	31,69	Harry Herrera
1282,50	NR	853,58	NR	23, 25, 34, 39, 42, 50, 58, 71, 74, 95, 97, 109, 121, 129, 130	33,44	Bayat 112
1294,30	0,93	865,87	0,93	24, 27, 35, 40, 43, 52, 59, 72, 75, 96, 98, 110, 123, 130, 131	33,10	Zhang et al. 17
1294,68	NR	865,32	NR	23, 27, 33, 40, 43, 49, 52, 62, 72, 74, 77, 83, 110, 126, 131	33,16	Abdelaziz 174
1301,9	0,88	865,86	0,93	24, 27, 35, 40, 43, 52, 59, 72, 75, 96, 98, 110, 123, 130, 131	33,49	Ghasemi and Moshtagh 26

NR: no realizado.

La validación del modelo propuesto se ha realizado mediante la comparación con los resultados obtenidos por otros autores en estudios similares sobre la reconfiguración de redes de distribución eléctrica. Para ello, se ha seleccionado el sistema de prueba IEEE de 118 barras, un estándar ampliamente utilizado en la comunidad científica para evaluar la eficacia de algoritmos de optimización en la reducción de pérdidas de potencia activa (PA).

Resultados Obtenidos: En la tabla comparativa se presentan los valores de pérdidas de potencia activa antes y después de la reconfiguración para diferentes estudios, incluido el presente trabajo. Los resultados obtenidos muestran que el modelo propuesto logró reducir las pérdidas de PA en un 31,69%, partiendo de un valor inicial de 1284,24 kW a 877,31 kW. Este resultado es altamente competitivo cuando se compara con las reducciones obtenidas por otros autores como Bayat, quien reportó una reducción del 33,44%, y Zhang et al., quienes lograron una reducción del 33,10%.

Comparación de Desempeño: El desempeño del modelo en términos de reducción de pérdidas es comparable al de otros autores, lo que valida la eficacia del enfoque propuesto. Sin embargo, es importante señalar que el tiempo de ejecución del solver fue significativamente mayor en el presente estudio (7200 segundos) en comparación con otros autores, como Bayat (704.1 segundos) y Zhang et al. (3600 segundos). Este mayor tiempo de ejecución puede atribuirse a la complejidad del modelo, que incorpora variables binarias y no linealidades, así como a la implementación en el entorno Pyomo, que, aunque robusto, puede ser menos eficiente en términos de tiempo que otros entornos de optimización.

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9.1 Conclusiones

- En base a una revisión sistemática, los investigadores operan de manera radial al SED para llevar a cabo el modelo de optimización para la reconfiguración de redes eléctricas. Este enfoque facilita la linealización de los modelos, al permitir el uso de algoritmos genéticos, Bender o la PC2O. Se aplican estos criterios para alcanzar una reducción de las pérdidas PA y PR. A pesar de que estas técnicas mejoran la eficiencia y confiabilidad del sistema, la resolución es compleja debido a la naturaleza no convexa y el alto requerimiento computacional.
- El modelo de reconfiguración de SED no lineal se fundamenta en el estado de operación en régimen permanente y las ecuaciones del LLI. Utiliza un enfoque mixto y convexo para garantizar una solución óptima, por lo que se incluyen restricciones clave, como el balance de potencia, límites de voltaje y corriente y radialidad del sistema.
- Las ecuaciones del modelo propuesto se implementan en el software Python que junto a otras librerías como Pandas, Pyomo y Matplotlib representan ser una herramienta útil para la optimización y análisis de datos en modelos complejos. Con la biblioteca Pandas, se maneja una gran cantidad de datos eficientemente, mientras que Pyomo realiza la modelización y resolución del PNLEM. Matplotlib, en cambio brinda capacidades elementales para la visualización gráfica de los datos. Estos implementados en Python, no solo simplifica el desarrollo de modelos complejos, sino que también mejora la eficiencia y precisión en la obtención de soluciones óptimas.
- En los estudios de caso IEEE 34 y 118 barras se observa que, tras la integración de las LLI, se tiene una reducción de corrientes, por ende, de las pérdidas PA; lo que refleja una distribución más equilibrada de la carga. Como es el caso del P_D1 donde se reduce a un máximo de 47,040 kW para el IEEE 34 y 166,93 kW (IEEE 118) del P_D3. Además, los perfiles de voltaje se mantienen dentro de los límites permitidos, lo que sugiere una mejora en la estabilidad del SED. Finalmente, estos resultados validan la efectividad de la reconfiguración óptima al emplear LLI y así mejorar la eficiencia operativa del SEP.

9.2 Recomendaciones

- Se recomienda adicionar generadores en futuros trabajos para aplicar técnicas de programación entera mixta en los casos de estudio y calcular el tamaño óptimo, al tener en cuenta las restricciones y capacidad del sistema.
- Se sugiere analizar por separado el impacto de las LLI y el flujo óptimo de potencia para facilitar la identificación de los puntos de mejora específicos para cada componente del sistema.

10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Zhu, X. Xiong, J. Zhang, G. Shen, Q. Xu, and Y. Xue, “A rule based comprehensive approach for reconfiguration of electrical distribution network,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 79, no. 2, pp. 311–315, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.epsr.2008.07.001.
- [2] O. Badran, S. Mekhilef, H. Mokhlis, and W. Dahalan, “Optimal reconfiguration of distribution system connected with distributed generations: A review of different methodologies,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 73, pp. 854–867, Jun. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2017.02.010.
- [3] S. Bahadoorsingh, J. V. Milanovic, Y. Zhang, C. P. Gupta, and J. Dragovic, “Minimization of Voltage Sag Costs by Optimal Reconfiguration of Distribution Network Using Genetic Algorithms,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 4, pp. 2271–2278, Oct. 2007, doi: 10.1109/TPWRD.2007.899524.
- [4] M. E. Baran and F. F. Wu, “Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 4, no. 2, pp. 1401–1407, Apr. 1989, doi: 10.1109/61.25627.
- [5] A. Bahmanyar *et al.*, “Emerging smart meters in electrical distribution systems: Opportunities and challenges,” in *2016 24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, May 2016, pp. 1082–1087. doi: 10.1109/IranianCEE.2016.7585682.
- [6] M. Cavlovic, “Challenges of optimizing the integration of distributed generation into the distribution network,” in *2011 8th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, May 2011, pp. 419–426. doi: 10.1109/EEM.2011.5953048.
- [7] H. Hashemi-Dezaki, H. Askarian-Abyaneh, and H. Haeri-Khiavi, “Reliability optimization of electrical distribution systems using internal loops to minimize energy not-supplied (ENS),” *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 13, no. 3, pp. 416–424, 2015.
- [8] E. Dall’Anese and G. B. Giannakis, “Sparsity-Leveraging Reconfiguration of Smart Distribution Systems,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 29, no. 3, pp. 1417–1426, Jun. 2014, doi: 10.1109/TPWRD.2014.2302912.

- [9] E. R. Ramos, A. G. Exposito, J. R. Santos, and F. L. Iborra, "Path-based distribution network modeling: application to reconfiguration for loss reduction," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 20, no. 2, pp. 556–564, May 2005, doi: 10.1109/TPWRS.2005.846212.
- [10] H. M. Khodr, J. Martinez-Crespo, M. A. Matos, and J. Pereira, "Distribution Systems Reconfiguration Based on OPF Using Benders Decomposition," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, no. 4, pp. 2166–2176, Oct. 2009, doi: 10.1109/TPWRD.2009.2027510.
- [11] F. Capitanescu, L. F. Ochoa, H. Margossian, and N. D. Hatziargyriou, "Assessing the Potential of Network Reconfiguration to Improve Distributed Generation Hosting Capacity in Active Distribution Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 1, pp. 346–356, Jan. 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2320895.
- [12] E. Romero-Ramos, J. Riquelme-Santos, and J. Reyes, "A simpler and exact mathematical model for the computation of the minimal power losses tree," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 80, no. 5, pp. 562–571, May 2010, doi: 10.1016/j.epsr.2009.10.016.
- [13] A. Tabares, G. Muñoz-Delgado, J. F. Franco, J. M. Arroyo, and J. Contreras, "Multistage reliability-based expansion planning of ac distribution networks using a mixed-integer linear programming model," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 138, p. 107916, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.ijepes.2021.107916.
- [14] R. A. Jabr, "Radial distribution load flow using conic programming," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 21, no. 3, pp. 1458–1459, Aug. 2006, doi: 10.1109/TPWRS.2006.879234.
- [15] R. A. Jabr, R. Singh, and B. C. Pal, "Minimum Loss Network Reconfiguration Using Mixed-Integer Convex Programming," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 27, no. 2, pp. 1106–1115, May 2012, doi: 10.1109/TPWRS.2011.2180406.
- [16] W. Zhang *et al.*, "Resilience-oriented comparative study of SOP-based service restoration in distribution systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 228, p. 110050, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.epsr.2023.110050.
- [17] J. E. Peñaloza Morán and J. G. Yumbra Romero, "Reconfiguración óptima del sistema de distribución con generación distribuida de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.," bachelorThesis, 2018. Accessed: Apr. 04, 2024. [Online]. Available:

<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/31477>

- [18] S. L. Redrobán Amores, “Reconfiguración óptima de alimentadores primarios como una estrategia de planificación para el mejoramiento del desempeño operativo de los sistemas eléctricos de distribución,” masterThesis, Quito, 2019., 2019. Accessed: Apr. 04, 2024. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20361>
- [19] R. M. Vásquez Villarruel, “Rediseño óptimo de redes radiales de distribución eléctrica en bajo voltaje considerando las restricciones de la infraestructura eléctrica y urbana existente,” masterThesis, Quito, 2019., 2019. Accessed: Apr. 04, 2024. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20393>
- [20] R. A. Palacios Ochoa, “Reconfiguración óptima de redes de distribución que contienen generación distribuida hidroeléctrica, aplicando un algoritmo de optimización basado en colonia de hormigas,” masterThesis, Quito, 2020., 2020. Accessed: Apr. 04, 2024. [Online]. Available: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21039>
- [21] J. A. Y. Morón, *Sistemas eléctricos de distribución*. Reverte, 2021.
- [22] H. Saboori, R. Hemmati, and M. A. Jirdehi, “Reliability improvement in radial electrical distribution network by optimal planning of energy storage systems,” *Energy*, vol. 93, pp. 2299–2312, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.10.125.
- [23] F. Barrero, *Sistemas de energía eléctrica*. España: Ediciones Paraninfo, S.A., 2004.
- [24] A. L. da Silva Pessoa and M. Oleskovicz, “Fault location algorithm for distribution systems with distributed generation based on impedance and metaheuristic methods,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 225, p. 109871, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.epsr.2023.109871.
- [25] E. Tekeler and G. Poyrazoglu, “Revisiting Network Reconfiguration in the Era of Unpredictable EV Charger Integration,” in *2023 5th Global Power, Energy and Communication Conference (GPECOM)*, Nevsehir, Turkiye: IEEE, Jun. 2023, pp. 489–494. doi: 10.1109/GPECOM58364.2023.10175829.
- [26] T. Gonen, *Electric Power Distribution Engineering, Third Edition*. CRC Press, 2014.
- [27] Y.-F. Li and E. Zio, “Mathematical Programming,” in *Reliability Assessment and*

- Optimization*, John Wiley & Sons, Ltd, 2022, pp. 151–165. doi: 10.1002/9781119265856.ch8.
- [28] Automatización de diseño electrónico, “Programación Matemática: una descripción general | Temas ScienceDirect.” Accessed: Jun. 07, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/mathematical-programming>
- [29] A. Trespalacios, *Optimización para ingeniería financiera con aplicaciones en R y Excel - 1ra edición*. Ecoe Ediciones, 2021.
- [30] I. Soares, M. J. Alves, and C. H. Antunes, “A deterministic bounding algorithm vs. a hybrid meta-heuristic to deal with a bilevel mixed-integer nonlinear optimization model for electricity dynamic pricing,” *Comput. Oper. Res.*, vol. 155, p. 106195, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.cor.2023.106195.
- [31] F. Capitanescu, L. F. Ochoa, H. Margossian, and N. D. Hatziargyriou, “Assessing the Potential of Network Reconfiguration to Improve Distributed Generation Hosting Capacity in Active Distribution Systems,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 30, no. 1, pp. 346–356, Jan. 2015, doi: 10.1109/TPWRS.2014.2320895.
- [32] N. Triantafyllou and M. M. Papathanasiou, “Deep learning enhanced mixed integer optimization: Learning to reduce model dimensionality,” *Comput. Chem. Eng.*, vol. 187, p. 108725, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.compchemeng.2024.108725.
- [33] W. Gil-González, O. D. Montoya, L. F. Grisales-Noreña, C. L. Trujillo, and D. A. Giral-Ramírez, “A mixed-integer second-order cone model for optimal siting and sizing of dynamic reactive power compensators in distribution grids,” *Results Eng.*, vol. 15, p. 100475, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100475.
- [34] V. Jeyakumar, G. Li, and D. Woolnough, “Quadratically adjustable robust linear optimization with inexact data via generalized S-lemma: Exact second-order cone program reformulations,” *EURO J. Comput. Optim.*, vol. 9, p. 100019, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.ejco.2021.100019.
- [35] H. W. Dommel and W. F. Tinney, “Optimal Power Flow Solutions,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-87, no. 10, pp. 1866–1876, Oct. 1968, doi:

10.1109/TPAS.1968.292150.

- [36] A. Gomez-Exposito, A. J. Conejo, and C. Canizares, *Electric Energy Systems: Analysis and Operation*. CRC Press, 2017.
- [37] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *Análisis de sistemas de potencia*. McGraw-Hill, 2000.
- [38] E. Segovia, L. O. Freire, C. Quinatoa, and J. N. Castillo, “Optimal Reconfiguration of Electric Power Distribution Networks,” in *13th International Conference on Information Systems and Advanced Technologies “ICISAT 2023,”* M. R. Laouar, V. E. Balas, V. Piuri, D. Rad, Z. Touati Hamad, and A. Cheddad, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 112–124. doi: 10.1007/978-3-031-60594-9_13.
- [39] Python, “PyPI · The Python Package Index,” PyPI. Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: <https://pypi.org/>
- [40] Pandas, “pandas - Python Data Analysis Library.” Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: <https://pandas.pydata.org/>
- [41] W. Hart, J.-P. Watson, D. Woodruff, and J.-P. Watson, “Pyomo: Modeling and solving mathematical programs in Python,” *Math. Program. Comput.*, vol. 3, pp. 219–260, Sep. 2011, doi: 10.1007/s12532-011-0026-8.
- [42] M. L. Bynum *et al.*, *Pyomo — Optimization Modeling in Python*, vol. 67. in Springer Optimization and Its Applications, vol. 67. Cham: Springer International Publishing, 2021. doi: 10.1007/978-3-030-68928-5.
- [43] Fundación COIN-OR, “COIN-OR: Computational Infrastructure for Operations Research,” COIN-OR: Computational Infrastructure for Operations Research. Accessed: Jul. 01, 2024. [Online]. Available: <https://www.coin-or.org/>
- [44] E. M. Ahmed *et al.*, “BONMIN solver-based coordination of distributed FACTS compensators and distributed generation units in modern distribution networks,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 13, no. 4, p. 101664, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.asej.2021.101664.
- [45] A. Hagberg, P. Swart, and D. Chult, *Exploring Network Structure, Dynamics, and Function Using NetworkX*. 2008.

- [46] J. D. Hunter, “Matplotlib: A 2D Graphics Environment,” *Comput. Sci. Eng.*, vol. 9, no. 3, pp. 90–95, May 2007, doi: 10.1109/MCSE.2007.55.
- [47] A. Alberca Sánchez, “La librería Numpy,” *Aprende con Alf*. Accessed: Jun. 02, 2022. [Online]. Available: <https://aprendeconalf.es/docencia/python/manual/numpy/>

11 ANEXOS

Anexo 1. Ecuaciones para determinar la caída de voltaje y el flujo de potencia en una red de distribución radial	84
Anexo 2. Bibliotecas utilizadas en Python	86
Anexo 3. Datos iniciales del sistema de 34 barras.....	92
Anexo 4. Datos iniciales del sistema de 118 barras.....	95
Anexo 5. Algoritmo desarrollado en Python	104
Anexo 6. Resultados iniciales del IEEE 34 barras	122
Anexo 7. Resultados iniciales del IEEE 118 barras	125
Anexo 8. Resultados finales del IEEE 34 barras	132
Anexo 9. Resultados finales del IEEE 118 barras	136
Anexo 10. Resultados del Matpower para IEEE 118 barras	143
Anexo 11. Informe de Similitud.....	160

Anexo 1. Ecuaciones para determinar la caída de voltaje y el flujo de potencia en una red de distribución radial

La ecuación (80) representa la caída de voltaje ($\vec{V}_{i,d} - \vec{V}_{j,d}$) a través de una rama, en este caso se selecciona entre los nodos i y j , de manera que es igual a la corriente $\vec{I}_{ij,d}$ por la impedancia Z_{ij} .

$$\vec{V}_{i,d} - \vec{V}_{j,d} = \vec{I}_{ij,d}(R_{ij} + jX_{ij}) = \vec{I}_{ij,d}Z_{ij} \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (80)$$

En cambio, la ecuación (81) representa el flujo de corriente $\vec{I}_{ij,d}$ en función de la potencia aparente ($P_{ij,d} + Q_{ij,d}$) y el voltaje $\vec{V}_{j,d}$. El término “*” es el operador de transpuesta.

$$\vec{I}_{ij,d} = \left(\frac{P_{ij,d} + Q_{ij,d}}{\vec{V}_{j,d}} \right)^* \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (81)$$

Se sustituye la ecuación (81) en (80), se obtiene (82).

$$(\vec{V}_{i,d} - \vec{V}_{j,d}) = \left(\frac{P_{ij,d} + Q_{ij,d}}{\vec{V}_{j,d}} \right)^* (R_{ij} + jX_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (82)$$

Por medio de la ecuación (82), se desglosa en sus partes reales e imaginarias y se obtienen las ecuaciones (83) y (84).

$$(\vec{V}_{i,d} - \vec{V}_{j,d})\vec{V}_{j,d}^* = (P_{ij,d} + Q_{ij,d})^*(R_{ij} + jX_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (83)$$

$$(\vec{V}_{i,d} - \vec{V}_{j,d})\vec{V}_{j,d}^* = (P_{ij,d} - Q_{ij,d})(R_{ij} + jX_{ij}) \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d \quad (84)$$

Luego, se define los voltajes sobre los nodos i y j , se aplica su interpretación polar, visto en las ecuaciones (85) y (86).

$$\vec{V}_{i,d} = V_{i,d}(\cos \theta_{i,d} + j\text{sen}\theta_{i,d}) \quad (85)$$

$$\vec{V}_{j,d} = V_{j,d}(\cos \theta_{j,d} + j\text{sen}\theta_{j,d}) \quad (86)$$

$$\theta_{ij,d} = \theta_{i,d} - \theta_{j,d} \quad (87)$$

Donde $V_{i,d}$ y $\theta_{i,d}$ son las magnitudes y ángulos de fase del voltaje en la barra i , de nivel de demanda d . Se reemplaza las ecuaciones (85) y (86) en (83), se obtiene (88).

$$\begin{aligned}
& V_{i,d}(\cos \theta_{i,d} + j\text{sen}\theta_{i,d}) * V_{j,d}(\cos \theta_{j,d} - j\text{sen}\theta_{j,d}) \\
& \quad - V_{j,d}(\cos \theta_{j,d} + j\text{sen}\theta_{j,d}) * V_{i,d}(\cos \theta_{i,d} - j\text{sen}\theta_{i,d}) \\
& = (P_{ij,d} - Q_{ij,d})(R_{ij} + jX_{ij}) \\
& \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d
\end{aligned} \tag{88}$$

Se aplica factor común y se consigue la ecuación (89).

$$\begin{aligned}
& V_{i,d}V_{j,d}[\cos \theta_{ij,d} + j\text{sen}\theta_{ij,d}] - V_{j,d}^2 = (P_{ij,d} - jQ_{ij,d})(R_{ij} + jX_{ij}) \\
& \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d
\end{aligned} \tag{89}$$

La ecuación (89) se desglosa en sus partes real e imaginarias, tal como se indican en las ecuaciones (90) y (91).

$$V_{i,d}V_{j,d} \cos \theta_{ij,d} = V_{j,d}^2 + (R_{ij} + jX_{ij}) \tag{90}$$

$$V_{i,d}V_{j,d} \text{sen}\theta_{ij,d} = X_{ij}P_{ij,d} - R_{ij}Q_{ij,d} \tag{91}$$

Se elevan sus expresiones al cuadrado, y se obtienen las ecuaciones (92) y (93).

$$(V_{i,d}V_{j,d} \cos \theta_{ij,d})^2 = (V_{j,d}^2 + (R_{ij} + jX_{ij}))^2 \tag{92}$$

$$(V_{i,d}V_{j,d} \text{sen}\theta_{ij,d})^2 = (X_{ij}P_{ij,d} - R_{ij}Q_{ij,d})^2 \tag{93}$$

Se emplea la regulación trigonométrica $\text{sen}^2\theta_{ij,d} + \cos^2\theta_{ij,d} = 1$ y se suma las ecuaciones antes mencionadas para obtener (21). Estos pasos siguen la progresión lógica de manejar las relaciones iniciales de voltaje y corriente, transformarlas en forma polar y, finalmente, derivar ecuaciones algebraicas simplificadas que representan la caída de voltaje y el flujo de potencia en una red de distribución radial.

$$\begin{aligned}
& [V_{i,d}^2 - 2(R_{ij}P_{ij,d} + X_{ij}Q_{ij,d})]V_{j,d}^2 - Z_{ij,d}(P_{ij,d}^2 - Q_{ij,d}^2) - V_{j,d}^4 = 0 \\
& \quad \forall ij \in \Omega_l, \forall d \in \Omega_d
\end{aligned} \tag{94}$$

Anexo 2. Bibliotecas utilizadas en Python

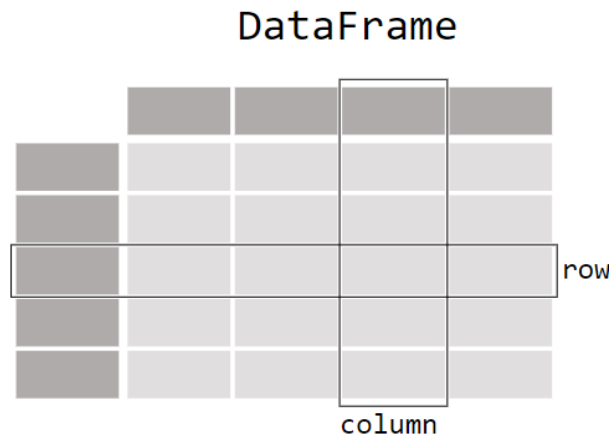
El modelo propuesto emplea un software de programación, denominado Python. Este es un lenguaje de alto nivel e implica una ayuda esencial a cualquier usuario que posea conocimientos básicos o avanzados. Además, dispone de las siguientes características [39]:

- Es de código abierto.
- Disminuye la complejidad en la programación, por lo tanto, se dice que es intuitivo.
- Soporta diversos estilos de programación: funcional, orientada a objetos y procedimental.
- Contiene una cantidad extensa de bibliotecas predefinidas que facilitan tareas de programación, tal como se indica en el Apartado 2.8.1.
- Se puede colocar nuevas funciones y datos con el lenguaje C, C++ u otros que se llamen a través de C. Esto lo vuelve ideal para aplicaciones personalizadas.
- Por último, se puede ejecutar en varias plataformas, Windows, macOS, entre otros.

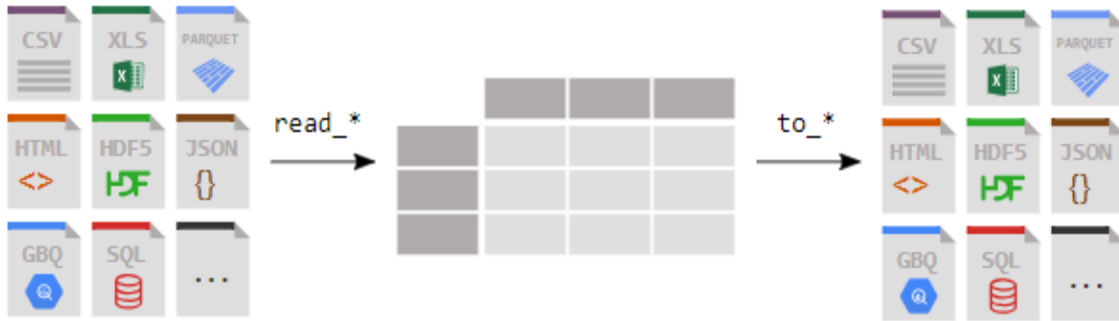
Pandas.

La herramienta de análisis Pandas es una biblioteca OS (código abierto) capaz de proveer estructuras de alto rendimiento de los datos y, además, es compatible con el lenguaje de programación Python. También presenta otras características, las cuales se mencionan en la propuesta [40]:

- Utiliza una tabla denominada DataFrame que ayuda a examinar, limpiar y procesar los datos.



- Admite la integración de varias fuentes de datos predeterminados con las extensiones, csv, xls, HTML, SQL y otros detallados en la Figura 11. Esto se lleva a cabo con la función (*read_**). De modo que, se utiliza el comando (*to_**) para el almacenamiento de los datos.



- Dispone de métodos para fraccionar, escoger y extraer los datos requeridos de una tabla, tal como se indica en la Figura.



Pyomo.

Es un paquete de software OS que sirve a la definición, modelado y resolución de problemas matemáticos en Python. Además, opera con un lenguaje de alto nivel, presenta amplias gamas de soporte y aprovecha las capacidades de la biblioteca del software Coopr para formar el OS de COIN-OR, IBM. Este último incorpora paquetes sobre optimización, modelación de aplicaciones y gestión de experimentos computacionales [41]. El modelado de Pyomo posee diversos componentes, tales como [42]:

- Conjuntos definidos para:
 - Declarar una instancia de la clase.
 - Almacenar un resultado de alguna operación
 - Especificar los dominios en los parámetros, variables y otros conjuntos predefinidos.
- Parámetros que están en función de los datos.
- Las variables del modelo que se designan mediante la función $Var()$. Internamente puede contener las siguientes condiciones:
 - "*domain*": toma un conjunto de números reales positivos, para el caso de la corriente, PA y PR. En cambio, para el voltaje se utiliza el dominio de números reales, este conlleva valores positivos y negativos. Por último, las LLI utilizan el dominio binario (1L, 0L).
 - "*bounds*": se define los límites, superior e inferior de la variable.

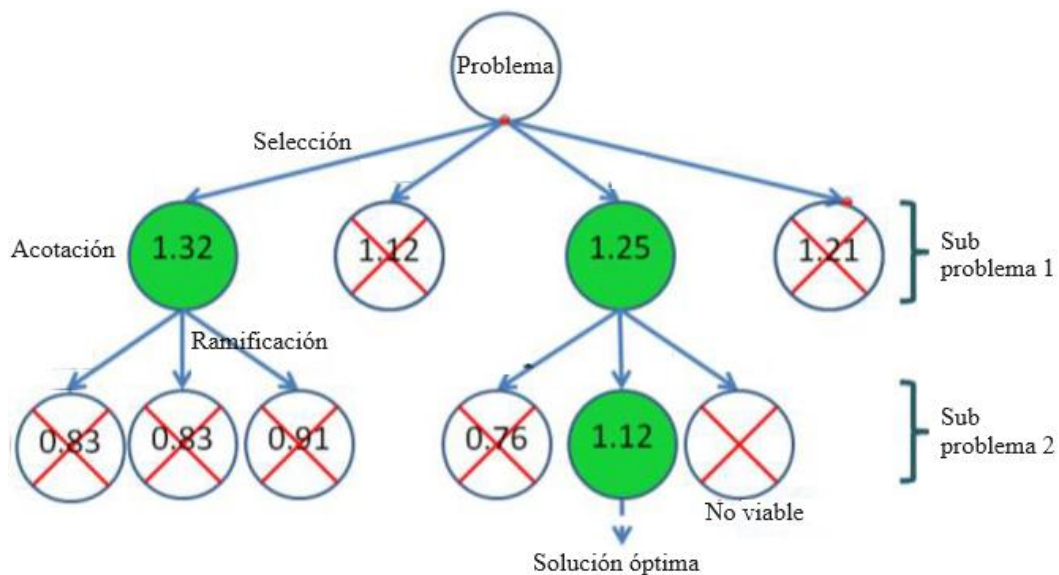
- "initialize": brinda un valor inicial a la variable; esta información es aplicado en modelos no lineales.
- El objetivo, que junto al paquete de optimización trata de minimizar la función.
- Las restricciones que generalmente se crean mediante una regla *Constraint()* y expresiones de igualdad o desigualdad. Además, la regla *ConstraintList()* se utiliza para formar una lista dinámica; estas se emplean cuando se desconoce la cantidad de restricciones o cuando se desea integrarlas en un bucle.
- Expresiones dadas de la función objetivo como las restricciones.

Previo a la construcción de los modelos de optimización, es necesario importar un módulo denominado *pyomo.environ()*. Este proporciona una base con varios componentes clave para definir lo siguiente [42]:

- El modelo concreto con la función *ConcreteModel()*.
- Los componentes del modelo, antes mencionados.
- *Solvers* (herramientas para la resolución del modelo de optimización).

Una de estas herramientas empleadas en la propuesta, se denomina Bonmin, el cual maneja dificultades complejas de tipo PNLEM con programación de código abierto. Además, se describen algunos algoritmos de solución [43], [44]:

- Ramificación y acotación (B-BB): resuelve problemas de programación enteros y a su vez se descompone en problemas más pequeños y los explora sistemáticamente. Por ejemplo, en la Figura se observa como del problema (nodo principal), comienza con la búsqueda de su solución óptima. Para ello, se desglosa en subproblemas a través de un proceso de selección. Por consiguiente, se calcula una cota con la solución posible y se descarta ante varias de tipo no viable (marcado en X). Esto reduce el espacio de búsqueda y se determina la solución óptima del nodo principal.



- Aproximación externa (B-OA): como su nombre lo indica, emplea acercamientos lineales externos para la resolución de PNL.
- Ramificación y corte (B-QG): una combinación de B-OA y B-BB para la resolución de problemas.
- Descomposición de Benders: realiza una desintegración desde problemas grandes a más pequeños y manejables. Este método se aplica cuando se desea resolver PL y PNL grandes [10].
- El optimizador de punto interno Ipopt es una herramienta que ayuda a la resolución de PNL no lineal relajados a gran escala.

Por último, se aplica un módulo denominado `pyomo.util.infeasible()` que diagnostica y aborda modelos de optimización no viables, es decir, aquellos donde no hay solución, al aplicar todas las restricciones. Además, identifica que factor causa la inviabilidad [42].

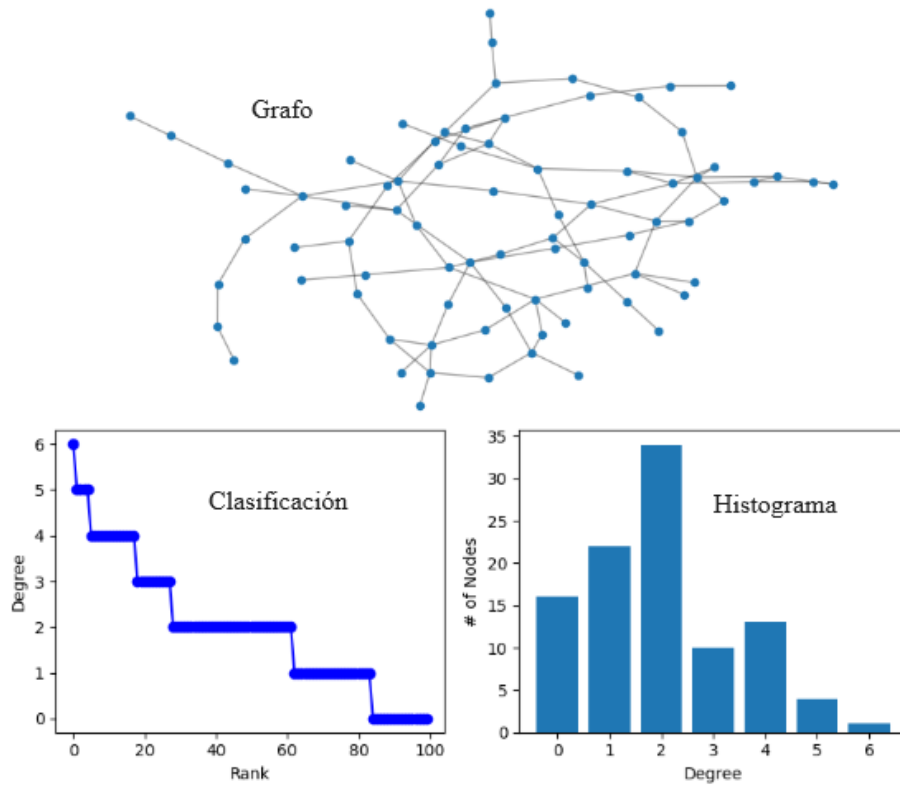
Logging.

Este módulo de Python incorpora un sistema de registros que sirve para brindar información ante advertencias de error durante la ejecución de un programa. A continuación, se describen una serie de funciones aplicadas en la propuesta [39]:

- *GetLogger()*: emite mensajes de registro.
- *StreamHandler()*: envía mensajes de advertencia a una consola.
- *Debug*: se emplea para mensajes específicos cuando se realiza un diagnóstico del problema.
- *AddHandler()*: se utiliza para remitir los mensajes a las salidas adecuadas.

Networkx.

Es una biblioteca aplicada en ciencias de la computación y orientada a la elaboración, maniobra e investigación de estructuras y funciones complejos de grafos [45].



Además, se puede realizar varias actividades, tales como [45]:

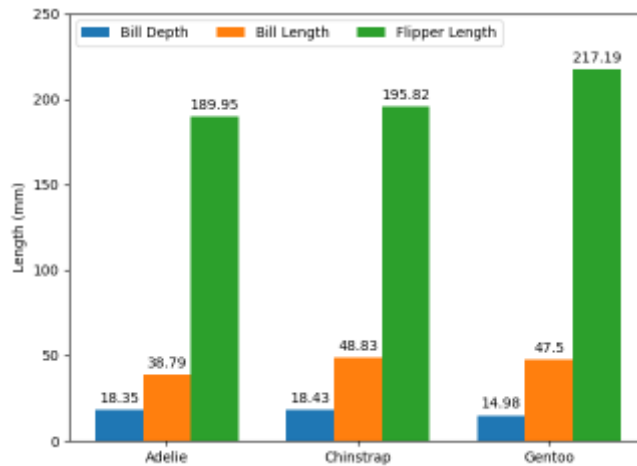
- Es versátil, ya que permite trabajar con grafos de cualquier tipo (dirigido, no dirigido o multigrado). Un caso se presenta con un grafo no dirigido con la función *Graph()*, el cual se utiliza como inicio para agregar nodos *Draw_networkx_nodes()* y aristas *Draw_networkx_edges()*. Esto ayuda al análisis y presentación de la información en redes con un alto grado de complejidad.
- Utiliza un código escrito en C, C++; por lo que es de fácil implementación con otras bibliotecas de Python como Matplotlib y NumPy.
- Puede operar con un gran volumen de datos.

Matplotlib.

Es una herramienta que sirve para visualizar gráficos estáticos e interactivos en Python. Además, presenta una gran diversidad de características [46]:

- Opera bajo diversos sistemas operativos como Linux, macOS, Windows y backends gráficos.
- Realiza figuras personalizadas.
- Se puede exportar en formato PNG, PDF, EPS y SVG.
- Puede usarse en entornos Jupiter Notebooks (extensión ipynb).

- Genera cualquier tipo de gráficos, ya sea líneas, histogramas, barras (ver Figura), señales y otros.

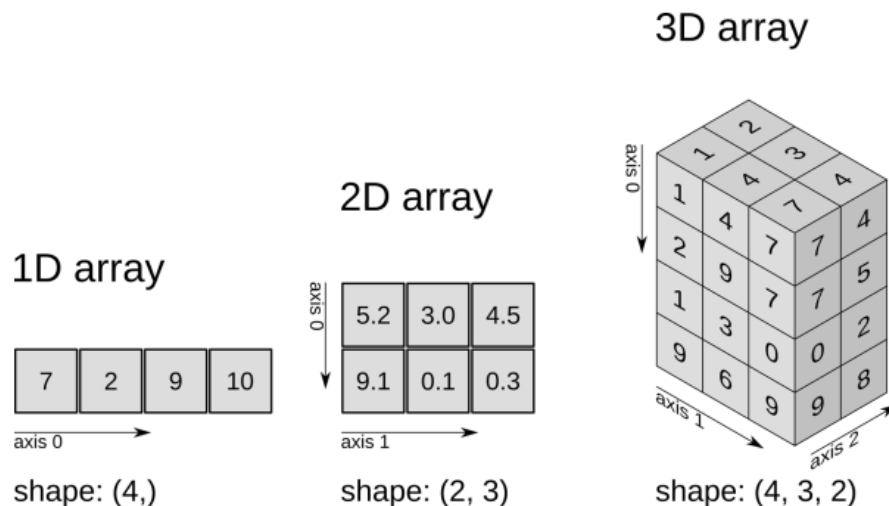


- Proporciona varias funciones, ya sea para crear, mostrar y guardar una figura con los comandos `subplots()`, `show()` y `savefig()`; respectivamente.

Numerical Python (NumPy).

Esta biblioteca suministra una gama de herramientas matemáticas, soporte para estructuras de datos conocidos como arrays. A continuación, se detallan algunas características esenciales [47]:

- La función `array()` crea una estructura a partir de una tupla o lista. Si es un vector, matriz o cubo son 1D, 2D o 3D; respectivamente, tal como se observa en la Figura 16. No obstante, puede contener más dimensiones.



- Existen otras funciones para crear arreglos como el uso de datos vacíos `empty()`, ceros `zeros()`, elementos de una secuencia `arange()`, entre otros.

Anexo 3. Datos iniciales del sistema de 34 barras

- Ramos

Ramos	Desde	Hasta	R[Ω]	X[Ω]	Corriente máxima Imáx
1	1	2	0,117	0,048	600
2	2	3	0,1073	0,044	600
3	3	4	0,1645	0,0457	600
4	4	5	0,1495	0,0415	600
5	5	6	0,1495	0,0415	600
6	6	7	0,3144	0,054	200
7	7	8	0,2096	0,036	200
8	8	9	0,3144	0,054	200
9	9	10	0,2096	0,036	200
10	10	11	0,131	0,0225	100
11	11	12	0,1048	0,018	100
12	3	13	0,1572	0,027	100
13	13	14	0,2096	0,036	100
14	14	15	0,1048	0,018	100
15	15	16	0,0524	0,009	100
16	6	17	0,1794	0,0498	400
17	17	18	0,1645	0,0457	400
18	18	19	0,2079	0,0473	400
19	19	20	0,189	0,043	400
20	20	21	0,189	0,043	400
21	21	22	0,262	0,045	200
22	22	23	0,262	0,045	200
23	23	24	0,3144	0,054	200
24	24	25	0,2096	0,036	200
25	25	26	0,131	0,0225	100
26	26	27	0,1048	0,018	100
27	7	28	0,1572	0,027	100
28	28	29	0,1572	0,027	100
29	29	30	0,1572	0,027	100
30	10	31	0,1572	0,027	100
31	31	32	0,2096	0,036	100

32	32	33	0,1572	0,027	100
33	33	34	0,1048	0,018	100

- Nodos

Bus	PD_1 [kW]	PD_2 [kW]	PD_3 [kW]	QD_1 [kVAr]	QD_2 [kVAr]	QD_3 [kVAr]	x	y
1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	1	0
3	0	0	0	0	0	0	2	0
4	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	3	0
5	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	4	0
6	0	0	0	0	0	0	5	0
7	0	0	0	0	0	0	6	0
8	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	7	0
9	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	8	0
10	0	0	0	0	0	0	6	-1
11	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	5	-2
12	77,6	45,7	27,4	47,6	28	16,8	4	-1
13	40,8	24	14,4	25,5	15	9	2	1
14	40,8	24	14,4	25,5	15	9	2	2
15	40,8	24	14,4	25,5	15	9	2	3
16	7,6	4,5	2,7	4,2	2,5	1,5	2	4
17	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	6	1
18	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	6	2
19	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	6	3
20	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	6	4
21	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	7	4
22	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	6	5
23	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	5	5
24	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	4	5
25	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	3	5
26	130,3	76,7	46	80,7	47,5	28,4	3	6
27	77,6	45,7	27,4	48,1	28,3	17	3	7
28	42,5	25	15	27,2	16	9,6	6	6

29	42,5	25	15	27,2	16	9,6	6	7
30	42,5	25	15	27,2	16	9,6	6	8
31	32,3	19	11,4	21,2	12,5	7,5	5	-3
32	32,3	19	11,4	21,2	12,5	7,5	4	-2
33	32,3	19	11,4	21,2	12,5	7,5	3	-2
34	32,3	19	11,4	21,2	12,5	7,5	2	-2

- Llaves LLI

Desde	Hasta	R	I	Estado	Binario
1	2	0,001	600	Cerrado	1
16	23	0,001	200	Abierto	0
20	21	0,001	200	Cerrado	1
9	10	0,001	200	Cerrado	1
4	34	0,001	200	Abierto	0
5	12	0,001	200	Abierto	0

Anexo 4. Datos iniciales del sistema de 118 barras

- Ramos

Ramos	Desde	Hasta	R[Ω]	X[Ω]	Imáx.
1	1	2	0,036	0,01296	3000
2	2	3	0,033	0,01188	3000
3	2	4	0,045	0,0162	3000
4	4	5	0,015	0,054	3000
5	5	6	0,015	0,054	3000
6	6	7	0,015	0,0125	3000
7	7	8	0,018	0,014	3000
8	8	9	0,021	0,063	3000
9	9	10	0,166	0,1344	3000
10	10	11	0,112	0,0789	3000
11	11	12	0,187	0,313	3000
12	12	13	0,142	0,1512	3000
13	13	14	0,18	0,118	3000
14	14	15	0,15	0,045	3000
15	15	16	0,16	0,18	3000
16	16	17	0,157	0,171	3000
17	11	18	0,218	0,285	3000
18	18	19	0,118	0,185	3000
19	19	20	0,16	0,196	3000
20	20	21	0,12	0,189	3000
21	21	22	0,12	0,0789	3000
22	22	23	1,41	0,723	3000
23	23	24	0,293	0,1348	3000
24	24	25	0,133	0,104	3000
25	25	26	0,178	0,134	3000
26	26	27	0,178	0,134	3000
27	4	28	0,015	0,0296	3000
28	28	29	0,012	0,0276	3000
29	29	30	0,12	0,2766	3000
30	30	31	0,21	0,243	3000
31	31	32	0,12	0,054	3000

32	32	33	0,178	0,234	3000
33	33	34	0,178	0,234	3000
34	34	35	0,154	0,162	3000
35	30	36	0,187	0,261	3000
36	36	37	0,133	0,099	3000
37	29	38	0,33	0,194	3000
38	38	39	0,31	0,194	3000
39	39	40	0,13	0,194	3000
40	40	41	0,28	0,15	3000
41	41	42	1,18	0,85	3000
42	42	43	0,42	0,2436	3000
43	43	44	0,27	0,0972	3000
44	44	45	0,339	0,1221	3000
45	45	46	0,27	0,1779	3000
46	35	47	0,21	0,1383	3000
47	47	48	0,12	0,0789	3000
48	48	49	0,15	0,0987	3000
49	49	50	0,15	0,0987	3000
50	50	51	0,24	0,1581	3000
51	51	52	0,12	0,0789	3000
52	52	53	0,405	0,1458	3000
53	53	54	0,405	0,1458	3000
54	29	55	0,391	0,141	3000
55	55	56	0,406	0,1461	3000
56	56	57	0,406	0,1461	3000
57	57	58	0,706	0,5461	3000
58	58	59	0,338	0,1218	3000
59	59	60	0,338	0,1218	3000
60	60	61	0,207	0,0747	3000
61	61	62	0,247	0,8922	3000
62	1	63	0,028	0,0418	3000
63	63	64	0,117	0,2016	3000
64	64	65	0,255	0,0918	3000
65	65	66	0,21	0,0759	3000
66	66	67	0,383	0,138	3000

67	67	68	0,504	0,3303	3000
68	68	69	0,406	0,1461	3000
69	69	70	0,962	0,761	3000
70	70	71	0,165	0,06	3000
71	71	72	0,303	0,1092	3000
72	72	73	0,303	0,1092	3000
73	73	74	0,206	0,144	3000
74	74	75	0,233	0,084	3000
75	75	76	0,591	0,1773	3000
76	76	77	0,126	0,0453	3000
77	64	78	0,559	0,3687	3000
78	78	79	0,186	0,1227	3000
79	79	80	0,186	0,1227	3000
80	80	81	0,26	0,139	3000
81	81	82	0,154	0,148	3000
82	82	83	0,23	0,128	3000
83	83	84	0,252	0,106	3000
84	84	85	0,18	0,148	3000
85	79	86	0,16	0,182	3000
86	86	87	0,2	0,23	3000
87	87	88	0,16	0,393	3000
88	65	89	0,669	0,2412	3000
89	89	90	0,266	0,1227	3000
90	90	91	0,266	0,1227	3000
91	91	92	0,266	0,1227	3000
92	92	93	0,266	0,1227	3000
93	93	94	0,233	0,115	3000
94	94	95	0,496	0,138	3000
95	91	96	0,196	0,18	3000
96	96	97	0,196	0,18	3000
97	97	98	0,1866	0,122	3000
98	98	99	0,0746	0,318	3000
99	1	100	0,0625	0,0265	3000
100	100	101	0,1501	0,234	3000
101	101	102	0,1347	0,0888	3000

102	102	103	0,2307	0,1203	3000
103	103	104	0,447	0,1608	3000
104	104	105	0,1632	0,0588	3000
105	105	106	0,33	0,099	3000
106	106	107	0,156	0,0561	3000
107	107	108	0,3819	0,1374	3000
108	108	109	0,1626	0,0585	3000
109	109	110	0,3819	0,1374	3000
110	110	111	0,2445	0,0879	3000
111	110	112	0,2088	0,0753	3000
112	112	113	0,2301	0,0828	3000
113	100	114	0,6102	0,2196	3000
114	114	115	0,1866	0,127	3000
115	115	116	0,3732	0,246	3000
116	116	117	0,405	0,367	3000
117	117	118	0,489	0,438	3000

- Nodos

Bus	PD_1 [kW]	PD_2 [kW]	PD_3 [kW]	QD_1 [kVAr]	QD_2 [kVAr]	QD_3 [kVAr]	x	y
1	0	0	0	0	0	0	60	360
2	133,84	140,532	147,224	101,14	106,2	111,25	120	120
3	16,214	17,0247	17,8354	11,292	11,86	12,42	80	200
4	34,315	36,03075	37,7465	21,845	22,94	24,03	100	240
5	73,016	76,6668	80,3176	63,602	66,78	69,96	140	260
6	144,2	151,41	158,62	68,604	72,03	75,46	180	260
7	104,47	109,6935	114,917	61,725	64,81	67,9	220	260
8	28,547	29,97435	31,4017	11,503	12,08	12,65	260	260
9	87,56	91,938	96,316	51,073	53,63	56,18	300	260
10	198,2	208,11	218,02	106,77	112,11	117,45	200	100
11	146,8	154,14	161,48	75,995	79,79	83,59	260	100
12	26,04	27,342	28,644	18,687	19,62	20,56	280	100
13	52,1	54,705	57,31	23,22	24,38	25,54	320	100
14	141,9	148,995	156,09	117,5	123,38	129,25	360	100

15	21,87	22,9635	24,057	28,79	30,23	31,67	400	100
16	33,37	35,0385	36,707	26,45	27,77	29,1	440	100
17	32,43	34,0515	35,673	25,23	26,49	27,75	480	100
18	20,234	21,2457	22,2574	11,906	12,5	13,1	200	140
19	156,94	164,787	172,634	78,523	82,45	86,38	240	140
20	546,29	573,6045	600,919	351,4	368,97	386,54	280	140
21	180,31	189,3255	198,341	164,2	172,41	180,62	320	140
22	93,167	97,82535	102,4837	54,594	57,32	60,05	360	140
23	85,18	89,439	93,698	39,65	41,63	43,62	400	140
24	168,1	176,505	184,91	95,178	99,94	104,7	440	140
25	125,11	131,3655	137,621	150,22	157,73	165,24	480	140
26	16,03	16,8315	17,633	24,62	25,85	27,08	520	140
27	26,03	27,3315	28,633	24,62	25,85	27,08	560	140
28	594,56	624,288	654,016	522,62	548,75	574,88	180	200
29	120,62	126,651	132,682	59,117	62,07	65,03	220	200
30	102,38	107,499	112,618	99,554	104,53	109,51	260	200
31	513,4	539,07	564,74	318,5	334,43	350,35	300	200
32	475,25	499,0125	522,775	456,14	479,95	501,75	340	200
33	151,43	159,0015	166,573	136,79	143,63	150,47	380	200
34	205,38	215,649	225,918	83,302	87,47	91,63	420	200
35	131,6	138,18	144,76	93,082	97,74	102,39	460	200
36	448,4	470,82	493,24	369,79	388,28	406,77	200	240
37	440,52	462,546	484,572	321,64	337,72	353,8	240	240
38	112,54	118,167	123,794	55,134	57,89	60,65	260	180
39	53,963	56,66115	59,3593	38,998	40,95	42,9	300	180
40	393,05	412,7025	432,355	342,6	359,73	376,86	340	180
41	326,74	343,077	359,414	278,56	292,49	306,42	380	180
42	536,26	563,073	589,886	240,24	252,25	264,26	420	180
43	76,247	80,05935	83,8717	66,562	69,89	73,22	460	180
44	53,52	56,196	58,872	39,76	41,75	43,74	500	180
45	40,328	42,3444	44,3608	31,964	33,56	35,16	540	180
46	39,653	41,63565	43,6183	20,758	21,8	22,83	580	180
47	66,195	69,50475	72,8145	42,361	44,48	46,6	300	240
48	73,904	77,5992	81,2944	51,653	54,24	56,82	340	240
49	114,77	120,5085	126,247	57,965	60,86	63,76	380	240

50	918,37	964,2885	1010,207	1205,1	1265,36	1325,61	420	240
51	210,3	220,815	231,33	146,66	153,99	161,33	460	240
52	66,68	70,014	73,348	56,608	59,44	62,27	500	240
53	42,207	44,31735	46,4277	40,184	42,19	44,2	540	240
54	433,74	455,427	477,114	283,41	297,58	311,75	580	240
55	62,1	65,205	68,31	26,86	28,2	29,55	200	280
56	92,46	97,083	101,706	88,38	92,8	97,22	240	280
57	85,188	89,4474	93,7068	55,436	58,21	60,98	280	280
58	345,3	362,565	379,83	332,4	349,02	365,64	320	280
59	22,5	23,625	24,75	16,83	17,67	18,51	360	280
60	80,551	84,57855	88,6061	49,156	51,61	54,07	400	280
61	95,86	100,653	105,446	90,758	95,3	99,83	440	280
62	62,92	66,066	69,212	47,7	50,09	52,47	480	280
63	478,8	502,74	526,68	463,74	486,93	510,11	100	420
64	120,94	126,987	133,034	52,006	54,61	57,21	180	420
65	139,11	146,0655	153,021	100,34	105,36	110,37	240	420
66	391,78	411,369	430,958	193,5	203,18	212,85	300	420
67	27,741	29,12805	30,5151	26,713	28,05	29,38	360	420
68	52,814	55,4547	58,0954	25,257	26,52	27,78	420	420
69	66,89	70,2345	73,579	38,713	40,65	42,58	480	420
70	467,5	490,875	514,25	395,14	414,9	434,65	540	420
71	594,85	624,5925	654,335	239,74	251,73	263,71	600	420
72	132,5	139,125	145,75	84,363	88,58	92,8	300	460
73	52,699	55,33395	57,9689	22,482	23,61	24,73	360	460
74	869,79	913,2795	956,769	614,775	645,51	676,25	420	460
75	31,349	32,91645	34,4839	29,817	31,31	32,8	480	460
76	192,39	202,0095	211,629	122,43	128,55	134,67	540	460
77	65,75	69,0375	72,325	45,37	47,64	49,91	600	460
78	238,15	250,0575	261,965	223,22	234,38	245,54	260	460
79	294,55	309,2775	324,005	162,47	170,59	178,72	300	500
80	485,57	509,8485	534,127	437,92	459,82	481,71	340	500
81	243,53	255,7065	267,883	183,03	192,18	201,33	380	500
82	243,53	255,7065	267,883	183,03	192,18	201,33	420	500
83	134,25	140,9625	147,675	119,29	125,25	131,22	460	500
84	22,71	23,8455	24,981	27,96	29,36	30,76	500	500

85	49,513	51,98865	54,4643	26,515	27,84	29,17	540	500
86	383,78	402,969	422,158	257,16	270,02	282,88	300	540
87	49,64	52,122	54,604	20,6	21,63	22,66	340	540
88	22,473	23,59665	24,7203	11,806	12,4	12,99	380	540
89	62,93	66,0765	69,223	42,96	45,11	47,26	100	460
90	30,67	32,2035	33,737	34,93	36,68	38,42	140	460
91	62,53	65,6565	68,783	66,79	70,13	73,47	180	460
92	114,57	120,2985	126,027	81,748	85,84	89,92	220	460
93	81,292	85,3566	89,4212	66,526	69,85	73,18	260	460
94	31,733	33,31965	34,9063	15,96	16,76	17,56	300	460
95	33,32	34,986	36,652	60,48	63,5	66,53	340	460
96	531,28	557,844	584,408	224,85	236,09	247,34	360	300
97	507,03	532,3815	557,733	367,42	385,79	404,16	400	300
98	26,39	27,7095	29,029	11,7	12,29	12,87	440	300
99	45,99	48,2895	50,589	30,392	31,91	33,43	480	300
100	100,66	105,693	110,726	47,572	49,95	52,33	200	540
101	456,48	479,304	502,128	350,3	367,82	385,33	240	540
102	522,56	548,688	574,816	449,29	471,75	494,22	280	540
103	408,43	428,8515	449,273	168,46	176,88	185,31	320	540
104	141,48	148,554	155,628	134,25	140,96	147,68	360	540
105	104,43	109,6515	114,873	66,024	69,33	72,63	400	540
106	96,793	101,63265	106,4723	83,647	87,83	92,01	440	540
107	493,92	518,616	543,312	419,34	440,31	461,27	480	540
108	225,38	236,649	247,918	135,88	142,67	149,47	520	540
109	509,21	534,6705	560,131	387,21	406,57	425,93	560	540
110	188,5	197,925	207,35	173,46	182,13	190,81	600	540
111	918,03	963,9315	1009,833	898,55	943,48	988,41	620	620
112	305,08	320,334	335,588	215,37	226,14	236,91	680	620
113	54,38	57,099	59,818	40,97	43,02	45,07	700	620
114	211,14	221,697	232,254	192,9	202,55	212,19	200	580
115	67,009	70,35945	73,7099	53,336	56	58,67	240	580
116	162,07	170,1735	178,277	90,321	94,84	99,35	280	580
117	48,785	51,22425	53,6635	29,156	30,61	32,07	320	580
118	33,9	35,595	37,29	18,98	19,93	20,88	360	580

- Llaves

Desde	Hasta	R	I	Estado
46	27	0,5258	3000	Abierto
17	27	0,5258	3000	Abierto
8	24	0,4272	3000	Abierto
56	45	0,48	3000	Abierto
65	56	0,36	3000	Abierto
38	65	0,57	3000	Abierto
9	42	0,53	3000	Abierto
61	100	0,3957	3000	Abierto
76	95	0,68	3000	Abierto
91	78	0,4062	3000	Abierto
103	80	0,4626	3000	Abierto
113	86	0,651	3000	Abierto
110	89	0,8125	3000	Abierto
115	123	0,7089	3000	Abierto
25	36	0,5	3000	Abierto
4	5	0,015	3000	Cerrado
11	12	0,187	3000	Cerrado
11	18	0,218	3000	Cerrado
30	31	0,12	3000	Cerrado
30	40	0,33	3000	Cerrado
30	58	0,391	3000	Cerrado
68	69	0,21	3000	Cerrado
67	81	0,559	3000	Cerrado
68	93	0,669	3000	Cerrado
105	106	0,1501	3000	Cerrado
105	119	0,6102	3000	Cerrado
46	27	0.5258	3000	Cerrado
17	27	0.5258	3000	Cerrado
8	24	0.4272	3000	Cerrado
54	43	0.48	3000	Cerrado
62	49	0.36	3000	Cerrado
37	62	0.57	3000	Cerrado

9	40	0.53	3000	Cerrado
58	96	0.3957	3000	Cerrado
73	91	0.68	3000	Cerrado
88	75	0.4062	3000	Cerrado
99	77	0.4626	3000	Cerrado
108	83	0.651	3000	Cerrado
105	86	0.8125	3000	Cerrado
110	118	0.7089	3000	Cerrado
25	35	0.5	3000	Cerrado
25	26	0.178	3000	Abierto
14	15	0.15	3000	Abierto
6	7	0.015	3000	Abierto
51	52	0.12	3000	Abierto
34	35	0.154	3000	Abierto
59	60	0.338	3000	Abierto
24	25	0.133	3000	Abierto
56	57	0.406	3000	Abierto
71	72	0.303	3000	Abierto
73	74	0.206	3000	Abierto
75	76	0.591	3000	Abierto
105	106	0.33	3000	Abierto
79	86	0.16	3000	Abierto
106	107	0.156	3000	Abierto
34	35	0.154	3000	Abierto

Anexo 5. Algoritmo desarrollado en Python

- Modelo inicial.

```
import pyomo.environ as pyo
```

```
def modelo_original( RAMOS,NODOS,GENERADOR,DATOS):
```

```
    iniciales=[]
```

```
    for d in range(1,4):
```

```
        Iqdr={ }#
```

```
        Pij={ }#
```

```
        Qij={ }#
```

```
        PSi={ }
```

```
        QSi={ }
```

```
        Vsqr={ }
```

```
    model = pyo.ConcreteModel()
```

```
    vnom=float(DATOS[0][0])
```

```
    Vmax=vnom*1.2
```

```
    Vmin=vnom*0.8
```

```
    # Iterate over the dictionary and print each sheet name and its content
```

```
    for ear in range(len(RAMOS)):
```

```
        i=int(RAMOS[ear][1])
```

```
        j=int(RAMOS[ear][2])
```

```
        setattr(model, f"Iqdr{i}_{j}", pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals, bounds=(0, RAMOS[ear][5]**2 )))
```

```
        setattr(model, f"Pij{i}_{j}", pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals))
```

```
        setattr(model, f"Qij{i}_{j}", pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals))
```

```
        Iqdr[ f"Iqdr{i}_{j}"]=getattr(model,f"Iqdr{i}_{j}")
```

```

Pij[ f"Pij{i}_{j}"]=getattr(model, f"Pij{i}_{j}")

Qij[ f"Qij{i}_{j}"]=getattr(model, f"Qij{i}_{j}")

#print(f"Iqdr{i}_{j}", RAMOS[ear][5])

lista_generadores=[]

for eg in range(len(GENERADOR)):

    lista_generadores.append( int(GENERADOR[eg][0] ) )

for ear in range(len(NODOS)):

    i=int(NODOS[ear][0])

    setattr(model, f"Vsqr{i}",pyo.Var(domain=pyo.Reals      , bounds=(Vmin**2, Vmax**2      )
,initialize=vnom**2 ))

    Vsqr[ f"Vsqr{i}"]=getattr(model, f"Vsqr{i}")

    if i in lista_generadores:

        setattr(model, f"PSi{i}", pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals))

        setattr(model, f"QSi{i}", pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals))

        PSi[ f"PSi{i}"]=getattr(model, f"PSi{i}")

        QSi[ f"QSi{i}"]=getattr(model, f"QSi{i}")

    #print(f"PSi{i}")

sums1 = [ Iqdr[ f"Iqdr{int(RAMOS[ear][1])}_{int(RAMOS[ear][2])}"]* float(RAMOS[ear][3]) for ear in
range(len(RAMOS)) ]

sums3 = [ PSi[ f"PSi{ear}"]*PSi[ f"PSi{ear}"] for ear in lista_generadores      ]

# Objective

model.objective = pyo.Objective(

    expr= sum(sums3)* (sum(sums1) ),

    sense=pyo.minimize)

```

```

model.power_balance_p = pyo.ConstraintList()

model.power_balance_q = pyo.ConstraintList()

for i in range(len(NODOS)):

    sumsPki= []
    sumsQki= []

    sumsPij= []
    sumsQij= []

    print("_____")
    print(i+1)

    for item in range(len(RAMOS)):

        if int(RAMOS[item][2])-1== i:

            y=int(RAMOS[item][1])
            z=int(RAMOS[item][2])

            sumsPki.append(Pij[ f"Pij{y}_{z}"])
            sumsQki.append(Qij[ f"Qij{y}_{z}"])

            print( f"Pij{y}_{z}" , 'ki')

        if int(RAMOS[item][1])-1== i:

            y=int(RAMOS[item][1])
            z=int(RAMOS[item][2])

            Rij = RAMOS[item][3]/1000

```

```

Xij = RAMOS[item][4]/1000

Zij = (Rij**2 + Xij**2)

sumsPij.append( Pij[ f"Pij{y}_{z}" ] )

sumsPij.append( float(Rij)*Iqdr[f"Iqdr{y}_{z}"])

sumsQij.append( Qij[ f"Qij{y}_{z}" ] )

sumsQij.append( float(Xij)*Iqdr[f"Iqdr{y}_{z}"])

print( f"Pij{y}_{z}" , 'ij')

if i+1 in lista_generadores:

    model.power_balance_p.add( sum(sumsPki)-sum(sumsPij)+ PSi[ f"PSi{i+1}" ] == NODOS[i][d] ) #Ec.

    model.power_balance_q.add(sum(sumsQki)-sum(sumsQij)+ QSi[ f"QSi{i+1}" ] == NODOS[i][d+3]) #Ec.

else:

    model.power_balance_p.add( sum(sumsPki)-sum(sumsPij)== NODOS[i][d] )

    model.power_balance_q.add(sum(sumsQki)-sum(sumsQij) == NODOS[i][d+3])

model.voltage_drop = pyo.ConstraintList()

model.corriente_ramo = pyo.ConstraintList()

for row in RAMOS:

    i, j = int(row[1]), int(row[2])

    Rij = row[3]/1000

    Xij = row[4]/1000

    Zij = (Rij**2 + Xij**2)

```

```

model.voltage_drop.add(Vsqr[f"Vsqr{i}"] - Vsqr[f"Vsqr{j}"] - 2 * (Rij * Pij[f"Pij{i}_{j}"] + Xij *
Qij[f"Qij{i}_{j}"]) - Zij * Iqdr[f"Iqdr{i}_{j}"] == 0)

```

```

model.corriente_ramo.add( Iqdr[ f"Iqdr{i}_{j}"] * Vsqr[ f"Vsqr{j}"] >= Pij[ f"Pij{i}_{j}"]*Pij[ f"Pij{i}_{j}"]
+ Qij[ f"Qij{i}_{j}"]*Qij[ f"Qij{i}_{j}"] )

```

```

#voltaje_drop - Ec.79

```

```

#corriente_ramo - Ec.80

```

```

sumLlaves=[]

```

```

sumLlaves=sum(sumLlaves)

```

```

solver = pyo.SolverFactory('bonmin')

```

```

results = solver.solve(model) # tee=True for console output

```

```

iniciales.append([Iqdr,Pij,Qij,PSi,QSi,Vsqr])

```

```

return iniciales

```

- Modelo final.

```

import pandas as pd

```

```

file_path = 'C34.xlsx'

```

```

# Read all sheets into a dictionary

```

```

datos = pd.read_excel(file_path, sheet_name=None)

```

```

RAMOS=""

```

```

NODOS=""

```

```

LLAVES=""

GENERADOR=""

DATOS=""

d=1

# Iterate over the dictionary and print each sheet name and its content
for sheet_name, sheet_data in datos.items():

    globals()[sheet_name] = sheet_data.values

    print(f"Hoja: {sheet_name}")

    print(sheet_data)

    print("_____")

import modelo_inicial

vinicial=modelo_inicial.modelo_original(RAMOS,NODOS,GENERADOR,DATOS)#[Iqdr,Pij,Qij,PSi,QSi,Vsqr]

fromto=[]

for llave in LLAVES:

    fromto.append( [int(llave[0]),int(llave[1])] )

RAMOS2=[]

for eachRamo in RAMOS:

    print(eachRamo)

    if not([int(eachRamo[1]),int(eachRamo[2])] in fromto):

        RAMOS2.append(eachRamo)

ramosOrig=RAMOS

RAMOS=RAMOS2

import pyomo.environ as pyo

import math

```

```

import logging

from pyomo.util.infeasible import log_infeasible_constraints

def log_pyomo_infeasible_constraints(model_instance):

    # Create a logger object with DEBUG level

    logging_logger = logging.getLogger()

    logging_logger.setLevel(logging.DEBUG)

    # Create a console handler

    ch = logging.StreamHandler()

    ch.setLevel(logging.DEBUG)

    # add the handler to the logger

    logging_logger.addHandler(ch)

    # Log the infeasible constraints of pyomo object

    print("Displaying Infeasible Constraints")

    log_infeasible_constraints(model_instance, log_expression=True,

                              log_variables=True, logger=logging_logger)

vnom=float(DATOS[0][0])

print('VNOM',vnom)

Vmax=vnom*1.2

Vmin=vnom*0.8

# Iterate over the dictionary and print each sheet name and its content

m_corriente=[]

m_voltaje=[]

m_switches=[]

```

```
for d in range(1,4):
```

```
    Iqdr={ }#
```

```
    Pij={ }#
```

```
    Qij={ }#
```

```
    PSi={ }
```

```
    QSi={ }
```

```
    Vsqr={ }
```

```
    Qch={ }#
```

```
    Pch={ }#
```

```
    Ichsqr={ }#
```

```
    W={ }
```

```
model = pyo.ConcreteModel()
```

```
for ear in range(len(RAMOS)):
```

```
    i=int(RAMOS[ear][1])
```

```
    j=int(RAMOS[ear][2])
```

```
        setattr(model, f"Iqdr{i}_{j}", pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals, bounds=(0, RAMOS[ear][5]**2), initialize=vinicial[d-1][0][f"Iqdr{i}_{j}"].value ))
```

```
        setattr(model, f"Pij{i}_{j}", pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals, initialize=vinicial[d-1][1][f"Pij{i}_{j}"].value))
```

```
        setattr(model, f"Qij{i}_{j}", pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals, initialize=vinicial[d-1][2][f"Qij{i}_{j}"].value))
```

```
    Iqdr[ f"Iqdr{i}_{j}"]=getattr(model,f"Iqdr{i}_{j}")
```

```
    Pij[ f"Pij{i}_{j}"]=getattr(model, f"Pij{i}_{j}")
```

```
    Qij[ f"Qij{i}_{j}"]=getattr(model, f"Qij{i}_{j}")
```

```

print( f"_____ Iqdr{i}_{j}", vinicial[d-1][0][f"Iqdr{i}_{j}"].value )

print(f"Pij{i}_{j}", vinicial[d-1][1][f"Pij{i}_{j}"].value )

print(f"Qij{i}_{j}", vinicial[d-1][2][f"Qij{i}_{j}"].value)

for ear in range(len(LLAVES)):

    i=int(LLAVES[ear][0])

    j=int(LLAVES[ear][1])

    if LLAVES[ear][4]=='Cerrado':

        setattr(model, f"W{i}_{j}", pyo.Var(domain=pyo.Binary ,initialize=0))

        setattr(model, f"Ichsqr{i}_{j}", pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals, bounds=(0, LLAVES[ear][3]**2
),initialize=vinicial[d-1][0][f"Iqdr{i}_{j}"].value))

        setattr(model,      f"Qch{i}_{j}",      pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals,initialize=vinicial[d-
1][1][f"Pij{i}_{j}"].value))

        setattr(model,      f"Pch{i}_{j}",      pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals,initialize=vinicial[d-
1][2][f"Qij{i}_{j}"].value))

    else:

        setattr(model, f"W{i}_{j}", pyo.Var(domain=pyo.Binary ,initialize=0))

        setattr(model, f"Ichsqr{i}_{j}", pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals, bounds=(0, LLAVES[ear][3]**2
),initialize=0 ) )

        setattr(model, f"Qch{i}_{j}", pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals,initialize=0 ))

        setattr(model, f"Pch{i}_{j}", pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals,initialize=0 ))

```

```

Ichsqr[ f"Ichsqr{i}_{j}"]=getattr(model, f"Ichsqr{i}_{j}")

Qch[ f"Qch{i}_{j}"]=getattr(model, f"Qch{i}_{j}")

Pch[ f"Pch{i}_{j}"]=getattr(model, f"Pch{i}_{j}")

#print(f"Ichsqr{i}_{j}", LLAVES[ear][3])

W[f"W{i}_{j}"]=getattr(model, f"W{i}_{j}")

for eaw in W:

    print('W_INICIAL',eaw,W[eaw].value)

lista_generadores=[]

for eg in range(len(GENERADOR)):

    lista_generadores.append( int(GENERADOR[eg][0] ) )

print('Lista Generadores',lista_generadores)

for ear in range(len(NODOS)):

    i=int(NODOS[ear][0])

    setattr(model, f"Vsqr{i}",pyo.Var(domain=pyo.Reals , bounds=(Vmin**2, Vmax**2 ),initialize=vnom**2
))

Vsqr[ f"Vsqr{i}"]=getattr(model, f"Vsqr{i}")

if i in lista_generadores:

```

```

        setattr(model, f"PSi{i}", pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals, initialize=vinicial[d-
1][3][f"PSi{i}"].value ))

        setattr(model, f"QSi{i}", pyo.Var(domain=pyo.NonNegativeReals, initialize=vinicial[d-
1][4][f"QSi{i}"].value))

        PSi[ f"PSi{i}"]=getattr(model, f"PSi{i}")

        QSi[ f"QSi{i}"]=getattr(model, f"QSi{i}")

#print(f"PSi{i}")

sums1 = [ Iqdr[ f"Iqdr{int(RAMOS[ear][1])}_{int(RAMOS[ear][2])}"]* float(RAMOS[ear][3]) for ear in
range(len(RAMOS)) ]

sums2 = [ Ichsqr[ f"Ichsqr{int(LLAVES[ear][0])}_{int(LLAVES[ear][1])}"]* float(LLAVES[ear][2]) for ear in
range(len(LLAVES)) ]

sums3 = [ PSi[ f"PSi{ear}"]*PSi[ f"PSi{ear}"] for ear in lista_generadores ]

# Objective

model.objective = pyo.Objective(

    expr= sum(sums3)* (sum(sums1) + sum(sums2)),

    sense=pyo.minimize)

model.power_balance_p = pyo.ConstraintList()

model.power_balance_q = pyo.ConstraintList()

for i in range(len(NODOS)):

    sumsPki= []

    sumsQki= []

```

```

sumsPij= []

sumsQij= []

print("_____")

print(i+1)

for item in range(len(RAMOS)):

    if int(RAMOS[item][2])-1== i:

        y=int(RAMOS[item][1])

        z=int(RAMOS[item][2])

        sumsPki.append(Pij[ f"Pij{y}_{z}"])

        sumsQki.append(Qij[ f"Qij{y}_{z}"])

        print( f"Pij{y}_{z}" , 'ki')

    if int(RAMOS[item][1])-1== i:

        y=int(RAMOS[item][1])

        z=int(RAMOS[item][2])

        Rij = RAMOS[item][3]/1000

        Xij = RAMOS[item][4]/1000

        Zij = (Rij**2 + Xij**2)

        sumsPij.append( Pij[ f"Pij{y}_{z}"])

        sumsPij.append( float(Rij)*Iqdr[f"Iqdr{y}_{z}"])

```

```

sumsQij.append( Qij[ f"Qij{y}_{z}" ] )

sumsQij.append( float(Xij)*Iqdr[ f"Iqdr{y}_{z}" ] )

print( f"Pij{y}_{z}" , 'ij')

sumsPchki=[]

sumsQchki=[]

sumsPchij=[]

sumsQchij=[]

for item in range(len(LLAVES)):

    if int(LLAVES[item][1])-1== i:

        y=int(LLAVES[item][0])

        z=int(LLAVES[item][1])

        sumsPchki.append(Pch[ f"Pch{y}_{z}" ])

        sumsQchki.append(Qch[ f"Qch{y}_{z}" ])

    if int(LLAVES[item][0])-1== i:

        y=int(LLAVES[item][0])

        z=int(LLAVES[item][1])

        sumsPchij.append(Pch[ f"Pch{y}_{z}" ])

        sumsQchij.append(Qch[ f"Qch{y}_{z}" ])

if i+1 in lista_generadores:

    model.power_balance_p.add(      sum(sumsPki)-sum(sumsPij)+sum(sumsPchki)-sum(sumsPchij)+      PSi[
f"PSi{i+1}" ] == NODOS[i][d] ) #Ec. 57

```

```

        model.power_balance_q.add(sum(sumsQki)-sum(sumsQij)+sum(sumsQchki)-sum(sumsQchij)+      QSi[
f"QSi{i+1}"] == NODOS[i][d+3]) #Ec. 58

```

```

else:

```

```

        model.power_balance_p.add(          sum(sumsPki)-sum(sumsPij)+sum(sumsPchki)-sum(sumsPchij)==
NODOS[i][d] )

```

```

        model.power_balance_q.add(sum(sumsQki)-sum(sumsQij)+sum(sumsQchki)-sum(sumsQchij)      ==
NODOS[i][d+3])

```

```

model.voltage_drop = pyo.ConstraintList()

```

```

model.corriente_ramo = pyo.ConstraintList()

```

```

for row in RAMOS:

```

```

    i, j = int(row[1]), int(row[2])

```

```

    Rij = row[3]/1000

```

```

    Xij = row[4]/1000

```

```

    Zij = (Rij**2 + Xij**2)

```

```

        model.voltage_drop.add(Vsqr[f"Vsqr{i}"] - Vsqr[f"Vsqr{j}"] - 2 * (Rij * Pij[f"Pij{i}_{j}"] + Xij *
Qij[f"Qij{i}_{j}"]) - Zij * Iqdr[f"Iqdr{i}_{j}"] == 0) #Ec. 59

```

```

        model.corriente_ramo.add( Iqdr[ f"Iqdr{i}_{j}"] * Vsqr[ f"Vsqr{j}"] >= Pij[ f"Pij{i}_{j}"]*Pij[ f"Pij{i}_{j}"]
+ Qij[ f"Qij{i}_{j}"]*Qij[ f"Qij{i}_{j}"] ) #Ec. 61

```

```

model.potencia_activa_llave = pyo.ConstraintList()

```

```

model.potencia_reactiva_llave= pyo.ConstraintList()

```

```

model.limite_I_llave= pyo.ConstraintList()

```

```

model.corriente_llave= pyo.ConstraintList()

sumLlaves=[]

for row in LLAVES:
    i, j = int(row[0]), int(row[1])
    sumLlaves.append(W[f"W{i}_{j}"])

    model.potencia_activa_llave .add(Pch[ f"Pch{i}_{j}"]*Pch[ f"Pch{i}_{j}"]      <= (Vmax *Ichsqr[
f"Ichsqr{i}_{j}"])*W[f"W{i}_{j}"]) *Vmax *Ichsqr[ f"Ichsqr{i}_{j}"])

    model.potencia_reactiva_llave.add(Qch[ f"Qch{i}_{j}"]*Qch[ f"Qch{i}_{j}"] <= (Vmax *Ichsqr[
f"Ichsqr{i}_{j}"])*W[f"W{i}_{j}"])*Vmax *Ichsqr[ f"Ichsqr{i}_{j}"])

    model.corriente_llave.add( Ichsqr[ f"Ichsqr{i}_{j}"]* Vsqr[f"Vsqr{j}"]>= Pch[ f"Pch{i}_{j}"]**2+ Qch[
f"Qch{i}_{j}"]**2)

    model.limite_I_llave.add( Ichsqr[ f"Ichsqr{i}_{j}"] <= int(row[3])**2 * W[f"W{i}_{j}"])

model.switching_constraints=pyo.ConstraintList()

sumLlaves=sum(sumLlaves)

model.switching_constraints.add( len(RAMOS) + sumLlaves == len(NODOS)-1)

solver = pyo.SolverFactory('bonmin')

solver.options['max_iter'] = 30000

solver.options['required_infeasibility_reduction'] = 0.9

solver.options['expect_infeasible_problem'] = "no"

results = solver.solve(model, tee=True) # tee=True for console output

corrientes=[]

```

```

voltajes=[]

iswitches=[]

for item in Iqdr:
    corrientes.append(Iqdr[item].value**.5 )

for item in Vsqr:
    voltajes.append(Vsqr[item].value**.5 )

for item in Ichsqr:
    iswitches.append( Ichsqr[item].value**.5 )

m_corriente.append(corrientes)
m_voltaje.append(voltajes)
m_switches.append(iswitches)

import networkx as nx
import matplotlib.pyplot as plt
G = nx.Graph()

positions={}

for ean in NODOS:

    positions[int(ean[0])]=( int(ean[7]),int(ean[8]) )

```

```

G.add_nodes_from(positions)

for ear in RAMOS:

    G.add_edge(int(ear[1]),int(ear[2]) )

#nx.draw(G, pos=positions, with_labels=True, node_color='skyblue', node_size=500, font_size=8,
font_weight='bold')

nx.draw_networkx_nodes(G, pos=positions, node_color='skyblue', node_size=500)

nx.draw_networkx_edges(G, pos=positions, edgelist=[(int(ear[1]), int(ear[2])) for ear in RAMOS],
edge_color='black')

nx.draw_networkx_labels(G, pos=positions, font_size=8, font_weight='bold')

switchesR=[]

ks=0

for sw in W:

    if W[sw].value>0.9:

        switchesR.append(ks)

        ks+=1

nx.draw_networkx_edges(G, pos=positions, edgelist=[(int(LLAVES[ear][0]), int(LLAVES[ear][1])) for ear in
switchesR], edge_color='red')

plt.savefig('imageD_'+str(d)+'.png', format='png')

```

```

plt.show()

import numpy as np

data = np.array(m_corriente)
num_bars = data.shape[1]
positions = np.arange(num_bars)
bar_width = 0.25
fig, ax = plt.subplots()
for i in range(data.shape[0]):
    ax.bar(positions + i * bar_width, data[i], bar_width, label=f'I d {i+1}')

plt.savefig('Corrientes.png', format='png')

print(corrientes)

df = pd.DataFrame(m_corriente)
df.T.to_excel('resultados_corriente.xlsx', index=False)

df = pd.DataFrame(m_voltaje)
df.T.to_excel('resultados_voltaje.xlsx', index=False)

df = pd.DataFrame(m_switches)
df.T.to_excel('resultados_switch.xlsx', index=False)

```

Anexo 6. Resultados iniciales del IEEE 34 barras

- Corrientes A y pérdidas de potencias activa kW en los ramos.

Ramos	Corrientes			Potencias		
	0	1	2	0	1	2
1	425,8858	245,5185	145,5136	21,22131	7,052681	2,477381
2	405,6344	233,6329	138,403	17,65507	5,856898	2,055374
3	385,2779	221,723	131,2802	24,41823	8,087	2,835074
4	364,728	209,7376	124,1345	19,88746	6,576487	2,303702
5	344,0267	197,7023	116,9713	17,69398	5,843385	2,045502
6	117,696	67,91697	40,2841	4,355176	1,450238	0,510211
7	96,99692	55,95513	33,17607	1,972001	0,656253	0,230697
8	75,99715	43,82191	25,9788	1,815838	0,603761	0,212188
9	54,933	31,66776	18,77432	0,632496	0,210197	0,073879
10	33,64765	19,39833	11,4962	0,148313	0,049295	0,017313
11	12,5397	7,229754	4,286549	0,016479	0,005478	0,001926
12	20,35766	11,91007	7,12285	0,065149	0,022299	0,007976
13	13,95824	8,16737	4,884368	0,040837	0,013982	0,005
14	7,556538	4,423917	2,645626	0,005984	0,002051	0,000734
15	1,1555	0,680947	0,407225	7E-05	2,43E-05	8,69E-06
16	226,3353	129,7872	76,68824	9,190246	3,021943	1,055067
17	205,3741	117,6667	69,49535	6,938366	2,277576	0,79447
18	184,3156	105,5146	62,29153	7,062831	2,31462	0,806701
19	163,1487	93,32755	55,07561	5,030709	1,646196	0,573298
20	141,8938	81,11222	47,84995	3,805299	1,243467	0,432738
21	120,5618	68,87222	40,61579	3,808208	1,242766	0,432206
22	99,14101	56,60393	33,37192	2,575182	0,839449	0,291785
23	77,64672	44,31231	26,12005	1,895522	0,61735	0,214502
24	56,08294	31,99869	18,86065	0,659254	0,214613	0,07456
25	34,48555	19,67446	11,59763	0,155792	0,050708	0,01762
26	12,87522	7,346148	4,333219	0,017373	0,005656	0,001968
27	20,70025	11,96241	7,108386	0,06736	0,022495	0,007943
28	13,80176	7,975461	4,739107	0,029945	0,009999	0,003531
29	6,901361	3,987887	2,369608	0,007487	0,0025	0,000883
30	21,29038	12,27262	7,280116	0,071256	0,023677	0,008332

31	15,97017	9,205235	5,460356	0,053458	0,017761	0,006249
32	10,64767	6,137112	3,640338	0,017822	0,005921	0,002083
33	5,324023	3,068618	1,82019	0,002971	0,000987	0,000347

- Voltajes kV en los nodos.

Nodos	Voltajes		
	0	1	2
1	7,621024	7,621024	7,621024
2	7,567808	7,590371	7,602862
3	7,521333	7,563625	7,587023
4	7,458021	7,527239	7,565488
5	7,403585	7,495972	7,546988
6	7,352264	7,466507	7,529559
7	7,317512	7,446466	7,517672
8	7,298414	7,435453	7,511141
9	7,275989	7,422526	7,503477
10	7,265197	7,416307	7,499789
11	7,261048	7,413915	7,498371
12	7,25981	7,4132	7,497948
13	7,518324	7,561865	7,58597
14	7,515572	7,560255	7,585007
15	7,514826	7,559818	7,584746
16	7,514768	7,559784	7,584725
17	7,311724	7,443282	7,515837
18	7,277997	7,423974	7,504435
19	7,240758	7,402673	7,49186
20	7,210802	7,385549	7,481754
21	7,184755	7,370668	7,472975
22	7,155007	7,353683	7,462957
23	7,130554	7,339727	7,454727
24	7,107581	7,326619	7,446998
25	7,096523	7,32031	7,443278
26	7,092274	7,317886	7,441849
27	7,091005	7,317161	7,441422

28	7,314469	7,444708	7,516627
29	7,312441	7,443536	7,515931
30	7,311427	7,442949	7,515582
31	7,262083	7,414513	7,498725
32	7,258969	7,412718	7,497661
33	7,257412	7,411821	7,497128
34	7,256893	7,411522	7,496951

Anexo 7. Resultados iniciales del IEEE 118 barras

- Corrientes A y pérdidas de potencia activa kW en los ramos.

Ramos	Corrientes			Potencias		
	0	1	2	0	1	2
1	1013,395	1065,702	1118,067	36,97093	40,88594	45,00265
2	1,50106	1,576195	1,651591	7,44E-05	8,2E-05	9E-05
3	806,7009	848,5178	890,3777	29,28448	32,39921	35,67476
4	38,66287	40,60791	42,55437	0,022422	0,024735	0,027163
5	31,44298	33,02464	34,60789	0,01483	0,016359	0,017966
6	19,29314	20,26366	21,23522	0,005583	0,006159	0,006764
7	10,05072	10,55648	11,06236	0,001818	0,002006	0,002203
8	7,724379	8,113314	8,501957	0,001253	0,001382	0,001518
9	192,9012	202,7018	212,516	6,177005	6,82061	7,497068
10	175,8547	184,7977	193,7538	3,463588	3,82482	4,20454
11	29,83339	31,3402	32,84825	0,166436	0,183673	0,201774
12	27,38656	28,77009	30,15417	0,106503	0,117536	0,129117
13	23,18255	24,35359	25,5256	0,096738	0,106758	0,11728
14	9,101706	9,561085	10,02183	0,012426	0,013712	0,015066
15	6,399562	6,72265	7,046534	0,006553	0,007231	0,007945
16	3,142812	3,301417	3,460361	0,001551	0,001711	0,00188
17	133,5528	140,3605	147,1796	3,888324	4,294836	4,722277
18	131,7602	138,477	145,2053	2,048567	2,262753	2,487979
19	118,4553	124,4972	130,5498	2,245066	2,479927	2,726919
20	68,62391	72,13252	75,64732	0,565109	0,624372	0,686702
21	49,89568	52,45083	55,011	0,298749	0,330131	0,363145
22	41,64151	43,77608	45,91532	2,444961	2,702046	2,972585
23	34,6072	36,38159	38,15947	0,350914	0,387821	0,426651
24	20,18105	21,21558	22,25251	0,054168	0,059863	0,065858
25	5,02208	5,279304	5,537466	0,004489	0,004961	0,005458
26	2,778633	2,920965	3,063818	0,001374	0,001519	0,001671
27	765,4124	805,1543	844,9371	8,787843	9,724101	10,70878
28	705,0399	741,7381	778,4755	5,964974	6,602105	7,27229
29	457,2006	481,2163	505,2413	25,08388	27,7883	30,63225
30	359,2237	378,2305	397,2351	27,09874	30,04225	33,1371

31	312,9047	329,5263	346,1363	11,74912	13,03051	14,37724
32	261,4847	275,3951	289,3915	12,17062	13,49996	14,90704
33	245,4565	258,5329	271,6918	10,7243	11,89738	13,13932
34	229,1008	241,3198	253,6179	8,083026	8,96823	9,905597
35	87,09545	91,54998	96,01371	1,418511	1,567322	1,723884
36	42,19533	44,35415	46,51722	0,236799	0,26165	0,287792
37	153,3824	161,2547	169,1467	7,763637	8,58102	9,441496
38	143,8682	151,2577	158,6665	6,416394	7,092459	7,804265
39	138,7369	145,865	153,0118	2,50223	2,765958	3,043638
40	98,78907	103,877	108,9791	2,732598	3,021323	3,325402
41	66,03956	69,45001	72,87094	5,146244	5,691499	6,266006
42	20,5589	21,62183	22,6874	0,177521	0,196352	0,216182
43	12,68638	13,34255	14,00002	0,043455	0,048066	0,05292
44	7,483802	7,870751	8,258641	0,018986	0,021001	0,023122
45	3,496798	3,678021	3,858806	0,003301	0,003653	0,00402
46	216,4641	228,0179	239,6478	9,839907	10,91835	12,06053
47	210,3376	221,5676	232,8714	5,309027	5,891066	6,507491
48	203,2456	214,0994	225,0252	6,196315	6,875784	7,595454
49	193,4939	203,8292	214,2332	5,615985	6,231953	6,884377
50	74,06178	78,02883	82,02342	1,316435	1,46124	1,614682
51	53,44418	56,30948	59,19508	0,342754	0,380491	0,420487
52	46,44134	48,93246	51,44087	0,873503	0,969726	1,071696
53	41,81489	44,0582	46,31725	0,708136	0,786156	0,868841
54	85,21418	89,56506	93,92219	2,839229	3,136563	3,449159
55	80,2539	84,3534	88,45893	2,61492	2,888891	3,176943
56	70,44304	74,04476	77,65145	2,014662	2,225946	2,448077
57	62,69381	65,90101	69,11302	2,774943	3,066118	3,372287
58	25,72088	27,0382	28,35688	0,223609	0,2471	0,27179
59	23,54761	24,75354	25,9612	0,187418	0,207105	0,227807
60	16,3148	17,15067	17,98725	0,055098	0,060888	0,066973
61	6,11593	6,429631	6,743104	0,009239	0,010211	0,011231
62	712,8096	750,4313	788,2648	14,22673	15,76812	17,39812
63	662,908	698,0271	733,3578	51,4153	57,00729	62,9242
64	440,9279	464,5991	488,4489	49,57643	55,04235	60,8385
65	283,8763	299,3696	315,0095	16,92301	18,82065	20,8385

66	250,0527	263,8022	277,6932	23,9476	26,65358	29,53448
67	247,0902	260,6855	274,4222	30,77101	34,25029	37,95501
68	242,48	255,8325	269,3246	23,87139	26,57281	29,44952
69	236,3041	249,3283	262,4896	53,71772	59,80234	66,28256
70	186,7067	197,0201	207,4455	5,751802	6,404795	7,100548
71	134,917	142,3903	149,9468	5,515384	6,14332	6,812661
72	121,9814	128,7423	135,5794	4,508474	5,022096	5,569679
73	117,3436	123,8484	130,4264	2,836523	3,159716	3,504277
74	29,09191	30,70741	32,34055	0,197197	0,219706	0,243697
75	25,55832	26,97759	28,41289	0,386058	0,430124	0,47711
76	6,63175	7,000228	7,372632	0,005541	0,006174	0,006849
77	212,5928	223,567	234,5748	25,26439	27,94006	30,75916
78	187,4107	197,092	206,8037	6,532836	7,225218	7,954802
79	119,6553	125,8432	132,051	2,663034	2,94559	3,24337
80	68,71834	72,2757	75,84501	1,227775	1,358182	1,495641
81	44,91879	47,24494	49,57924	0,310725	0,343741	0,378548
82	21,11316	22,20678	23,30466	0,102526	0,113422	0,124915
83	7,078536	7,445654	7,813595	0,012627	0,01397	0,015385
84	4,394935	4,62268	4,851244	0,003477	0,003846	0,004236
85	42,0823	44,25274	46,4295	0,283347	0,313329	0,344912
86	6,160989	6,478948	6,797587	0,007592	0,008395	0,009241
87	1,978309	2,080707	2,182819	0,000626	0,000693	0,000762
88	143,8177	151,3173	158,848	13,83729	15,31804	16,88067
89	137,8714	145,0632	152,2857	5,056267	5,59753	6,16879
90	134,367	141,3772	148,4173	4,802495	5,316677	5,859364
91	27,06842	28,47901	29,89467	0,194898	0,21574	0,237722
92	16,08544	16,92373	17,76559	0,068825	0,076186	0,083954
93	7,892836	8,304232	8,717539	0,014515	0,016068	0,017707
94	5,42993	5,712767	5,997198	0,014624	0,016187	0,017839
95	100,7282	105,9854	111,2665	1,988651	2,201649	2,426528
96	55,90495	58,82467	61,75723	0,612571	0,678227	0,747535
97	6,598236	6,943089	7,289043	0,008124	0,008995	0,009914
98	4,344215	4,5711	4,799031	0,001408	0,001559	0,001718
99	506,436	532,9769	559,6523	16,02984	17,75403	19,57567
100	448,7547	472,3946	496,1672	30,22725	33,49582	36,95191

101	404,6609	426,0678	447,6045	22,05718	24,4526	26,98712
102	351,6494	370,3588	389,1929	28,52774	31,64411	34,94438
103	318,7242	335,7376	352,8698	45,40854	50,38571	55,65915
104	303,4668	319,6883	336,0245	15,02943	16,67914	18,42732
105	293,8173	309,5344	325,364	28,48843	31,6178	34,93438
106	283,6726	298,856	314,149	12,55335	13,93313	15,39557
107	232,1062	244,5648	257,1181	20,57422	22,84218	25,24729
108	211,2875	222,6368	234,073	7,258853	8,059616	8,908883
109	160,0069	168,6161	177,293	9,777478	10,85795	12,00419
110	103,9553	109,552	115,193	2,642239	2,934403	3,244373
111	35,67997	37,59789	39,53097	0,265815	0,29516	0,326291
112	5,502896	5,798872	6,096998	0,006968	0,007738	0,008554
113	49,45048	51,93786	54,42627	1,492153	1,64604	1,807546
114	27,89657	29,30018	30,70508	0,145216	0,160196	0,175927
115	21,43552	22,51427	23,59399	0,171478	0,189172	0,207752
116	7,294883	7,662096	8,029689	0,021552	0,023777	0,026113
117	2,962527	3,112063	3,261036	0,004292	0,004736	0,0052

- Voltajes kW en los nodos.

Nodos	Voltajes		
	0	1	2
1	13,2	13,2	13,2
2	13,16316	13,16127	13,15936
3	13,16311	13,16121	13,15931
4	13,12671	13,12292	13,11913
5	13,12515	13,12129	13,11742
6	13,12394	13,12001	13,11608
7	13,12357	13,11963	13,11568
8	13,12334	13,11939	13,11543
9	13,12296	13,11898	13,115
10	13,12209	13,1181	13,11411
11	13,098	13,09279	13,08757
12	13,08785	13,08213	13,0764
13	13,08224	13,07623	13,07022

14	13,07729	13,07104	13,06477
15	13,07601	13,06969	13,06336
16	13,07449	13,06809	13,06169
17	13,07377	13,06734	13,06089
18	13,05227	13,04473	13,03717
19	13,02552	13,01661	13,00769
20	12,99652	12,98614	12,97573
21	12,982	12,97087	12,95973
22	12,97485	12,96336	12,95184
23	12,91015	12,89534	12,8805
24	12,89945	12,88409	12,8687
25	12,89612	12,88059	12,86503
26	12,89503	12,87944	12,86382
27	12,89441	12,87879	12,86315
28	13,10346	13,09847	13,09346
29	13,08461	13,07864	13,07265
30	12,96048	12,94796	12,93544
31	12,84623	12,82766	12,80911
32	12,80714	12,7865	12,76587
33	12,73154	12,70687	12,68219
34	12,66058	12,63213	12,60365
35	12,60943	12,57826	12,54703
36	12,93366	12,91977	12,90588
37	12,92667	12,91242	12,89817
38	13,02604	13,01705	13,00805
39	12,97349	12,9618	12,9501
40	12,94331	12,93007	12,91681
41	12,91201	12,89716	12,88228
42	12,81681	12,79704	12,77723
43	12,8069	12,78662	12,7663
44	12,80338	12,78292	12,76242
45	12,80076	12,78017	12,75953
46	12,79964	12,77898	12,75829
47	12,55597	12,52195	12,48785
48	12,52635	12,49074	12,45505

49	12,49061	12,45309	12,41547
50	12,4567	12,41738	12,37794
51	12,43543	12,39496	12,35437
52	12,42775	12,38688	12,34587
53	12,40839	12,36647	12,32442
54	12,39088	12,34802	12,30503
55	13,05131	13,04363	13,03594
56	13,019	13,00966	13,00032
57	12,99057	12,97978	12,96898
58	12,93473	12,92108	12,90742
59	12,92595	12,91185	12,89774
60	12,91791	12,90341	12,88889
61	12,91457	12,89989	12,8852
62	12,91007	12,89516	12,88023
63	13,16661	13,16485	13,16308
64	13,02773	13,01861	13,00944
65	12,91107	12,89569	12,8802
66	12,84906	12,83029	12,81139
67	12,74982	12,72559	12,70117
68	12,60093	12,56851	12,53582
69	12,49898	12,46095	12,42258
70	12,21047	12,15653	12,1021
71	12,17827	12,12256	12,06632
72	12,1362	12,07815	12,01956
73	12,0982	12,03804	11,97732
74	12,0687	12,00692	11,94454
75	12,06173	11,99955	11,93678
76	12,04659	11,98358	11,91996
77	12,04573	11,98267	11,919
78	12,88569	12,86925	12,85272
79	12,84399	12,82539	12,80671
80	12,81749	12,79752	12,77746
81	12,79752	12,77652	12,75542
82	12,78797	12,76647	12,74488
83	12,78252	12,76074	12,73886

84	12,78064	12,75876	12,73679
85	12,77964	12,75771	12,73568
86	12,8342	12,8151	12,79591
87	12,8325	12,81331	12,79403
88	12,83186	12,81263	12,79332
89	12,81157	12,791	12,7703
90	12,77163	12,74897	12,72618
91	12,73266	12,70797	12,68314
92	12,72503	12,69995	12,67472
93	12,72059	12,69528	12,66981
94	12,71871	12,69329	12,66773
95	12,71676	12,69124	12,66557
96	12,70652	12,68047	12,65426
97	12,69176	12,66494	12,63796
98	12,6903	12,66339	12,63634
99	12,68926	12,66231	12,6352
100	13,16675	13,16501	13,16325
101	13,04899	13,04106	13,03309
102	12,98392	12,97254	12,9611
103	12,89385	12,87767	12,8614
104	12,75126	12,72744	12,70346
105	12,70166	12,67518	12,64852
106	12,60851	12,57703	12,54534
107	12,56434	12,53049	12,49641
108	12,47586	12,43725	12,39838
109	12,44178	12,40134	12,36063
110	12,3817	12,33802	12,29405
111	12,35714	12,31214	12,26683
112	12,37407	12,32999	12,2856
113	12,37279	12,32863	12,28417
114	13,13601	13,13272	13,12941
115	13,12972	13,12611	13,12249
116	13,12016	13,11607	13,11197
117	13,11626	13,11197	13,10768
118	13,11436	13,10998	13,10559

Anexo 8. Resultados finales del IEEE 34 barras

- Corriente A en los ramos.

0	1	2
399,6467	229,4391	136,9498
379,4348	138,6185	82,73814
305,8177	95,65338	57,05834
285,2931	83,71645	49,92943
61,89981	35,78869	21,35004
41,45007	23,96751	14,29103
20,73363	11,98657	7,146514
32,17201	18,91047	11,32529
11,98965	7,047908	4,222818
20,21256	90,82101	54,21191
13,85872	87,08797	51,9768
7,502659	83,34644	49,73867
1,147262	79,60083	47,4991
223,3959	47,92798	28,57956
202,6418	35,95774	21,43883
181,7937	23,97812	14,29478
160,8408	11,99081	7,14801
113,5324	11,85156	7,098519
93,3473	23,69857	14,19541
73,10076	42,66873	25,54844
52,79618	30,81115	18,44777
32,46357	18,94411	11,3437
12,12016	7,073413	4,238337
20,45131	11,82208	7,059638
13,63575	7,881892	4,706605
6,818335	3,941097	2,353356
32,17201	18,91047	11,32529
37,25206	21,89782	13,11665
42,32758	24,88373	14,90757
47,3992	27,86837	16,69809

- Corrientes A LLI en los ramos.

0	1	2
419,7571	241,277	144,0435
0	0	0
133,6433	78,20523	46,83747
0	0	0
52,46791	30,85206	18,4883
0	0	0

- Potencia kW en los ramos.

Ramos	0	1	2
1	0,176196	0,058215	0,020749
2	17,13769	5,648518	2,012439
3	23,68319	3,160881	1,126101
4	13,98191	1,367861	0,48672
5	12,16813	1,047762	0,372696
6	1,204651	0,402693	0,143311
7	0,360115	0,120403	0,042807
8	0,135155	0,045172	0,016057
9	0,002753	0,000952	0,000342
10	0,13559	0,046846	0,016802
11	0,015065	0,005206	0,001869
12	0,064224	1,296657	0,462
13	0,040257	1,589672	0,566253
14	0,005899	0,728007	0,259268
15	6,9E-05	0,332022	0,118223
16	8,953088	0,412098	0,146532
17	6,754977	0,212692	0,075608
18	6,870874	0,119532	0,042482
19	4,889385	0,027174	0,009657
20	0,017861	0,00612	0,00219
21	3,377079	0,0368	0,013202
22	2,282994	0,147145	0,052796

23	1,680066	0,572403	0,205216
24	0,584247	0,198979	0,071331
25	0,138059	0,047013	0,016857
26	0,015395	0,005243	0,001883
27	0,06575	0,021971	0,007835
28	0,029229	0,009766	0,003482
29	0,007308	0,002442	0,000871
30	0,162708	0,056216	0,020163
31	0,290865	0,100506	0,036061
32	0,281643	0,097338	0,034935
33	0,235453	0,081392	0,029221

- Voltaje en los nodos.

0	1	2
6,350853	6,350853	6,350853
7,621024	7,621024	7,621024
7,574993	7,594417	7,605231
7,512302	7,558224	7,583762
7,458407	7,527125	7,56532
7,407602	7,497822	7,547945
7,373145	7,477874	7,53609
7,354212	7,466915	7,529578
7,331988	7,454052	7,521936
7,621024	7,621024	7,621024
7,617069	7,618696	7,619628
7,615888	7,618001	7,619212
7,572006	7,592664	7,604181
7,569273	7,59106	7,603221
7,568532	7,590625	7,60296
7,568474	7,590591	7,60294
7,367506	7,474732	7,534269
7,334159	7,455541	7,522906
7,297357	7,434374	7,510377
7,267768	7,417362	7,500308

7,621024	7,621024	7,621024
7,593014	7,604603	7,611202
7,569993	7,591112	7,603133
7,548366	7,57844	7,595555
7,537956	7,572341	7,591908
7,533956	7,569998	7,590507
7,532762	7,569298	7,590088
7,370125	7,476124	7,535048
7,368112	7,474956	7,534354
7,367106	7,474373	7,534006
7,618055	7,619278	7,619976
7,615087	7,617532	7,618929
7,613603	7,616659	7,618406
7,613108	7,616368	7,618231

Anexo 9. Resultados finales del IEEE 118 barras

- Corriente y potencia en los ramos.

Ramos	Corrientes			Potencias		
	0	1	2	0	1	2
1	1011,95	1064,074	1116,247	36,86557	40,7611	44,85626
2	1,501054	1,576481	1,651583	7,44E-05	8,2E-05	9E-05
3	805,2625	846,8982	888,5661	29,18014	32,27564	35,52974
4	38,66198	40,60707	42,55323	0,022421	0,024734	0,027162
5	31,44215	33,02411	34,60684	0,014829	0,016359	0,017965
6	19,18142	20,14066	21,09956	0,005519	0,006085	0,006678
7	9,992518	10,49235	10,99168	0,001797	0,001982	0,002175
8	7,679648	8,063777	8,44764	0,001239	0,001366	0,001499
9	192,8936	202,6917	212,5066	6,176517	6,819934	7,496402
10	175,8472	184,7877	193,7445	3,46329	3,824408	4,204135
11	29,83233	31,33874	32,84693	0,166424	0,183656	0,201758
12	27,38551	28,76852	30,15287	0,106495	0,117523	0,129106
13	23,18153	24,35236	25,52434	0,096729	0,106747	0,117269
14	9,016194	9,466872	9,918066	0,012194	0,013443	0,014755
15	6,339433	6,656264	6,973567	0,00643	0,007089	0,007781
16	3,113281	3,268903	3,424527	0,001522	0,001678	0,001841
17	133,5464	140,3521	147,1716	3,88795	4,294322	4,721768
18	131,7537	138,4689	145,1973	2,048368	2,262488	2,487707
19	118,449	124,4893	130,5419	2,244825	2,479614	2,726591
20	68,61778	72,12469	75,63979	0,565008	0,624237	0,686565
21	49,88964	52,44336	55,00358	0,298677	0,330037	0,363047
22	41,6355	43,76895	45,90796	2,444256	2,701166	2,971632
23	34,60124	36,3746	38,15218	0,350793	0,387672	0,426487
24	19,71604	20,70167	21,6873	0,0517	0,056998	0,062555
25	4,906044	5,151237	5,396431	0,004284	0,004723	0,005184
26	2,714429	2,850105	2,985782	0,001312	0,001446	0,001587
27	763,9746	803,5351	843,1262	8,754857	9,685031	10,66293
28	703,6029	740,1201	776,6658	5,940684	6,573333	7,238518
29	455,9449	479,8009	503,6542	24,94629	27,62507	30,44011
30	357,9716	376,8197	395,6532	26,91017	29,81856	32,8737

31	311,6553	328,1188	344,5583	11,65549	12,91943	14,24645
32	260,2398	273,9928	287,8198	12,05501	13,36283	14,74557
33	244,2134	257,1327	270,1227	10,61596	11,76886	12,988
34	218,5799	229,6383	240,7089	7,357686	8,120996	8,92288
35	87,09175	91,54535	96,00855	1,41839	1,567163	1,723699
36	42,19354	44,35177	46,51472	0,236779	0,261622	0,287761
37	153,38	161,2516	169,1433	7,763393	8,580689	9,441121
38	143,8659	151,255	158,6633	6,416193	7,092202	7,803954
39	138,7347	145,8623	153,0087	2,502151	2,765855	3,043517
40	98,78751	103,8749	108,9769	2,732512	3,021198	3,325269
41	66,03852	69,44865	72,86948	5,146081	5,691276	6,265754
42	20,55857	21,62116	22,68694	0,177515	0,196339	0,216173
43	12,68618	13,34206	13,99974	0,043454	0,048063	0,052918
44	7,483683	7,870612	8,258474	0,018986	0,021	0,023121
45	3,496742	3,677654	3,858728	0,003301	0,003652	0,00402
46	206,509	216,9634	227,4305	8,955656	9,885357	10,86217
47	200,6591	210,8196	220,9926	4,831688	5,333389	5,860528
48	193,8886	203,7081	213,5402	5,638917	6,224548	6,839915
49	184,5815	193,9314	203,2932	5,110549	5,641407	6,199219
50	70,61476	74,19897	77,78896	1,196747	1,321317	1,452269
51	50,30348	52,82431	55,34578	0,303653	0,334849	0,367579
52	43,71028	45,9014	48,09325	0,773788	0,85331	0,936749
53	39,35523	41,32844	43,30216	0,627278	0,691756	0,759406
54	85,03348	89,36353	93,70074	2,827201	3,122464	3,432913
55	80,07448	84,15359	88,23904	2,60324	2,875222	3,161168
56	69,30189	72,78208	76,2627	1,949917	2,150676	2,361296
57	61,67571	64,77447	67,87384	2,685549	2,962187	3,252442
58	25,29407	26,56573	27,83729	0,216249	0,23854	0,261921
59	23,04413	24,1969	25,34895	0,179489	0,197896	0,217188
60	15,96588	16,76495	17,56295	0,052766	0,05818	0,063851
61	5,985077	6,284743	6,583968	0,008848	0,009756	0,010707
62	711,8559	749,3522	787,0551	14,18869	15,7228	17,34476
63	661,9528	696,9464	732,1463	51,26724	56,83091	62,71647
64	440,0063	463,5575	487,2791	49,36942	54,79581	60,54744
65	282,9597	298,3347	313,8468	16,8139	18,69076	20,68497

66	249,1394	262,7712	276,5349	23,77298	26,44565	29,28861
67	246,1769	259,6546	273,264	30,54394	33,97994	37,63529
68	241,5675	254,8023	268,1675	23,69207	26,35923	29,19701
69	235,3927	248,2991	261,3341	53,30417	59,30966	65,70027
70	185,8042	196,0022	206,3031	5,696331	6,338782	7,022562
71	123,6937	129,8947	136,0972	4,635941	5,11241	5,6123
72	111,8007	117,4071	123,0148	3,787315	4,17668	4,585189
73	107,2552	112,6185	117,9821	2,369756	2,612685	2,867473
74	26,56687	27,896	29,22507	0,164451	0,181318	0,199006
75	23,32497	24,49124	25,65751	0,321536	0,354494	0,38906
76	6,052199	6,354892	6,657588	0,004615	0,005088	0,005585
77	212,5556	223,5243	234,5287	25,25556	27,92938	30,74707
78	187,3742	197,0501	206,7583	6,530288	7,222149	7,951316
79	119,6528	125,8395	132,0476	2,662925	2,94542	3,243201
80	68,71693	72,27337	75,84303	1,227724	1,358094	1,495563
81	44,91787	47,24341	49,57795	0,310713	0,343719	0,378528
82	21,11273	22,20605	23,30405	0,102522	0,113415	0,124908
83	7,07839	7,445113	7,81339	0,012626	0,013968	0,015384
84	4,394844	4,622478	4,851117	0,003477	0,003846	0,004236
85	40,91608	42,96216	45,00808	0,26786	0,29532	0,324116
86	5,990208	6,289878	6,589427	0,007177	0,007913	0,008684
87	1,923467	2,019788	2,11597	0,000592	0,000653	0,000716
88	143,8122	151,3101	158,8402	13,83623	15,31659	16,87902
89	137,8661	145,0566	152,2782	5,055878	5,597017	6,168185
90	134,3618	141,3705	148,41	4,802126	5,316172	5,858789
91	27,06739	28,47722	29,89321	0,194883	0,215713	0,237699
92	16,08483	16,92256	17,76472	0,06882	0,076175	0,083946
93	7,892534	8,303648	8,717112	0,014514	0,016065	0,017705
94	5,429722	5,712366	5,996905	0,014623	0,016185	0,017838
95	100,7244	105,9811	111,2611	1,988498	2,201469	2,42629
96	55,9028	58,82214	61,7542	0,612524	0,678169	0,747462
97	6,597982	6,942717	7,288685	0,008123	0,008994	0,009913
98	4,344048	4,570867	4,798795	0,001408	0,001559	0,001718
99	502,8008	528,9058	555,1118	15,80054	17,48384	19,25932
100	445,1295	468,3345	491,6392	29,74085	32,92252	36,28054

101	401,0407	422,0132	443,083	21,6643	23,98942	26,44465
102	348,0274	366,3026	384,6698	27,94309	30,95477	34,13688
103	315,1473	331,732	348,4034	44,39507	49,19061	54,25908
104	299,8906	315,6836	331,5598	14,67729	16,26388	17,94088
105	279,4066	293,5264	307,6613	25,76245	28,43206	31,23632
106	269,7162	283,3516	297,0021	11,34851	12,52495	13,7608
107	220,6329	231,814	243,0108	18,59046	20,52244	22,55283
108	200,8309	211,0149	221,2135	6,558154	7,240139	7,956895
109	152,0663	159,7886	167,5231	8,831117	9,750824	10,71764
110	98,79122	103,8107	108,8381	2,386248	2,634896	2,896283
111	33,91198	35,63286	37,35622	0,240125	0,265114	0,291378
112	5,230176	5,495656	5,76152	0,006294	0,00695	0,007638
113	49,4495	51,93665	54,42492	1,492093	1,645963	1,807456
114	27,89602	29,29967	30,70431	0,14521	0,160191	0,175918
115	21,43509	22,51395	23,5934	0,171472	0,189167	0,207741
116	7,294738	7,661875	8,029489	0,021551	0,023775	0,026111
117	2,962468	3,111661	3,260955	0,004292	0,004735	0,0052

- Voltaje en los nodos.

Nodos	Voltajes		
	0	1	2
1	13,2	13,2	13,2
2	13,16322	13,16132	13,15943
3	13,16316	13,16127	13,15937
4	13,12682	13,12305	13,11928
5	13,12526	13,12142	13,11756
6	13,12405	13,12015	13,11623
7	13,2	13,2	13,2
8	13,19978	13,19976	13,19975
9	13,19939	13,19936	13,19933
10	13,12214	13,11816	13,11418
11	13,09805	13,09285	13,08763
12	13,08791	13,08219	13,07647
13	13,08229	13,07629	13,07029
14	13,07735	13,0711	13,06484

15	13,2	13,2	13,2
16	13,1985	13,19842	13,19835
17	13,19778	13,19767	13,19756
18	13,05233	13,04479	13,03724
19	13,02558	13,01668	13,00776
20	12,99658	12,98621	12,97581
21	12,98206	12,97094	12,9598
22	12,97491	12,96343	12,95192
23	12,91022	12,89542	12,88059
24	12,89952	12,88418	12,86879
25	13,2	13,2	13,2
26	13,2	13,2	13,2
27	13,1994	13,19937	13,19934
28	13,10362	13,09865	13,09367
29	13,08481	13,07886	13,0729
30	12,96102	12,94857	12,93613
31	12,84718	12,82873	12,8103
32	12,80824	12,78774	12,76726
33	12,733	12,70852	12,68404
34	12,6624	12,63419	12,60595
35	13,2	13,2	13,2
36	12,93421	12,92039	12,90657
37	12,92721	12,91304	12,89886
38	13,02624	13,01728	13,0083
39	12,97369	12,96203	12,95035
40	12,94351	12,9303	12,91706
41	12,91221	12,89739	12,88254
42	12,81701	12,79727	12,77749
43	12,8071	12,78685	12,76656
44	12,80359	12,78315	12,76268
45	12,80096	12,7804	12,75979
46	12,79984	12,77921	12,75854
47	13,14901	13,14642	13,14384
48	13,12075	13,11673	13,11272
49	13,08665	13,08091	13,07516

50	13,05431	13,04693	13,03954
51	13,03402	13,02562	13,01719
52	13,2	13,2	13,2
53	13,18178	13,18086	13,17995
54	13,16529	13,16355	13,16181
55	13,05159	13,04395	13,03629
56	13,01936	13,01007	13,00077
57	13,2	13,2	13,2
58	13,14507	13,14231	13,13955
59	13,13643	13,13324	13,13004
60	13,2	13,2	13,2
61	13,19673	13,19656	13,1964
62	13,19232	13,19194	13,19155
63	13,16666	13,1649	13,16313
64	13,02796	13,01887	13,00974
65	12,91155	12,89623	12,88081
66	12,84974	12,83106	12,81226
67	12,75088	12,72679	12,70251
68	12,60254	12,57033	12,53786
69	12,50099	12,46321	12,42512
70	12,21357	12,16003	12,10603
71	12,18153	12,12624	12,07045
72	13,2	13,2	13,2
73	13,16517	13,16343	13,16168
74	13,2	13,2	13,2
75	13,19363	13,19331	13,19299
76	13,2	13,2	13,2
77	13,19922	13,19918	13,19914
78	12,88595	12,86953	12,85304
79	12,84426	12,82569	12,80704
80	12,81775	12,79782	12,77779
81	12,79779	12,77682	12,75576
82	12,78824	12,76677	12,74521
83	12,78278	12,76103	12,73919
84	12,78091	12,75906	12,73712

85	12,7799	12,758	12,73601
86	13,2	13,2	13,2
87	13,19834	13,19826	13,19818
88	13,19772	13,1976	13,19749
89	12,81206	12,79155	12,77092
90	12,77211	12,74952	12,7268
91	12,73315	12,70852	12,68376
92	12,72552	12,7005	12,67534
93	12,72108	12,69583	12,67043
94	12,7192	12,69385	12,66835
95	12,71724	12,69179	12,66619
96	12,70701	12,68102	12,65488
97	12,69225	12,66549	12,63858
98	12,69078	12,66395	12,63696
99	12,68975	12,66286	12,63582
100	13,16701	13,1653	13,16358
101	13,05009	13,04229	13,03446
102	12,98561	12,97444	12,96322
103	12,89653	12,88067	12,86474
104	12,75576	12,73248	12,70908
105	12,70682	12,68096	12,65497
106	13,2	13,2	13,2
107	13,2	13,2	13,2
108	13,1159	13,11163	13,10736
109	13,08352	13,0776	13,07168
110	13,02642	13,0176	13,00878
111	13,00308	12,99308	12,98306
112	13,01917	13,00999	13,00079
113	13,01795	13,00871	12,99945
114	13,13627	13,13301	13,12974
115	13,12998	13,1264	13,12282
116	13,12042	13,11636	13,1123
117	13,11652	13,11227	13,108
118	13,11462	13,11027	13,10591

Anexo 10. Resultados del Matpower para IEEE 118 barras

- Modelo inicial

MATPOWER Version 8.0b1, 22-Dec-2022

Power Flow -- AC-polar-power formulation

Newton's method converged in 4 iterations.

PF successful

Converged in 0.95 seconds

| System Summary |

How many?	How much?	P (MW)	Q (MVAr)
Buses	118	Total Gen Capacity	10.0 -10.0 to 10.0
Generators	1	On-line Capacity	10.0 -10.0 to 10.0
Committed Gens	1	Generation (actual)	24.0 18.0
Loads	117	Load	22.7 17.0
Fixed	117	Fixed	22.7 17.0
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0 -0.0
Shunts	0	Shunt (inj)	-0.0 0.0
Branches	132	Losses (I ² * Z)	1.30 0.98
Transformers	0	Branch Charging (inj)	- 0.0
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0 0.0
Areas	1		

	Minimum	Maximum
Voltage Magnitude	0.869 p.u. @ bus 77	1.000 p.u. @ bus 1
Voltage Angle	-0.58 deg @ bus 35	1.33 deg @ bus 111
P Losses (I ² *R)	-	0.08 MW @ line 69-70
Q Losses (I ² *X)	-	0.13 MVAr @ line 63-64

| Bus Data |

Bus #	Voltage		Generation		Load	
	Mag(pu)	Ang(deg)	P (MW)	Q (MVAr)	P (MW)	Q (MVAr)
1	1.000	0.000*	24.01	18.02	-	-
2	0.996	0.077	-	-	0.13	0.10
3	0.996	0.077	-	-	0.02	0.01
4	0.992	0.158	-	-	0.03	0.02
5	0.992	0.149	-	-	0.07	0.06
6	0.992	0.141	-	-	0.14	0.07
7	0.992	0.140	-	-	0.10	0.06
8	0.992	0.140	-	-	0.03	0.01
9	0.991	0.138	-	-	0.09	0.05
10	0.991	0.057	-	-	0.20	0.11
11	0.989	0.057	-	-	0.15	0.08
12	0.988	0.032	-	-	0.03	0.02
13	0.987	0.027	-	-	0.05	0.02
14	0.987	0.031	-	-	0.14	0.12
15	0.986	0.035	-	-	0.02	0.03
16	0.986	0.033	-	-	0.03	0.03
17	0.986	0.032	-	-	0.03	0.03
18	0.984	-0.034	-	-	0.02	0.01
19	0.981	-0.105	-	-	0.16	0.08
20	0.978	-0.153	-	-	0.55	0.35
21	0.976	-0.186	-	-	0.18	0.16
22	0.975	-0.183	-	-	0.09	0.05
23	0.968	-0.099	-	-	0.09	0.04
24	0.967	-0.078	-	-	0.17	0.10
25	0.967	-0.073	-	-	0.13	0.15
26	0.966	-0.072	-	-	0.02	0.02
27	0.966	-0.071	-	-	0.03	0.02
28	0.989	0.093	-	-	0.59	0.52
29	0.987	0.031	-	-	0.12	0.06
30	0.973	-0.358	-	-	0.10	0.10
31	0.961	-0.464	-	-	0.51	0.32
32	0.956	-0.378	-	-	0.48	0.46

33	0.948	-0.472	-	-	0.15	0.14
34	0.940	-0.562	-	-	0.21	0.08
35	0.934	-0.579	-	-	0.13	0.09
36	0.970	-0.410	-	-	0.45	0.37
37	0.970	-0.410	-	-	0.44	0.32
38	0.981	0.056	-	-	0.11	0.06
39	0.975	0.073	-	-	0.05	0.04
40	0.972	-0.003	-	-	0.39	0.34
41	0.968	0.012	-	-	0.33	0.28
42	0.958	-0.072	-	-	0.54	0.24
43	0.957	-0.063	-	-	0.08	0.07
44	0.956	-0.057	-	-	0.05	0.04
45	0.956	-0.053	-	-	0.04	0.03
46	0.956	-0.054	-	-	0.04	0.02
47	0.928	-0.508	-	-	0.07	0.04
48	0.925	-0.467	-	-	0.07	0.05
49	0.921	-0.416	-	-	0.11	0.06
50	0.917	-0.363	-	-	0.92	1.21
51	0.915	-0.359	-	-	0.21	0.15
52	0.914	-0.358	-	-	0.07	0.06
53	0.911	-0.322	-	-	0.04	0.04
54	0.909	-0.293	-	-	0.43	0.28
55	0.984	0.108	-	-	0.06	0.03
56	0.980	0.187	-	-	0.09	0.09
57	0.977	0.257	-	-	0.09	0.06
58	0.971	0.280	-	-	0.35	0.33
59	0.970	0.299	-	-	0.02	0.02
60	0.969	0.316	-	-	0.08	0.05
61	0.968	0.325	-	-	0.10	0.09
62	0.968	0.302	-	-	0.06	0.05
63	0.996	-0.084	-	-	0.48	0.46
64	0.981	-0.524	-	-	0.12	0.05
65	0.968	-0.354	-	-	0.14	0.10
66	0.961	-0.266	-	-	0.39	0.19
67	0.949	-0.111	-	-	0.03	0.03
68	0.932	-0.123	-	-	0.05	0.03

69	0.921	0.043	-	-	0.07	0.04
70	0.888	-0.159	-	-	0.47	0.40
71	0.884	-0.113	-	-	0.59	0.24
72	0.879	-0.033	-	-	0.13	0.08
73	0.875	0.042	-	-	0.05	0.02
74	0.871	0.042	-	-	0.87	0.61
75	0.871	0.055	-	-	0.03	0.03
76	0.869	0.089	-	-	0.19	0.12
77	0.869	0.090	-	-	0.07	0.05
78	0.965	-0.462	-	-	0.24	0.22
79	0.960	-0.447	-	-	0.29	0.16
80	0.957	-0.428	-	-	0.49	0.44
81	0.955	-0.405	-	-	0.24	0.18
82	0.954	-0.411	-	-	0.24	0.18
83	0.954	-0.404	-	-	0.13	0.12
84	0.953	-0.401	-	-	0.02	0.03
85	0.953	-0.402	-	-	0.05	0.03
86	0.959	-0.466	-	-	0.38	0.26
87	0.959	-0.471	-	-	0.05	0.02
88	0.959	-0.474	-	-	0.02	0.01
89	0.957	-0.198	-	-	0.06	0.04
90	0.952	-0.158	-	-	0.03	0.03
91	0.948	-0.121	-	-	0.06	0.07
92	0.947	-0.106	-	-	0.11	0.08
93	0.946	-0.096	-	-	0.08	0.07
94	0.946	-0.090	-	-	0.03	0.02
95	0.946	-0.077	-	-	0.03	0.06
96	0.945	-0.161	-	-	0.53	0.22
97	0.943	-0.174	-	-	0.51	0.37
98	0.943	-0.174	-	-	0.03	0.01
99	0.943	-0.181	-	-	0.05	0.03
100	0.996	0.055	-	-	0.10	0.05
101	0.983	-0.214	-	-	0.46	0.35
102	0.976	-0.182	-	-	0.52	0.45
103	0.966	-0.079	-	-	0.41	0.17
104	0.950	0.258	-	-	0.14	0.13

105	0.944	0.376	-	-	0.10	0.07
106	0.934	0.646	-	-	0.10	0.08
107	0.929	0.757	-	-	0.49	0.42
108	0.919	0.982	-	-	0.23	0.14
109	0.915	1.074	-	-	0.51	0.39
110	0.908	1.248	-	-	0.19	0.17
111	0.905	1.328	-	-	0.92	0.90
112	0.907	1.263	-	-	0.31	0.22
113	0.907	1.266	-	-	0.05	0.04
114	0.993	0.113	-	-	0.21	0.19
115	0.992	0.111	-	-	0.07	0.05
116	0.991	0.107	-	-	0.16	0.09
117	0.991	0.102	-	-	0.05	0.03
118	0.991	0.099	-	-	0.03	0.02

Total: 24.01 18.02 22.71 17.04

=====
| Branch Data |
=====

Brnch #	From Bus	To Bus	From Bus P (MW)	From Bus Q (MVar)	To Bus Injection P (MW)	To Bus Injection Q (MVar)	Loss P (MW)	Loss Q (MVar)
1	1	2	10.68	8.36	-10.62	-8.34	0.055	0.02
2	2	3	0.02	0.01	-0.02	-0.01	0.000	0.00
3	2	4	8.37	6.77	-8.33	-6.76	0.043	0.02
4	4	5	0.44	0.26	-0.44	-0.26	0.000	0.00
5	5	6	0.36	0.19	-0.36	-0.19	0.000	0.00
6	6	7	0.22	0.12	-0.22	-0.12	0.000	0.00
7	7	8	0.12	0.06	-0.12	-0.06	0.000	0.00
8	8	9	0.09	0.05	-0.09	-0.05	0.000	0.00
9	2	10	2.10	1.45	-2.09	-1.44	0.009	0.01
10	10	11	1.89	1.33	-1.89	-1.33	0.005	0.00
11	11	12	0.31	0.24	-0.31	-0.24	0.000	0.00
12	12	13	0.28	0.22	-0.28	-0.22	0.000	0.00
13	13	14	0.23	0.20	-0.23	-0.20	0.000	0.00

14	14	15	0.09	0.08	-0.09	-0.08	0.000	0.00
15	15	16	0.07	0.05	-0.07	-0.05	0.000	0.00
16	16	17	0.03	0.03	-0.03	-0.03	0.000	0.00
17	11	18	1.43	1.01	-1.43	-1.01	0.006	0.01
18	18	19	1.41	1.00	-1.41	-0.99	0.003	0.00
19	19	20	1.25	0.91	-1.25	-0.91	0.003	0.00
20	20	21	0.70	0.56	-0.70	-0.56	0.001	0.00
21	21	22	0.52	0.39	-0.52	-0.39	0.000	0.00
22	22	23	0.42	0.34	-0.42	-0.33	0.004	0.00
23	23	24	0.34	0.29	-0.34	-0.29	0.001	0.00
24	24	25	0.17	0.20	-0.17	-0.20	0.000	0.00
25	25	26	0.04	0.05	-0.04	-0.05	0.000	0.00
26	26	27	0.03	0.02	-0.03	-0.02	0.000	0.00
27	4	28	7.86	6.48	-7.84	-6.45	0.013	0.03
28	28	29	7.25	5.93	-7.24	-5.91	0.009	0.02
29	29	30	4.59	4.00	-4.55	-3.91	0.038	0.09
30	30	31	3.56	3.12	-3.51	-3.07	0.041	0.05
31	31	32	3.00	2.75	-2.98	-2.74	0.018	0.01
32	32	33	2.51	2.29	-2.49	-2.26	0.019	0.02
33	33	34	2.34	2.12	-2.32	-2.10	0.016	0.02
34	34	35	2.12	2.02	-2.10	-2.01	0.012	0.01
35	30	36	0.89	0.69	-0.89	-0.69	0.002	0.00
36	36	37	0.44	0.32	-0.44	-0.32	0.000	0.00
37	29	38	1.67	1.14	-1.66	-1.13	0.011	0.01
38	38	39	1.54	1.08	-1.54	-1.07	0.009	0.01
39	39	40	1.48	1.03	-1.48	-1.03	0.004	0.01
40	40	41	1.08	0.69	-1.08	-0.68	0.004	0.00
41	41	42	0.75	0.40	-0.75	-0.40	0.008	0.01
42	42	43	0.21	0.16	-0.21	-0.16	0.000	0.00
43	43	44	0.13	0.09	-0.13	-0.09	0.000	0.00
44	44	45	0.08	0.05	-0.08	-0.05	0.000	0.00
45	45	46	0.04	0.02	-0.04	-0.02	0.000	0.00
46	35	47	1.97	1.91	-1.96	-1.90	0.015	0.01
47	47	48	1.89	1.86	-1.88	-1.86	0.008	0.01
48	48	49	1.81	1.80	-1.80	-1.80	0.009	0.01
49	49	50	1.68	1.74	-1.68	-1.73	0.009	0.01

50	50	51	0.76	0.53	-0.76	-0.53	0.002	0.00
51	51	52	0.55	0.38	-0.55	-0.38	0.001	0.00
52	52	53	0.48	0.32	-0.48	-0.32	0.001	0.00
53	53	54	0.43	0.28	-0.43	-0.28	0.001	0.00
54	29	55	0.86	0.71	-0.86	-0.71	0.004	0.00
55	55	56	0.80	0.69	-0.79	-0.69	0.004	0.00
56	56	57	0.70	0.60	-0.70	-0.60	0.003	0.00
57	57	58	0.61	0.54	-0.61	-0.54	0.004	0.00
58	58	59	0.26	0.20	-0.26	-0.20	0.000	0.00
59	59	60	0.24	0.19	-0.24	-0.19	0.000	0.00
60	60	61	0.16	0.14	-0.16	-0.14	0.000	0.00
61	61	62	0.06	0.05	-0.06	-0.05	0.000	0.00
62	1	63	7.92	5.51	-7.89	-5.47	0.022	0.03
63	63	64	7.41	5.01	-7.34	-4.88	0.078	0.13
64	64	65	4.99	3.14	-4.92	-3.11	0.076	0.03
65	65	66	3.21	1.99	-3.18	-1.98	0.026	0.01
66	66	67	2.79	1.78	-2.76	-1.77	0.038	0.01
67	67	68	2.73	1.74	-2.68	-1.71	0.048	0.03
68	68	69	2.63	1.69	-2.59	-1.67	0.038	0.01
69	69	70	2.52	1.63	-2.44	-1.57	0.085	0.07
70	70	71	1.97	1.17	-1.96	-1.17	0.009	0.00
71	71	72	1.37	0.93	-1.36	-0.93	0.009	0.00
72	72	73	1.22	0.84	-1.22	-0.84	0.007	0.00
73	73	74	1.16	0.82	-1.16	-0.81	0.004	0.00
74	74	75	0.29	0.20	-0.29	-0.20	0.000	0.00
75	75	76	0.26	0.17	-0.26	-0.17	0.001	0.00
76	76	77	0.07	0.05	-0.07	-0.05	0.000	0.00
77	64	78	2.22	1.69	-2.18	-1.66	0.037	0.02
78	78	79	1.95	1.44	-1.94	-1.43	0.010	0.01
79	79	80	1.19	0.98	-1.18	-0.98	0.004	0.00
80	80	81	0.70	0.54	-0.69	-0.54	0.002	0.00
81	81	82	0.45	0.36	-0.45	-0.36	0.000	0.00
82	82	83	0.21	0.17	-0.21	-0.17	0.000	0.00
83	83	84	0.07	0.05	-0.07	-0.05	0.000	0.00
84	84	85	0.05	0.03	-0.05	-0.03	0.000	0.00
85	79	86	0.46	0.29	-0.46	-0.29	0.000	0.00

86	86	87	0.07	0.03	-0.07	-0.03	0.000	0.00
87	87	88	0.02	0.01	-0.02	-0.01	0.000	0.00
88	65	89	1.57	1.02	-1.55	-1.01	0.021	0.01
89	89	90	1.48	0.97	-1.48	-0.97	0.008	0.00
90	90	91	1.45	0.93	-1.44	-0.93	0.007	0.00
91	91	92	0.26	0.22	-0.26	-0.22	0.000	0.00
92	92	93	0.15	0.14	-0.15	-0.14	0.000	0.00
93	93	94	0.07	0.08	-0.07	-0.08	0.000	0.00
94	94	95	0.03	0.06	-0.03	-0.06	0.000	0.00
95	91	96	1.11	0.64	-1.11	-0.64	0.003	0.00
96	96	97	0.58	0.41	-0.58	-0.41	0.001	0.00
97	97	98	0.07	0.04	-0.07	-0.04	0.000	0.00
98	98	99	0.05	0.03	-0.05	-0.03	0.000	0.00
99	1	100	5.41	4.16	-5.39	-4.15	0.024	0.01
100	100	101	4.76	3.71	-4.72	-3.64	0.046	0.07
101	101	102	4.26	3.29	-4.23	-3.27	0.033	0.02
102	102	103	3.71	2.82	-3.66	-2.80	0.043	0.02
103	103	104	3.25	2.63	-3.19	-2.61	0.069	0.02
104	104	105	3.04	2.47	-3.02	-2.46	0.023	0.01
105	105	106	2.92	2.40	-2.87	-2.38	0.044	0.01
106	106	107	2.78	2.30	-2.76	-2.29	0.019	0.01
107	107	108	2.26	1.87	-2.23	-1.86	0.032	0.01
108	108	109	2.01	1.73	-1.99	-1.72	0.011	0.00
109	109	110	1.49	1.34	-1.47	-1.33	0.015	0.01
110	110	111	0.92	0.90	-0.92	-0.90	0.004	0.00
111	110	112	0.36	0.26	-0.36	-0.26	0.000	0.00
112	112	113	0.05	0.04	-0.05	-0.04	0.000	0.00
113	100	114	0.53	0.39	-0.52	-0.39	0.002	0.00
114	114	115	0.31	0.19	-0.31	-0.19	0.000	0.00
115	115	116	0.25	0.14	-0.24	-0.14	0.000	0.00
116	116	117	0.08	0.05	-0.08	-0.05	0.000	0.00
117	117	118	0.03	0.02	-0.03	-0.02	0.000	0.00
118	46	27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
119	17	27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
120	8	24	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
121	54	43	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00

122	62	49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
123	37	62	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
124	9	40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
125	58	96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
126	73	91	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
127	88	75	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
128	99	77	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
129	108	83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
130	105	86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
131	110	118	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00
132	25	35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.000	0.00

Total: 1.298 0.98

Total Power Losses: 1.298092 MW

ans =

struct with fields:

version: '2'

baseMVA: 10

bus: [118×13 double]

gen: [1 0 0 10 -10 1 100 1 10 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0]

branch: [132×13 double]

gencost: [2 0 0 3 0 20 0]

- Reconfiguración

MATPOWER Version 8.0b1, 22-Dec-2022

Power Flow -- AC-polar-power formulation

Newton's method converged in 4 iterations.

PF successful

Converged in 0.29 seconds

=====
| System Summary |
=====

How many? How much? P (MW) Q (MVAr)

Buses	118	Total Gen Capacity	10.0	-100.0 to 100.0
Generators	1	On-line Capacity	10.0	-100.0 to 100.0
Committed Gens	1	Generation (actual)	23.8	17.8
Loads	117	Load	22.7	17.0
Fixed	117	Fixed	22.7	17.0
Dispatchable	0	Dispatchable	-0.0 of -0.0	-0.0
Shunts	0	Shunt (inj)	-0.0	0.0
Branches	117	Losses (I ² * Z)	1.13	0.80
Transformers	0	Branch Charging (inj)	-	0.0
Inter-ties	0	Total Inter-tie Flow	0.0	0.0
Areas	1			

Minimum Maximum

Voltage Magnitude	0.909 p.u. @ bus 111	1.000 p.u. @ bus 1
Voltage Angle	-0.55 deg @ bus 36	1.55 deg @ bus 111
P Losses (I ² *R)	-	0.08 MW @ line 64-78
Q Losses (I ² *X)	-	0.13 MVar @ line 63-64

=====
| Bus Data |
=====

Bus	Voltage	Generation	Load
#	Mag(pu) Ang(deg)	P (MW) Q (MVar)	P (MW) Q (MVar)
1	1.000 0.000*	23.84 17.84	- -
2	0.996 0.076	- -	0.13 0.10
3	0.996 0.076	- -	0.02 0.01
4	0.992 0.156	- -	0.03 0.02
5	0.992 0.146	- -	0.07 0.06
6	0.992 0.138	- -	0.14 0.07
7	0.992 0.139	- -	0.10 0.06
8	0.992 0.139	- -	0.03 0.01
9	0.992 0.137	- -	0.09 0.05
10	0.991 0.056	- -	0.20 0.11
11	0.989 0.056	- -	0.15 0.08

12	0.987	0.029	-	-	0.03	0.02
13	0.987	0.024	-	-	0.05	0.02
14	0.986	0.030	-	-	0.14	0.12
15	0.986	0.039	-	-	0.02	0.03
16	0.986	0.038	-	-	0.03	0.03
17	0.985	0.037	-	-	0.03	0.03
18	0.984	-0.035	-	-	0.02	0.01
19	0.981	-0.104	-	-	0.16	0.08
20	0.978	-0.153	-	-	0.55	0.35
21	0.977	-0.184	-	-	0.18	0.16
22	0.976	-0.182	-	-	0.09	0.05
23	0.970	-0.118	-	-	0.09	0.04
24	0.969	-0.102	-	-	0.17	0.10
25	0.968	-0.092	-	-	0.13	0.15
26	0.985	0.051	-	-	0.02	0.02
27	0.985	0.050	-	-	0.03	0.02
28	0.989	0.090	-	-	0.59	0.52
29	0.987	0.027	-	-	0.12	0.06
30	0.973	-0.387	-	-	0.10	0.10
31	0.968	-0.447	-	-	0.51	0.32
32	0.967	-0.428	-	-	0.48	0.46
33	0.966	-0.451	-	-	0.15	0.14
34	0.966	-0.468	-	-	0.21	0.08
35	0.936	0.510	-	-	0.13	0.09
36	0.961	-0.551	-	-	0.45	0.37
37	0.956	-0.524	-	-	0.44	0.32
38	0.981	0.053	-	-	0.11	0.06
39	0.975	0.070	-	-	0.05	0.04
40	0.972	-0.006	-	-	0.39	0.34
41	0.968	0.008	-	-	0.33	0.28
42	0.958	-0.075	-	-	0.54	0.24
43	0.957	-0.067	-	-	0.08	0.07
44	0.956	-0.061	-	-	0.05	0.04
45	0.956	-0.056	-	-	0.04	0.03
46	0.956	-0.057	-	-	0.04	0.02
47	0.937	0.509	-	-	0.07	0.04

48	0.937	0.509	-	-	0.07	0.05
49	0.937	0.508	-	-	0.11	0.06
50	0.934	0.559	-	-	0.92	1.21
51	0.931	0.563	-	-	0.21	0.15
52	0.931	0.588	-	-	0.07	0.06
53	0.929	0.622	-	-	0.04	0.04
54	0.927	0.650	-	-	0.43	0.28
55	0.985	0.085	-	-	0.06	0.03
56	0.982	0.144	-	-	0.09	0.09
57	0.981	0.225	-	-	0.09	0.06
58	0.977	0.247	-	-	0.35	0.33
59	0.977	0.249	-	-	0.02	0.02
60	0.942	0.063	-	-	0.08	0.05
61	0.943	0.060	-	-	0.10	0.09
62	0.944	0.126	-	-	0.06	0.05
63	0.996	-0.082	-	-	0.48	0.46
64	0.981	-0.511	-	-	0.12	0.05
65	0.971	-0.387	-	-	0.14	0.10
66	0.967	-0.346	-	-	0.39	0.19
67	0.961	-0.279	-	-	0.03	0.03
68	0.953	-0.303	-	-	0.05	0.03
69	0.947	-0.235	-	-	0.07	0.04
70	0.931	-0.362	-	-	0.47	0.40
71	0.930	-0.357	-	-	0.59	0.24
72	0.929	-0.339	-	-	0.13	0.08
73	0.929	-0.338	-	-	0.05	0.02
74	0.938	-0.344	-	-	0.87	0.61
75	0.940	-0.381	-	-	0.03	0.03
76	0.939	-0.181	-	-	0.19	0.12
77	0.939	-0.185	-	-	0.07	0.05
78	0.959	-0.435	-	-	0.24	0.22
79	0.952	-0.415	-	-	0.29	0.16
80	0.949	-0.396	-	-	0.49	0.44
81	0.947	-0.372	-	-	0.24	0.18
82	0.946	-0.379	-	-	0.24	0.18
83	0.945	-0.371	-	-	0.13	0.12

84	0.945	-0.368	-	-	0.02	0.03
85	0.945	-0.369	-	-	0.05	0.03
86	0.950	-0.336	-	-	0.38	0.26
87	0.947	-0.383	-	-	0.05	0.02
88	0.943	-0.521	-	-	0.02	0.01
89	0.958	-0.205	-	-	0.06	0.04
90	0.953	-0.159	-	-	0.03	0.03
91	0.948	-0.115	-	-	0.06	0.07
92	0.947	-0.100	-	-	0.11	0.08
93	0.946	-0.089	-	-	0.08	0.07
94	0.946	-0.084	-	-	0.03	0.02
95	0.946	-0.071	-	-	0.03	0.06
96	0.944	-0.162	-	-	0.53	0.22
97	0.942	-0.182	-	-	0.51	0.37
98	0.941	-0.183	-	-	0.03	0.01
99	0.940	-0.227	-	-	0.05	0.03
100	0.996	0.055	-	-	0.10	0.05
101	0.983	-0.216	-	-	0.46	0.35
102	0.976	-0.185	-	-	0.52	0.45
103	0.966	-0.084	-	-	0.41	0.17
104	0.950	0.248	-	-	0.14	0.13
105	0.944	0.364	-	-	0.10	0.07
106	0.936	0.785	-	-	0.10	0.08
107	0.932	0.979	-	-	0.49	0.42
108	0.922	1.202	-	-	0.23	0.14
109	0.918	1.293	-	-	0.51	0.39
110	0.912	1.466	-	-	0.19	0.17
111	0.909	1.546	-	-	0.92	0.90
112	0.911	1.481	-	-	0.31	0.22
113	0.911	1.484	-	-	0.05	0.04
114	0.993	0.112	-	-	0.21	0.19
115	0.992	0.110	-	-	0.07	0.05
116	0.991	0.106	-	-	0.16	0.09
117	0.991	0.101	-	-	0.05	0.03
118	0.991	0.098	-	-	0.03	0.02

Total: 23.84 17.84 22.71 17.04

| Branch Data |

Brnch #	From Bus	To Bus	From Bus P (MW)	From Bus Q (MVar)	To Bus Injection P (MW)	To Bus Injection Q (MVar)	Loss P (MW)	Loss Q (MVar)
1	1	2	10.67	8.28	-10.61	-8.26	0.054	0.02
2	2	3	0.02	0.01	-0.02	-0.01	0.000	0.00
3	2	4	8.36	6.70	-8.32	-6.69	0.043	0.02
4	4	5	0.44	0.26	-0.44	-0.26	0.000	0.00
5	5	6	0.36	0.19	-0.36	-0.19	0.000	0.00
6	6	7	0.22	0.12	-0.22	-0.12	0.000	-0.00
7	7	8	0.12	0.06	-0.12	-0.06	0.000	0.00
8	8	9	0.09	0.05	-0.09	-0.05	0.000	0.00
9	2	10	2.10	1.45	-2.09	-1.44	0.009	0.01
10	10	11	1.89	1.33	-1.89	-1.33	0.005	0.00
11	11	12	0.35	0.29	-0.35	-0.29	0.000	0.00
12	12	13	0.32	0.27	-0.32	-0.27	0.000	0.00
13	13	14	0.27	0.25	-0.27	-0.25	0.000	0.00
14	14	15	0.13	0.13	-0.13	-0.13	0.000	0.00
15	15	16	0.11	0.10	-0.11	-0.10	0.000	0.00
16	16	17	0.07	0.07	-0.07	-0.07	0.000	0.00
17	11	18	1.39	0.96	-1.39	-0.96	0.005	0.01
18	18	19	1.37	0.94	-1.36	-0.94	0.003	0.00
19	19	20	1.21	0.86	-1.20	-0.86	0.003	0.00
20	20	21	0.66	0.51	-0.66	-0.51	0.001	0.00
21	21	22	0.48	0.34	-0.47	-0.34	0.000	0.00
22	22	23	0.38	0.29	-0.38	-0.29	0.003	0.00
23	23	24	0.29	0.25	-0.29	-0.25	0.000	0.00
24	24	25	0.13	0.15	-0.13	-0.15	0.000	0.00
25	26	27	-0.02	-0.02	0.02	0.02	0.000	0.00
26	4	28	7.85	6.41	-7.83	-6.38	0.013	0.03
27	28	29	7.24	5.86	-7.23	-5.84	0.009	0.02
28	29	30	4.83	4.12	-4.78	-4.02	0.041	0.09
29	30	31	1.35	1.00	-1.35	-1.00	0.005	0.01

30	31	32	0.83	0.68	-0.83	-0.68	0.001	0.00
31	49	50	1.68	1.74	-1.68	-1.73	0.008	0.01
32	50	51	0.76	0.53	-0.76	-0.53	0.002	0.00
33	51	52	0.55	0.38	-0.54	-0.38	0.001	0.00
34	52	53	0.48	0.32	-0.48	-0.32	0.001	0.00
35	53	54	0.43	0.28	-0.43	-0.28	0.001	0.00
36	29	55	0.61	0.52	-0.61	-0.52	0.002	0.00
37	55	56	0.55	0.49	-0.55	-0.49	0.002	0.00
38	56	57	0.46	0.41	-0.45	-0.41	0.001	0.00
39	57	58	0.37	0.35	-0.37	-0.35	0.002	0.00
40	58	59	0.02	0.02	-0.02	-0.02	0.000	0.00
41	60	61	-0.08	-0.05	0.08	0.05	0.000	0.00
42	61	62	-0.18	-0.14	0.18	0.14	0.000	0.00
43	1	63	7.76	5.42	-7.74	-5.39	0.021	0.03
44	63	64	7.26	4.93	-7.18	-4.80	0.075	0.13
45	64	65	3.87	2.37	-3.83	-2.36	0.045	0.02
46	65	66	1.85	1.06	-1.84	-1.06	0.008	0.00
47	66	67	1.45	0.86	-1.44	-0.86	0.010	0.00
48	67	68	1.41	0.83	-1.40	-0.82	0.012	0.01
49	68	69	1.34	0.80	-1.34	-0.80	0.009	0.00
50	69	70	1.27	0.76	-1.25	-0.74	0.019	0.02
51	70	71	0.78	0.35	-0.78	-0.35	0.001	0.00
52	71	72	0.19	0.11	-0.19	-0.11	0.000	0.00
53	72	73	0.05	0.02	-0.05	-0.02	0.000	0.00
54	74	75	-0.87	-0.61	0.87	0.62	0.002	0.00
55	76	77	-0.19	-0.12	0.19	0.12	0.000	0.00
56	64	78	3.19	2.37	-3.11	-2.32	0.076	0.05
57	78	79	2.87	2.10	-2.85	-2.09	0.021	0.01
58	79	80	1.19	0.98	-1.18	-0.98	0.004	0.00
59	80	81	0.70	0.54	-0.69	-0.54	0.002	0.00
60	81	82	0.45	0.36	-0.45	-0.36	0.000	0.00
61	82	83	0.21	0.17	-0.21	-0.17	0.000	0.00
62	83	84	0.07	0.05	-0.07	-0.05	0.000	0.00
63	84	85	0.05	0.03	-0.05	-0.03	0.000	0.00
64	79	86	1.37	0.94	-1.37	-0.94	0.004	-0.00
65	86	87	0.98	0.69	-0.98	-0.68	0.003	0.00

66	87	88	0.93	0.66	-0.93	-0.66	0.002	0.00
67	65	89	1.84	1.20	-1.81	-1.19	0.028	0.01
68	89	90	1.75	1.14	-1.74	-1.14	0.010	0.00
69	90	91	1.71	1.11	-1.70	-1.10	0.010	0.00
70	91	92	0.26	0.22	-0.26	-0.22	0.000	0.00
71	92	93	0.15	0.14	-0.15	-0.14	0.000	0.00
72	93	94	0.07	0.08	-0.07	-0.08	0.000	0.00
73	94	95	0.03	0.06	-0.03	-0.06	0.000	0.00
74	91	96	1.38	0.81	-1.37	-0.80	0.005	0.00
75	96	97	0.84	0.58	-0.84	-0.58	0.002	0.00
76	97	98	0.33	0.21	-0.33	-0.21	0.000	0.00
77	98	99	0.30	0.20	-0.30	-0.20	0.000	0.00
78	1	100	5.41	4.14	-5.39	-4.13	0.024	0.01
79	100	101	4.76	3.69	-4.72	-3.62	0.045	0.07
80	101	102	4.26	3.27	-4.23	-3.25	0.033	0.02
81	102	103	3.70	2.80	-3.66	-2.78	0.043	0.02
82	103	104	3.25	2.61	-3.18	-2.59	0.069	0.02
83	104	105	3.04	2.45	-3.02	-2.44	0.023	0.01
84	105	106	2.92	2.38	-2.87	-2.38	0.043	0.00
85	106	107	2.78	2.29	-2.76	-2.29	0.019	-0.00
86	107	108	2.26	1.87	-2.23	-1.86	0.031	0.01
87	108	109	2.01	1.73	-1.99	-1.72	0.011	0.00
88	109	110	1.49	1.34	-1.47	-1.33	0.015	0.01
89	110	111	0.92	0.90	-0.92	-0.90	0.004	0.00
90	110	112	0.36	0.26	-0.36	-0.26	0.000	0.00
91	112	113	0.05	0.04	-0.05	-0.04	0.000	0.00
92	100	114	0.53	0.39	-0.52	-0.39	0.002	0.00
93	114	115	0.31	0.19	-0.31	-0.19	0.000	0.00
94	115	116	0.25	0.14	-0.24	-0.14	0.000	0.00
95	116	117	0.08	0.05	-0.08	-0.05	0.000	0.00
96	117	118	0.03	0.02	-0.03	-0.02	0.000	0.00
97	17	27	0.04	0.05	-0.04	-0.05	0.000	0.00
98	62	49	2.10	1.98	-2.07	-1.98	0.028	0.00
99	37	62	2.39	2.17	-2.34	-2.17	0.054	0.00
100	88	75	0.91	0.65	-0.90	-0.65	0.005	0.00
101	99	77	0.26	0.17	-0.26	-0.17	0.000	-0.00

102	32	33	0.36	0.22	-0.36	-0.22	0.000	0.00
103	33	34	0.21	0.08	-0.21	-0.08	0.000	0.00
104	30	36	3.33	2.92	-3.30	-2.88	0.032	0.04
105	36	37	2.85	2.51	-2.83	-2.49	0.017	0.01
106	29	38	1.67	1.14	-1.66	-1.13	0.011	0.01
107	38	39	1.54	1.08	-1.54	-1.07	0.009	0.01
108	39	40	1.48	1.03	-1.48	-1.03	0.004	0.01
109	40	41	1.08	0.69	-1.08	-0.68	0.004	0.00
110	41	42	0.75	0.40	-0.75	-0.40	0.008	0.01
111	42	43	0.21	0.16	-0.21	-0.16	0.000	0.00
112	43	44	0.13	0.09	-0.13	-0.09	0.000	0.00
113	44	45	0.08	0.05	-0.08	-0.05	0.000	0.00
114	45	46	0.04	0.02	-0.04	-0.02	0.000	0.00
115	35	47	-0.13	-0.09	0.13	0.09	0.000	0.00
116	47	48	-0.20	-0.14	0.20	0.14	0.000	0.00
117	48	49	-0.27	-0.19	0.27	0.19	0.000	0.00

Total: 1.126 0.80

Total Power Losses: 1.125786 MW

ans =

struct with fields:

version: '2'

baseMVA: 10

bus: [118×14 double]

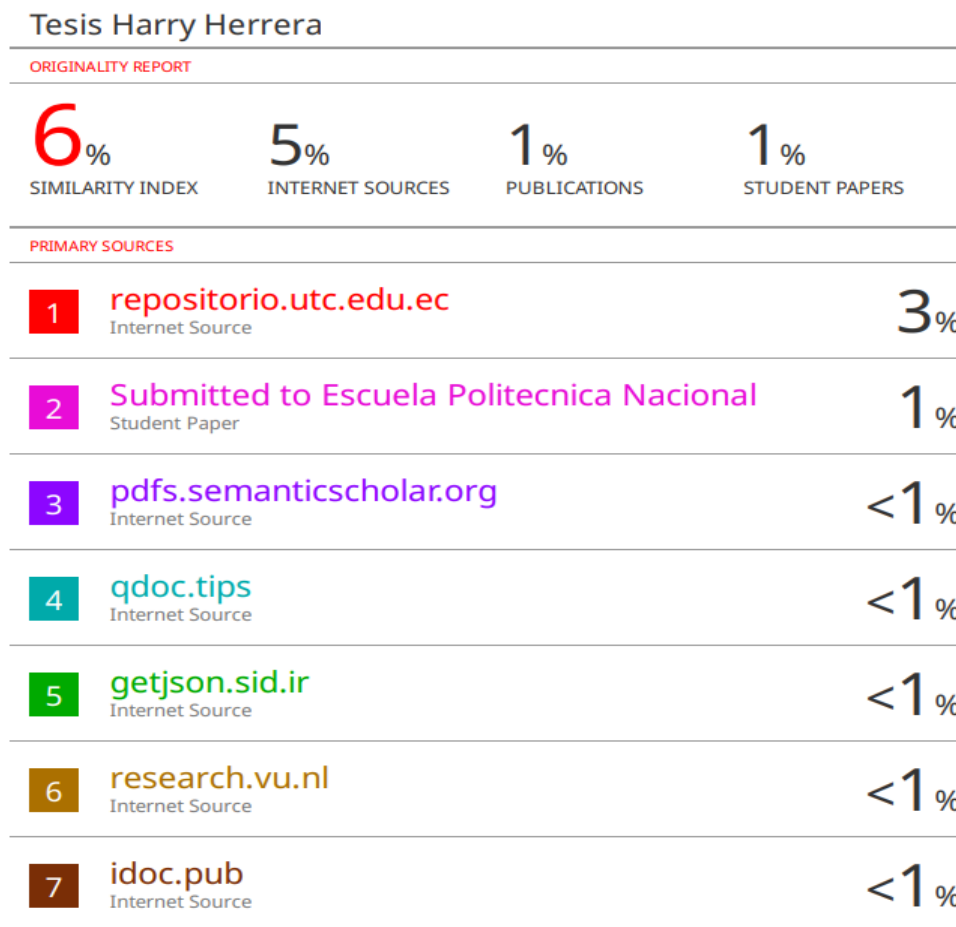
gen: [1 23 0 100 -100 1 100 1 10 0 0 0 0 0 0 0 0 0]

branch: [117×13 double]

gencost: [2 0 0 3 0 20 0]

CERTIFICACIÓN DE INFORME DE SIMILITUD

En mi calidad de Tutor del Proyecto de Investigación con el tema:” Simulación del sistema eléctrico para optimizar la distribución mediante programación entera mixta y modelo cónico de segundo orden” de Herrera Miranda Harry Alexander, de la carrera de Ingeniería en Electricidad, remito la captura de pantalla del reporte del sistema de reconocimiento de texto Turnitin, con un porcentaje de coincidencia del 6%; y, expuesto una vez más, mi conformidad en cuando a la dirección del trabajo de titulación.



Particular que comunico a usted para los fines pertinentes.

Latacunga, 20 de agosto del 2024


.....
Ing. Luigi Orlando Freire Martínez Ms.C
C.C. 0502529589