



UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CUENCA
Comunidad al servicio del Pueblo

**UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA
Y CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**“Evaluación de la Reducción de Pérdidas Técnicas Mediante Algoritmos
Inteligentes en Redes de Distribución Radiales”.**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

AUTOR: JORGE LUIS RIVERA PARRA

DIRECTOR: ING. DIEGO XAVIER MORALES JADÁN, PhD.

MATRIZ CUENCA

2018

DECLARACIÓN.

Yo, JORGE LUIS RIVERA PARRA, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento; y eximo expresamente a la Universidad Católica de Cuenca y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

La Universidad Católica de Cuenca puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y la normatividad institucional vigente.

Jorge Luis Rivera Parra

CERTIFICACIÓN.

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Jorge Luis Rivera Parra bajo mi supervisión.

Ing. Diego Xavier Morales Jadán, PhD.

DIRECTOR.

AGRADECIMIENTOS.

Mis más sinceros agradecimientos a la Universidad Católica de Cuenca, en especial al personal docente que conforma la facultad de Ingeniería Eléctrica quienes han sido clave fundamental y una guía útil durante mi carrera universitaria. También quisiera hacer mención al Dr. Diego Morales por toda la ayuda recibida durante la formación académica, por su excelente desempeño como docente, por su calidad humana, por ser el Director de Tesis y por dirigir el desarrollo de éste trabajo de Investigación, al Ing. Pablo Arias Reyes por su gran ayuda como docente y profesional, por compartir sus experiencias y por toda la paciencia y la amistad brindada, a los Ingenieros: Antonio Barragán, Carlos Méndez, Carlos Flores, Eugenio Campoverde, Javier Cabrera, Javier Gutiérrez por su incondicional colaboración como Catedráticos. Quiero agradecer por tanta ayuda y permitirme ser participe y colaborador del Dr. Sammi Samuel con quien he tenido conocimientos científicos mismo que ha sido un reto poder cumplir con aportes hacia la comunidad científica y quisiera hacer mención al Ingeniero Román Buñay por compartir su experiencia como docente, como profesional y amigo, que con su ayuda me ha permitido crecer como persona y futuro profesional, por enseñarme que el camino profesional no es solo tener una visión y misión sino que también tener una convicción con la sociedad. Para terminar, agradezco a mis amigos y compañeros: Gustavo Saguy, Cristhian Cango, Geovanny Coraisaca, Homero Pesantez, Edwin Marín, René Aguilar, quienes de una u otra manera han estado presentes en el transcurso de la carrera universitaria, prestos a ayudarme y con quienes hemos compartido muchas experiencias y logros como estudiantes.

DEDICATORIA.

Agradecer a Jehová por todas las bendiciones que he recibido, y por la guía espiritual que ha inspirado en mí, la cual me ha permitido estar de pie, y cuando caía estaba ahí para darme la mano y seguir adelante.

También quiero agradecer a mis abuelos: José Parra, Zoila Hermida, Teófilo Rivera, Zoila Gaona quienes han sido un pilar fundamental en mi vida, quienes me han forjado y me han educado con valores excepcionales durante todos estos años, a quienes respeto y admiro. A mis padres por estar presente y pendiente de mí y por todos esos buenos consejos, por el apoyo moral y por encaminarme a una vida profesional, a quienes agradezco infinitamente por tanto y por todo.

A mi hijo Aarón por ser el complemento de mi vida quien se ha convertido en el eje principal y el timón de este nuevo inicio, quien me inspira a crecer cada día y luchar por las metas que deseo alcanzar durante mi vida profesional y a mi compañera de vida Carla por sus sacrificios que día a día lo viene haciendo para salir adelante como familia, gracias por tanto amor y por tú paciencia.

A mis hermanas (nos): Carolina, Mishel, Holger, Cristopher, Sobrinos por ser parte de éste logro y que en todo momento los tengo presente, los llevo en mi corazón, y por quien me esfuerzo para ser un ejemplo, a mis tíos en especial a Nancy Parra y Fabián Jerves, Geovanny Parra, Geovanny Rivera, Homero Rivera por ese apoyo y cariño, con respeto para Uds., y primos quienes son parte de este proyecto de vida.

¡A todos, de corazón muchas gracias por el aliento!

Jorge Rivera P.

ÍNDICE DE CONTENIDO.

DECLARACIÓN.....	i
CERTIFICACIÓN.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABLAS.....	ix
RESUMEN.....	2
ABSTRACT.....	3
CAPITULO I.....	4
1.1 Introducción General.....	4
1.2 Planteamiento del Problema de Investigación.....	5
1.3 Alcance.....	6
1.4 Justificación.....	7
1.5 Delimitación.....	7
1.6 Objetivos.....	7
1.6.1 Objetivo general.....	7
1.6.2 Objetivo específico.....	7
1.7 Metodología de Estudio para la Investigación.....	7
CAPITULO II.....	9
2.1 Descripción de la Investigación.....	9
2.1.1 Estudio de situación actual de las redes inteligentes en la ciudad de Guayaquil y su aplicación como método de reducción de pérdidas de energía (Loaiza M., 2016).....	9
2.1.2 Modelación para la planificación optima de redes radiales de distribución (Villaruel, Carter, Gutiérrez, Rudnick, & Huechapán, 2000).....	10
2.1.3 Marco integrado de TICs para la red de distribución con recursos energéticos descentralizados: prototipo, diseño y desarrollo (Nouredine, Luong, Raphael, & Bertrand, 2010).....	10
2.1.4 Optimización de redes eléctricas mediante la aplicación de algoritmos genéticos (Anaut, Di Mauro, Meschino, & J., Optimización de Redes Eléctricas Mediante la Aplicación de Algoritmos Genéticos, 2009).....	10
2.1.5 Reducción de pérdida en redes de distribución utilizando programación de restricción concurrente (Caicedo, Lozano, & Díaz, 2005).....	11
2.1.6 Reconfiguración de sistemas eléctricos de distribución para minimización de pérdidas técnicas (Fons, Casarotto, & Moya, 2010).....	11

2.1.7	La universidad en la transformación hacia las redes inteligentes en América Latina (Gómez, 2014).....	11
2.1.8	Estrategias de negocio para medición inteligente acoplando energías renovables (Inga, 2016).	11
2.1.9	Plan estratégico para la reducción de pérdidas comerciales en la empresa eléctrica distribuidora regional de Manabí. EMEL, Manabí (Intriago A., Veloz, & Ramirez, 2013).....	12
2.1.10	Reconfiguración multiobjetivo para la reducción de pérdidas y la restauración del servicio. (Matos & Melo, 1999).	12
2.1.11	Desarrollo de un algoritmo de interrelación para microredes de distribución eléctrica (Samaniego, Junio, 2015).....	12
2.2	Red Eléctrica.	13
2.3	Redes de Distribución.....	14
2.4	Pérdidas Eléctricas.....	17
2.4.1	Tipos de pérdidas de energía.	18
2.5	Smart Grids.....	23
2.6	Reconfiguración de Alimentadores.....	26
2.7	Descripción de los Métodos aplicados a la Reducción de Pérdidas.	27
2.7.1	Algoritmos aplicados a la Reducción de Pérdidas.	27
2.8	Generación Distribuida.	28
2.9	OVER LOAD TAP CHARGE (OLTC).....	29
2.10	CONTROL DE VOLTAJE VARIABLE - VOLT VAR CONTROL (VVC).....	30
CAPITULO III.		32
3.1	Desarrollo del Algoritmo Inteligente, Programa Computacional.....	32
3.1.1	Introducción.....	32
3.2	Conceptualización Del Programa.	33
3.3	Descripción y Funcionalidad del Algoritmo Inteligente.....	34
3.4	Estructura del Algoritmo Inteligente.	35
3.5	Descripción del Algoritmo Utilizado en la Plataforma De Matlab.	40
CAPITULO IV.....		42
4.1	Análisis y Resultados.....	42
4.2	Validación del Algoritmo, Caso de Prueba.....	42
4.3	Aplicación del Algoritmo, Caso de Estudio.....	48
4.3.1	Caso 1 de Estudio.	48
4.3.2	Caso 2 de Estudio.	50
4.3.3	Caso 3 de Estudio.	52
CAPITULO V.....		56

5.1	Conclusiones y Recomendaciones.....	56
5.1.1	Conclusiones.....	56
5.2	Recomendaciones.....	57
	Bibliografía.....	58

LISTA DE FIGURAS.

Figura 1. Esquema típico de un SEP, visualización de los principales componentes de generación, transmisión, distribución y consumidores (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014).....	14
Figura 2. Red tipo Mallada y Radial.....	15
Figura 3. Tipo de Redes Eléctricas.....	16
Figura 4. Esquema típico de una Red de Distribución Convencional.....	17
Figura 5. Tipos de pérdidas de energía eléctrica. Red Convencional.....	18
Figura 6. Ejemplo de Conexión Ilegal, fraude.....	19
Figura 7. Curva de Pérdidas Técnicas y No Técnicas de Energía en el Sistema de Distribución del Ecuador en GWh.....	22
Figura 8. Esquema de una red inteligente con fuentes renovables.....	23
Figura 9. a). Modelo de una Red Convencional / b). Modelo de una Red Rutura (Loaiza M., 2016).....	25
Figura 10. Incorporación de Energías No Convencionales a un Sistema de Distribución Radial.....	25
Figura 11. Comparación entre Redes Tradicionales vs Redes inteligentes.....	26
Figura 12. Generación Distribuida, modelo con Fuentes Alternativas de Deneración.....	29
Figura 13. OLTC en el interior de un transformador.....	30
Figura 14. Red Primaria y la Caída de Tensión.....	31
Figura 15. Principio de Merlín y Black, apertura secuencial de las ramas.....	33
Figura 16. Diagrama Unifilar de la Red de Distribución, Laboratorio PREDIS.....	36
Figura 17. Reconfiguración de la Red Radial con la presencia de GD.....	39
Figura 18. Diagrama de Bloques del Algoritmo en General.....	40
Figura 19. Red de distribución en Simulink, MATLAB (Distribution Test Feeders, 2017).....	43
Figura 20. Datos de entrada y salida de línea.....	44
Figura 21. Curva de Niveles de Voltaje, Respecto al Script de Matlab vs Simulink.....	47
Figura 22. Curva de Niveles. Voltajes (magnitud) en pu con respecto al Script del Caso 1.....	49
Figura 23. Curva de Niveles. Voltaje de ángulos en pu con respecto al Script del Caso 1.....	49
Figura 24. Curva de Niveles. Voltajes (magnitud) en pu con respecto al Script del Caso 2.....	51
Figura 25. Curva de Niveles. Voltaje de ángulos en pu con respecto al Script del Caso 2.....	52
Figura 26. Curva de Niveles. Voltajes (mangitud) en pu con respecto al Script del Caso 3.....	54
Figura 27. Curva de Niveles. Voltaje de ángulos en pu con respecto al Script del Caso 3.....	55

LISTA DE TABLAS.

Tabla 1. Pérdidas Técnicas y No Técnicas por Empresas Distribuidoras.	20
Tabla 2. Pérdidas Anuales de Energía en el Sistema de Distribución del Ecuador en GWh.	21
Tabla 3. Pérdidas Mensuales de Energía Eléctrica en los Sistemas de Distribución (GWh).	22
Tabla 4. Generación Distribuida Según su Categoría.	29
Tabla 5. Características Eléctricas de la Red PREDIS.	37
Tabla 6. Características de Carga y Generación de la Red PREDIS.	38
Tabla 7. Datos de Entrada y Salida de Línea (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014).	44
Tabla 8. Datos de Bus o Nodos.	45
Tabla 9. Resultados de Pruebas de cada Nodo.	46
Tabla 10. Resultados de Pruebas. Máximos y Mínimos.	46
Tabla 11. Validación de Datos, Análisis de Similitud y Exactitud de Prueba (Distribution Test Feeders, 2017).	47
Tabla 12. Evaluación de Resultados para el Caso 1, uso del Algoritmo Inteligente.	50
Tabla 13. Valores de tensión establecidos para los OLTCs.	50
Tabla 14. Nuevos Valores establecidos con OLTCS.	51
Tabla 15. Resultados del Caso 3.1 – 3.4.	53
Tabla 16. Datos de Bus de la red de estudio PREDIS.	54

RESUMEN.

Los Sistemas de Distribución de Potencia, desde la generación hasta el consumidor final, presentan afectaciones en la calidad del servicio. Una de las causas son las pérdidas técnicas que se originan en cables y transformadores. Con el fin de afrontar problemas similares, se desarrollan técnicas que permitan encontrar soluciones ante escenarios desfavorables reduciendo las pérdidas técnicas. El presente trabajo evalúa algunas técnicas, ejecutando un algoritmo desarrollado en el software MATLAB; que analiza el flujo de potencia en la red de distribución, basándose en el principio de Merlín y Black calculando los voltajes (ángulo y magnitud) de cada Nodo, y garantizando que se cumplan los niveles de voltaje dentro de valores nominales. El algoritmo fue testado en una red de prueba del Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica-Power and Energy Society: (IEEE-PES) de 13 Nodos implementada en Simulink, de acuerdo a los resultados obtenidos se estima que el Script tiene un 98,85% de confianza con menos del 1,5% de error, lo cual valida los resultados obtenidos en el caso de prueba. Para el caso de estudio se enfoca nuevamente en una red de 13 Nodos (replica de una red real, Laboratorio PREDIS, Francia) y con la inserción de Generación Distribuida (GD), empleando el algoritmo inteligente se pudo optimizar las pérdidas, convirtiéndola en una Red Inteligente capaz de interactuar eficientemente al momento de la reconfiguración de la red con la presencia de la GD. El algoritmo cuenta con una herramienta avanzada de funcionamiento, que reduce al mínimo las pérdidas inyectando potencia reactiva de las GDs conectadas a la red de Distribución Eléctrica, con el uso de la función de optimización de las restricciones de voltaje definidas en la regulación.

Palabras clave: DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA, PÉRDIDAS DE ENERGÍA, ALGORITMO INTELIGENTE, GENERACIÓN DISTRIBUIDA, SMART GRIDS, EFICIENCIA ENERGÉTICA.

ABSTRACT.

The Power Distribution Systems, from the generation to the final consumer, present affectations in service's quality. One of the causes is the technical losses that is originated in cables and transformers. In order to face similar problems, some techniques are developed to find solutions to unfavorable scenarios, reducing technical losses. The following work evaluates some techniques by executing an algorithm developed in MATLAB software that analyzes the flow of power in network's distribution, based on the principle of Merlin and Black by calculating voltages (angle and magnitude) of each Node, and ensures that voltage levels are met within nominal values. The algorithm was tested in a network test, of the Institute of Electrical and Electronic Engineering - Power and Energy Society (IEEE - PES), of 13 Nodes implemented in Simulink, according to the results obtained it is estimated that the Script has a 98,85% confidence with less than 1,5% error, which validates the results obtained in the tested case. For the case study, it is focused again on a network of 13 Nodes (copy of a real network, PREDIS Laboratory, France) and with the insertion of Distributed Generation (GD), using the intelligent algorithm, it was possible to optimize the losses, converting it into an Intelligent network capable of efficiently interacting at the time of reconfiguration of the network with the presence of the DG. The algorithm has an advanced tool operation, which minimizes losses by injecting reactive power of GDs connectors the electricity distribution network, using the optimization feature restrictions voltage defined in regulation.

Keywords: ELECTRICAL DISTRIBUTION, LOSS OF ENERGY, INTELLIGENT ALGORITHM, DISTRIBUTED GENERATION, SMART GRIDS, ENERGY EFFICIENCY.

CAPITULO I.

1.1 Introducción General.

Las redes de distribución eléctricas topológicamente hablando, en su mayoría son de configuración tipo radial, por su facilidad de operación y control. Específicamente en las distribuidoras de nuestro país los alimentadores primarios de distribución son de topología radial, mismos que presentan niveles de pérdidas considerables. Por otra parte, “la (ARCONEL, Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2017)” indica que las pérdidas en el Sistema de Distribución en el año 2016 fueron de alrededor del 12,21% (promedio anual), y el promedio anual del año 2017 fue de alrededor del 11,50%, lo que indica que en el Ecuador aún se presentas altos índices de pérdidas por situaciones técnicas y no técnicas.

Por otra parte, la gestión de Gobierno Nacional para la reducción de pérdidas a nivel nacional, ha sido notables, considerando que en el mes de diciembre de 2010 contaba con un promedio de 16,33% de pérdidas y que para diciembre de 2017 es de 11,50%, mejorando en un 7% las perdidas en el sistema de distribución nacional (ARCONEL, Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2017), gracias al uso de fuentes de energías renovables. La generación eléctrica va creciendo, así como también el número de usuarios crece de tal manera que las pérdidas en las redes de distribución seguirán presentes si no son mejoradas y/o convertidas en redes más flexibles

El presente trabajo, aborda un tema de interés para las empresas de distribución: la reducción de las pérdidas técnicas, mediante la aplicación de una herramienta computacional que permita introducir algoritmos inteligentes a las redes radiales con el fin de reducir las pérdidas técnicas, ya sea en condiciones normales o mediante la inserción de Generación Distribuida (GD). Producto de la aplicación de nuevas tecnologías, reconfigura las redes radiales convencionales en redes radiales inteligentes.

A continuación, se describe de forma breve el contenido de la presente tesis.

- El Capítulo 1, introduce a la problemática de la investigación con respecto a las pérdidas en redes de distribución actuales, así como una descripción de la metodología a emplear durante la evaluación de las pérdidas técnicas en redes de distribución radial.
- En el Capítulo 2 se detalla la topología de red a ser empleada en el caso de estudio, con este fin se emplean estudios realizados con el uso de herramientas computacionales con el fin conocer los procedimientos utilizados para mejorar el sistema eléctrico de distribución.

- En el Capítulo 3 se describe la funcionalidad del algoritmo inteligente, especificando su estructura para optimizar la reducción de pérdidas técnicas en la red de distribución mediante la reconfiguración de la red de estudio.
- En el Capítulo 4 se describe la validación del algoritmo en una red de prueba de 13 Nodos IEEE (caso de prueba) y la aplicación del algoritmo inteligente en una red real de estudio de la plataforma PREDIS (red eléctrica de Francia), esta red real tiene 13 Nodos (similar al caso de estudio). Mediante el análisis de resultados, gráficas y discusión de cada caso se observa la aplicación de los algoritmos inteligentes para la reducción de pérdidas técnicas en redes de distribución y su función de optimización de pérdidas mediante la reconfiguración en las redes radiales.
- En el Capítulo 5 se presentan las principales conclusiones alcanzadas durante el desarrollo de este trabajo investigativo, así mismo se adjuntan recomendaciones a ser consideradas en futuras investigaciones.

1.2 Planteamiento del Problema de Investigación.

Debido a que los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) operan de forma continua, y considerando la complejidad de las redes de distribución debido a su composición y gran cantidad de elementos instalados se busca un proceso eficiente que permita la reducción de pérdidas técnicas introduciendo algoritmos inteligentes.

Este estudio pretende convertir al sistema eléctrico convencional en un sistema más robusto, confiable y con mayor eficiencia mediante la introducción de técnicas inteligentes, que buscan mantener todos los parámetros dentro de valores permisibles, este tipo de desarrollos motiva a las empresas de distribución al uso de nuevas tecnologías que permitan minimizar las pérdidas y disminuir los impactos hacia la sociedad que han venido afectando a la economía **(Loaiza M., 2016)**.

El algoritmo implementado en un Script computacional de la plataforma MATLAB, servirá para realizar un análisis de las redes radiales o alimentadores primarios, en especial en las áreas radiales trifásicas. El algoritmo corre el flujo de potencia de la red a estudiar, realizando varios cálculos hasta obtener resultados del flujo de potencia ejecutado; para esta investigación se ha denominado tres (3) casos de estudio:

Caso 1, el algoritmo analiza las pérdidas de la red PREDIS con y sin la inclusión de GD, obteniendo como resultado: valores de voltajes: ángulo (grados) y magnitud (voltaje en pu), corrientes de línea (pu) y el número de iteraciones necesarias para desarrollar el proceso de cálculo.

Caso 2, se analiza el caso anterior, pero esta vez usando algoritmos avanzados que permitirán controlar los Conmutadores de Toma en Carga (siglas en inglés, OLTC) con el fin de regular los voltajes mejorando el perfil de la red.

Caso 3, permite reconfigurar la red PREDIS con presencia de la GD mediante la corrección de las pérdidas técnicas presentes en los nodos, esto se realiza ingresando la función de optimización, misma que permite reducir sus pérdidas y mantener las tensiones dentro del rango permitido mediante la inyección de potencia reactiva en la GD.

1.3 Alcance.

El crecimiento de la economía se refleja de cierto modo con el incremento la demanda de la energía eléctrica, a nivel mundial el aumento de usuarios residencial, industriales y comerciales, tal como el crecimiento del número de abonados o clientes (Villaruel, Carter, Gutiérrez, Rudnick, & Huechapán, 2000). Las empresas de distribución (o empresas eléctricas, en el contexto ecuatoriano) buscan ser óptimas frente al crecimiento de usuarios, lo cual implica que los recursos energéticos disponibles deben ser aprovechados de mejor manera. Una solución a esto es la transformación de las redes convencionales de distribución a Redes de Distribución Inteligentes (o Smart Grids); con una visión específica de reducir las pérdidas técnicas la implementación de estas tecnologías son especialmente adecuadas en las redes de nuestro país debido a los altos índices de pérdidas de energía (ARCONEL, Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2017).

La evaluación de pérdidas está dirigida a las redes de topología radial, especialmente a las que brindan el servicio a los consumidores finales ya sean estos residenciales, comerciales o industriales. La topología esta aplicada para redes de distribución eléctrica, aplicando técnicas avanzadas con algoritmos inteligentes para la minimización de pérdidas en el sistema de distribución.

Las técnicas específicas aplicadas al algoritmo serán:

- GD, Generación Distribuida (en inglés; Distributed Generation),
- OLTC, Conmutadores de Toma en Carga (en inglés; On Load Tap Changer).
- VVC, Control de Voltaje/Var (en inglés; Var Volt Control),

Las técnicas son métodos eficientes, desarrollados en la plataforma de software Matlab. Con ésta herramienta evaluaremos un SEP, para diferentes circunstancias y con realidades posibles que se presentan en una red de distribución (variaciones de corrientes, perdidas, caída de tensión o de voltaje, entre otros), permitiendo evaluar el estado actual de la red.

1.4 Justificación.

Las pérdidas de energía son un problema serio, causando desde el incremento innecesario en la generación, reforzamiento en la etapa de transmisión hasta el sobredimensionamiento en los sistemas de distribución (Nouredine, Luong, Raphael, & Bertrand, 2010). A pesar de los esfuerzos realizados por las empresas distribuidoras, los niveles de pérdidas aún pueden ser mejorados, considerando la inclusión de GD como alternativa de compensación, razón principal de esta investigación que trata de evaluar el sistema de distribución de estudio con el algoritmo inteligente propuesto, se busca particularmente mediante este estudio una propuesta que alcance resultados satisfactorios.

Considerando las pérdidas técnicas en las redes de distribución eléctrica, se considera factible el uso de algoritmos inteligentes para la reducción de pérdidas, de tal manera que permitirá mantener el perfil de voltaje (ángulos y magnitudes) de la red en niveles óptimos, corrientes de líneas aceptables, entre otros.

1.5 Delimitación.

Las redes eléctricas inteligentes serán el marco conceptual de esta investigación, estudio que se basa en analizar una red de distribución radial convencional para luego convertirla en una red inteligente, es decir en una red confiable que acepte la inserción de GD, mediante el uso de algoritmos para determinar la pertinencia de inyectar esta generación y su aporte a la red.

1.6 Objetivos.

1.6.1 Objetivo general.

Evaluar la reducción de pérdidas mediante el uso de técnicas avanzadas, aplicando la reconfiguración inteligente por medio de algoritmos en un Sistema Eléctrico de Potencia (SEP) para redes de distribución con topología radial y aplicar en una red de estudio que nos permita determinar la técnica adecuada para la reducción pérdidas técnicas en el SEP.

1.6.2 Objetivo específico.

- Modelar un SEP.
- Simular una red de distribución tipo radial y ejecutar la misma red con el algoritmo desarrollado. Evaluar los resultados (pruebas).
- Comparar las simulaciones de prueba y validar sus resultados.
- Realizar simulaciones en una red de estudio (nueva red de distribución radial).
- Aplicar los algoritmos inteligentes: GD, OLTC y VVC, en la red de estudio.
- Analizar los resultados e inferir las conclusiones y recomendaciones.

1.7 Metodología de Estudio para la Investigación.

El presente estudio previo a la titulación consiste en una investigación tipo cuantitativo y cualitativa, con una metodología bibliográfica y referenciada que ha permitido conseguir los

fundamentos, teóricos y prácticos mediante el análisis de casos similares al que se desea implementar. En cuanto al planteamiento de la investigación se sostiene de bases como:

- Una búsqueda bibliográfica intensa de temas relacionados (artículos, ponencias, tesis, etc.) para el estado del arte.
- Estudios, análisis y resultados con bases fundamentadas.

CAPITULO II.

A continuación, se presenta el estado del arte, mismo que proviene de fuentes de información bibliográficas actualizadas que indican el estado del desarrollo de las redes inteligentes en el país y el mundo. Para ello se presentan un pequeño resumen de cada publicación, tesis o ponencia que ha sido consultada para el desarrollo de esta investigación.

2.1 Descripción de la Investigación.

Considerando que la aplicación de nuevas tecnologías para la disminución de pérdidas técnicas en los sistemas de distribución radiales y que a nivel mundial es más frecuente y el uso de recursos naturales para la generación de energía eléctrica mediante pequeñas fuentes de generación instaladas cerca del consumo se puede utilizar esta generación para mejorar parámetros referentes a la distribución de cargas, gestión de reactivos, mantenimiento del perfil de tensión y otras acciones sobre las redes de distribución.

De investigaciones similares se extraen las técnicas utilizadas por los autores, esto con el fin de comparar y evaluar los métodos existentes, las mismas que se sirven como referencia. Esta investigación se basa en análisis de técnicas empleadas para la reducción de pérdidas en redes de distribución de topología radial, además de otra información complementaria. A continuación, se citarán las diferentes investigaciones que han sido revisadas y que han permitido conocer las evaluaciones de cada una de ellas.

Sin duda la detección de anomalías en las redes de distribución es parte de un área de investigación recurrente con soluciones no siempre satisfactorias, debido a la complejidad que muestran las redes. De investigaciones similares se ha abordado este problema utilizando diversas técnicas, tales como la inteligencia artificial, aprendizaje autónomo y por modelado con métodos heurísticos e iterativos. El autor ha recabado la información necesaria que permita encaminar esta investigación mediante el uso de nuevos métodos para la reducción de las pérdidas técnicas en las redes de distribución con topología radial. A continuación, se detallan las siguientes investigaciones.

2.1.1 Estudio de situación actual de las redes inteligentes en la ciudad de Guayaquil y su aplicación como método de reducción de pérdidas de energía (Loaiza M., 2016).

Los autores de la referencia hacen mención a la implementación de redes inteligentes en la ciudad de Guayaquil. Realizan una comparación entre los beneficios (reducción de pérdidas de energía) y las dificultades (pésimo servicio en los sistemas de distribución) para el uso de nuevas tecnologías con el fin de reducir las pérdidas técnicas y no técnicas. El método de investigación ha sido realizado en base de entrevistas e investigación de campo, conociendo

que las implementaciones de contadores de energía inteligentes son satisfactorias, puesto que se posibilita el control del consumo de energía. Al mismo tiempo proponen que las redes de distribución se vuelvan inteligentes y que exista una comunicación e intercambio de información entre el usuario y la distribuidora.

2.1.2 Modelación para la planificación óptima de redes radiales de distribución (Villaruel, Carter, Gutiérrez, Rudnick, & Huechapán, 2000).

Los autores desarrollan dos modelos de redes radiales de distribución de energía eléctrica, los cuales menciona los costos linealizados por balance de potencia en los nodos y alimentadores y subestaciones. Ambos modelos han sido probados y obtuvieron resultados satisfactorios. El modelo y el algoritmo planteado corresponden a la solución que posee las limitaciones de capacidad y distribución, así han propuesto el desarrollo de una herramienta computacional para resolver redes complejas, optimizando los procesos.

2.1.3 Marco integrado de TICs para la red de distribución con recursos energéticos descentralizados: prototipo, diseño y desarrollo (Nouredine, Luong, Raphael, & Bertrand, 2010).

Los autores consideran la complejidad en los sistemas de distribución eléctrica y la deficiencia entre la distribución de energía y consumidor, de tal manera que su investigación trata sobre la integración los recursos energéticos en la red. El artículo se basa en una información avanzada con una infraestructura de la comunicación - TIC (Tecnologías de la Información y la Comunicación), convirtiéndolas en funcionalidades sofisticadas para la gestión de la energía en redes inteligentes, esta es una alternativa para mejorar la distribución de la energía eléctrica. El diseño integrado de las TICs, busca la coordinación y el control entre lo real (dispositivos de automatización) y los elementos del Sistema de Potencia, la que llevaría a formar una micro-red analógica (μ Grid), mediante componentes tales como las Unidades de Transmisión Remota (en inglés: RTUs). Por lo tanto, las funciones avanzadas de alto nivel se basan en un sistema avanzado de TICs que permiten administrar las fallas en la red, controlar el voltaje y reconfigurar la red, siendo apta para este propósito. Este método permite mantener un nivel de calidad y fiabilidad en la red por medio operación descentralizada siendo una solución práctica para estos desafíos.

2.1.4 Optimización de redes eléctricas mediante la aplicación de algoritmos genéticos (Anaut, Di Mauro, Meschino, & J., Optimización de Redes Eléctricas Mediante la Aplicación de Algoritmos Genéticos, 2009).

Este trabajo plantea la configuración topológica de las redes eléctricas a través de la optimización de su conexión con el fin de reducir las pérdidas técnicas por efecto Joule, empleando algoritmos genéticos, encontrando así un método capaz de hallar la solución

óptima entre todas las posibles combinaciones que ofrecen las maniobras de los interruptores, obteniendo los resultados que validan su factibilidad.

2.1.5 Reducción de pérdida en redes de distribución utilizando programación de restricción concurrente (Caicedo, Lozano, & Díaz, 2005).

En esta investigación, los autores usan el método de reconfiguración de las redes usando un lenguaje con especificaciones programables traduciendo este lenguaje en una Programación de Restricción Concurrente (en inglés: PCCh). Este método considera las restricciones del sistema operativo, así como técnicas relacionadas con el flujo de carga. Y permite reducir significativamente la búsqueda de una nueva configuración de red. La herramienta desarrollada ha sido probada en análisis de hasta 50 Nodos, obteniendo muy buenos tiempos de cálculo para determinar flujos de potencia óptimos, para validar estos resultados se ha ejecutado el cálculo con otras herramientas concluyendo que los resultados obtenidos son correctos.

2.1.6 Reconfiguración de sistemas eléctricos de distribución para minimización de pérdidas técnicas (Fons, Casarotto, & Moya, 2010).

Se plantean métodos para la reducción de pérdidas técnicas, mediante un método heurístico usando el software DigSILENT. Se compararon las simulaciones obtenidas con otros métodos para evaluar sus diferencias, validando la fiabilidad del método.

2.1.7 La universidad en la transformación hacia las redes inteligentes en América Latina (Gómez, 2014).

Se presenta la realidad en la que se encuentra Latinoamérica, remarcando que algunos países cuentan con sistemas energéticos antiguos. Por otra parte, se indica que debido a los recursos existentes es posible una generación sostenible y amigable con el medio ambiente. Una conclusión importante es la importancia de la educación y el rol de la academia en la implementación de estos sistemas en el contexto local.

2.1.8 Estrategias de negocio para medición inteligente acoplado energías renovables (Inga, 2016).

En el estudio “de (Inga, 2016)”, se remarca que la medición inteligente incorporada en la generación distribuida permitirá que las redes sean inteligentes al incorporar bidireccionalidad entre el consumidor y la empresa distribuidora, ya que no solo permite el intercambio de energía sino también de información, este flujo de datos permite gestionar de mejor manera la calidad de suministro y aprovecha los recursos naturales locales incorporando en la red generación de tipo micro y mini cerca de los consumidores, esta incorporación permite disminuir las pérdidas en transmisión y distribución.

2.1.9 Plan estratégico para la reducción de pérdidas comerciales en la empresa eléctrica distribuidora regional de Manabí. EMEL, Manabí (Intriago A., Veloz, & Ramirez, 2013).

En vista de las considerables pérdidas de energía, los autores realizaron un plan para la reducción de las pérdidas técnicas, se analizó la situación de las pérdidas técnicas y comerciales que posee la Empresa Eléctrica Regional de Manabí, identificando las causas. Con el fin de reducir y controlar las pérdidas técnicas se emplean varias acciones: división del área de concesión en sectores, repotenciación de transformadores y sus redes asociadas.

2.1.10 Reconfiguración multiobjetivo para la reducción de pérdidas y la restauración del servicio. (Matos & Melo, 1999).

El artículo, presenta un estudio en base a la reconfiguración de las redes radiales con el fin de reducir las pérdidas y en caso de fallas lograr la restauración del servicio eléctrico, se propone una herramienta computacional que consiste en un algoritmo basado en un método metaheurístico. Para esto, los autores se plantean como objetivo reducir las pérdidas y asegurar continuidad de servicio minimizando el número de operaciones de los dispositivos de reconexión según su configuración y topología. Esta metodología fue aplicada en una red de distribución radial con 52 Nodos.

2.1.11 Desarrollo de un algoritmo de interrelación para microredes de distribución eléctrica (Samaniego, Junio, 2015).

El autor presenta un artículo que vincula la reducción de las pérdidas de energía eléctrica mediante el desarrollo de un algoritmo que permita hacer uso de la Teoría de los Juegos Cooperativos de Utilidad Transferible, se analiza además el uso de energía renovable para la utilización de una micro-red para incorporar esta energía en la red.

El programa contiene tres partes: 1) ingreso de datos y cálculos previos, 2) ciclo iterativo y la 2) solución final. Una vez obtenidos estos parámetros se incorporan los datos de la red radial para realizar el proceso de cálculo adicional por medio de la herramienta computacional denomina VAX 8600 cuya plataforma está disponible en la Universidad de Chile.

La presente investigación busca demostrar que las técnicas basadas en algoritmos inteligentes pueden resaltar cambios importantes entre las empresas distribuidoras y los consumidores finales. Se realizarán estudios de prueba, tomando como referencia algunos modelos de la IEEE (Distribution Test Feeders, 2017), para desarrollar las pruebas necesarias y realizar simulaciones que nos permitan validar los resultados obtenidos, posterior a ello, se considera un estudio de una red real de 13 Nodos que demostrará la utilidad de la herramienta computacional desarrollada a través de algoritmos inteligentes, con técnicas avanzadas que

permita encontrar soluciones para la reducción de pérdidas técnicas que hoy en día son un problema considerable por las empresas distribuidoras.

La aplicación de técnicas avanzadas mediante algoritmos inteligentes (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014), considera que la reconfiguración inteligente en las redes permitirá reducir las pérdidas y con ello mejorar la fiabilidad de las redes radiales y así ser más óptimos en la distribución de energía eléctrica hacia los consumidores finales (Fons, Casarotto, & Moya, 2010).

2.2 Red Eléctrica.

Las redes eléctricas son la última etapa de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP), debido al incremento de clientes y el crecimiento de la demanda es necesario que las empresas distribuidoras realicen mejoras y reforzamientos en sus sistemas de distribución (Ghia & Del Rosso, Diciembre de 2013). Los sistemas de control y operación de los sistemas eléctricos evolucionan y se crean nuevas metodologías para su implementación, diseño, análisis y planificación. Por ejemplo, Ecuador (ARCONEL, Boletín Estadístico, Sector Eléctrico ecuatoriano, 2017), ha cambiado su matriz energética, construyendo nuevas centrales de generación hidroeléctricas como Mazar, Sopladora, Coca Codo Sinclair; térmicas como Termo Gas Esmeraldas, etc.

El SEP debe estar correctamente dimensionado y distribuido a lo largo y ancho del sistema de distribución, lo cual indica que el transporte de energía eléctrica hacia los centros de consumo debe ser eficiente, cumpliendo con las políticas establecidas para mantener los niveles de voltajes estables y cumpliendo con las leyes vigentes de los Sistemas de Distribución y Comercialización.

Si bien es cierto, las pérdidas de potencia se deben a diversos factores, por ejemplo: efecto Joule (Anaut, Di Mauro, Meschino, & J., Optimización de Redes Eléctricas Mediante la Aplicación de Algoritmos Genéricos, 2009), pérdidas no técnicas, etc. Estas pérdidas se ven reflejadas en el coste económico, por lo tanto, las empresas del sector eléctrico tratan de reducirlas.

La reducción de pérdidas en las redes eléctricas se traduce en una reducción en la capacidad instalada de generación tradicional y distribuida, es decir, aumenta la capacidad de distribución sin problemas, con niveles óptimos, evitando daños en el sistema eléctrico de distribución y así optimizando la distribución de electricidad, lo cual permite satisfacer las demandas futuras con la infraestructura existente.

La proyección de las redes eléctricas futuras y su dimensionamiento deben solventar las necesidades proyectadas con la visión a futuras expansiones debido a los crecimientos poblacionales en distintos sectores.

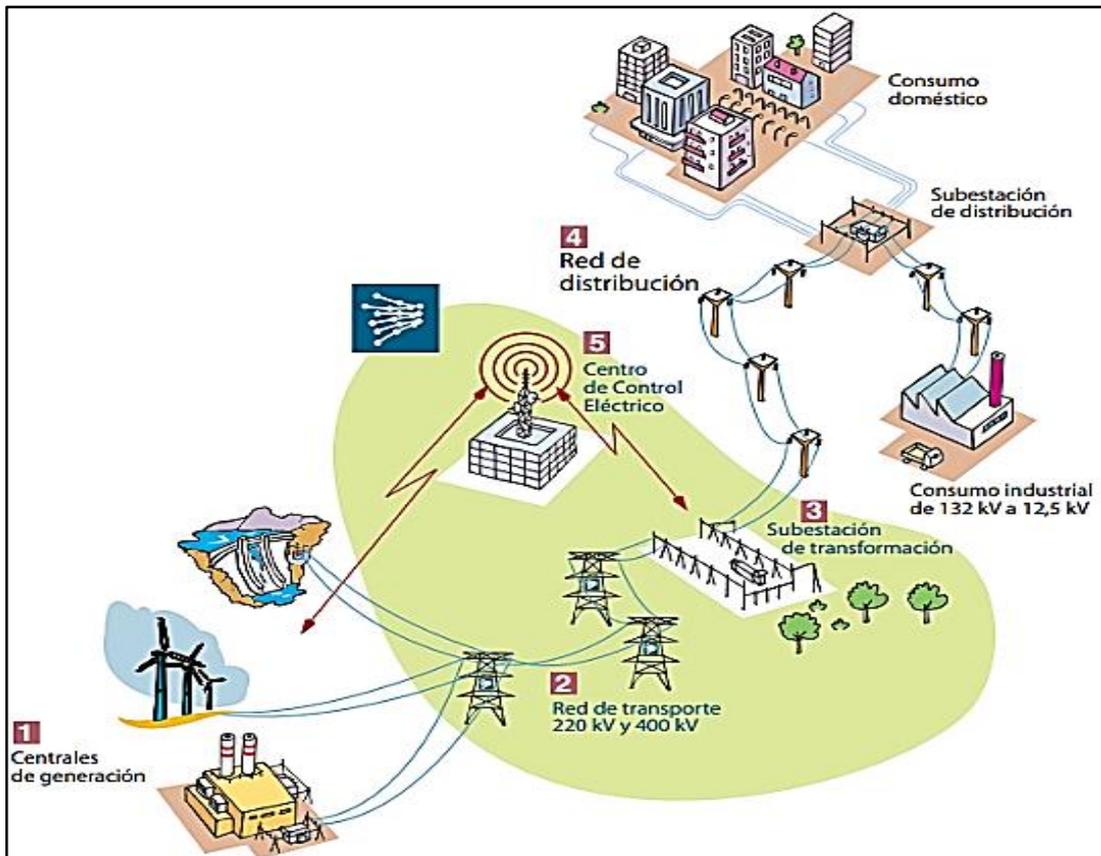


Figura 1. Esquema típico de un SEP, visualización de los principales componentes de generación, transmisión, distribución y consumidores (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014).

Fuente: WEB; sistemasdepotenciaunefa.blogspot.com

Normalmente la energía eléctrica proviene de los recursos energéticos convencionales, con el fin de reducir el impacto ambiental las fuentes no convencionales (energía eólica, solar, geotérmica, hidráulica, etc.) deberían reemplazarlas, ya que estas fuentes tienen baja afectación al medio ambiente, en el caso de la generación distribuida se convierten en una alternativa para reducir las pérdidas de energía en las líneas de transmisión, sub-transmisión y distribución eléctrica permitiendo que estos recursos sean aprovechados adecuadamente y a su vez mejorar los niveles de voltaje (caídas de tensión) en las redes aumentando los índices de calidad, confiabilidad con el consumidor final.

2.3 Redes de Distribución.

En base a la estructura y las características de las redes, se consideran algunos tipos en el sistema eléctrico (Samaniego, Junio, 2015). Como muestra en la Figura 2 las características principales de los tipos de redes eléctricas en las redes primarias de distribución.

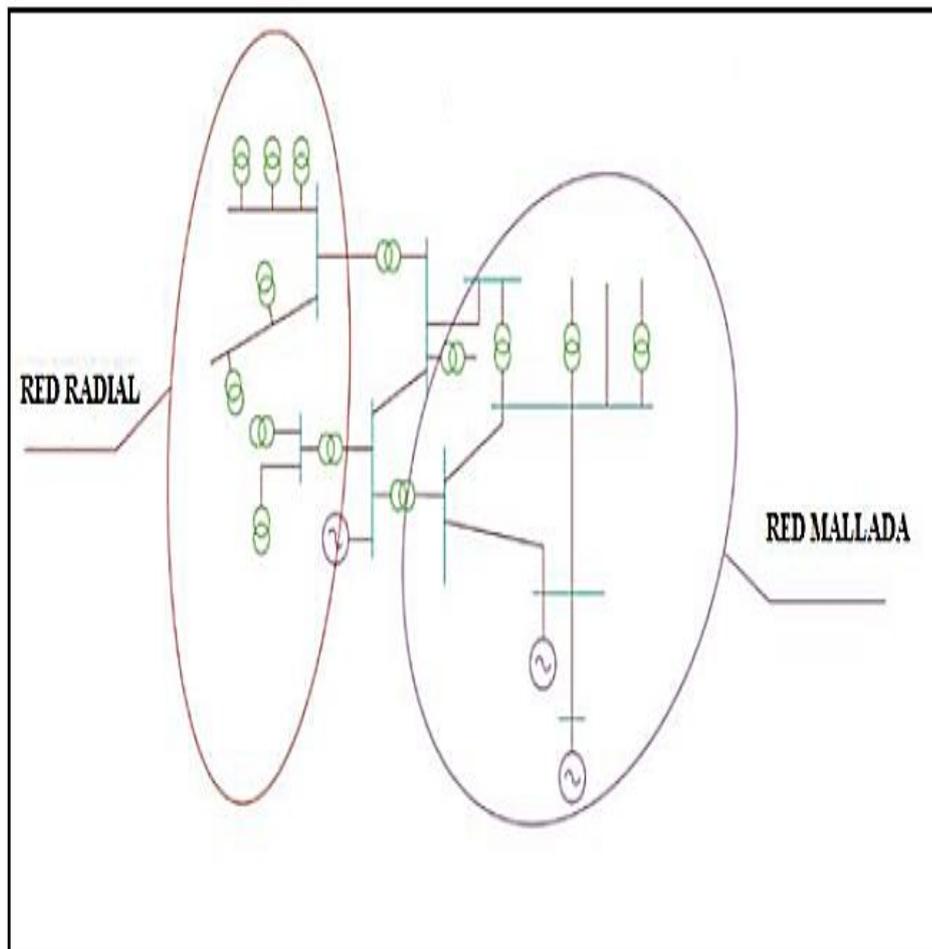


Figura 2. Red tipo Mallada y Radial.
 Fuente: WEB; topología de las redes eléctricas.

Por otra parte, analizando la Figura 3, se evidencia las diferencias y los tipos de redes eléctricas.

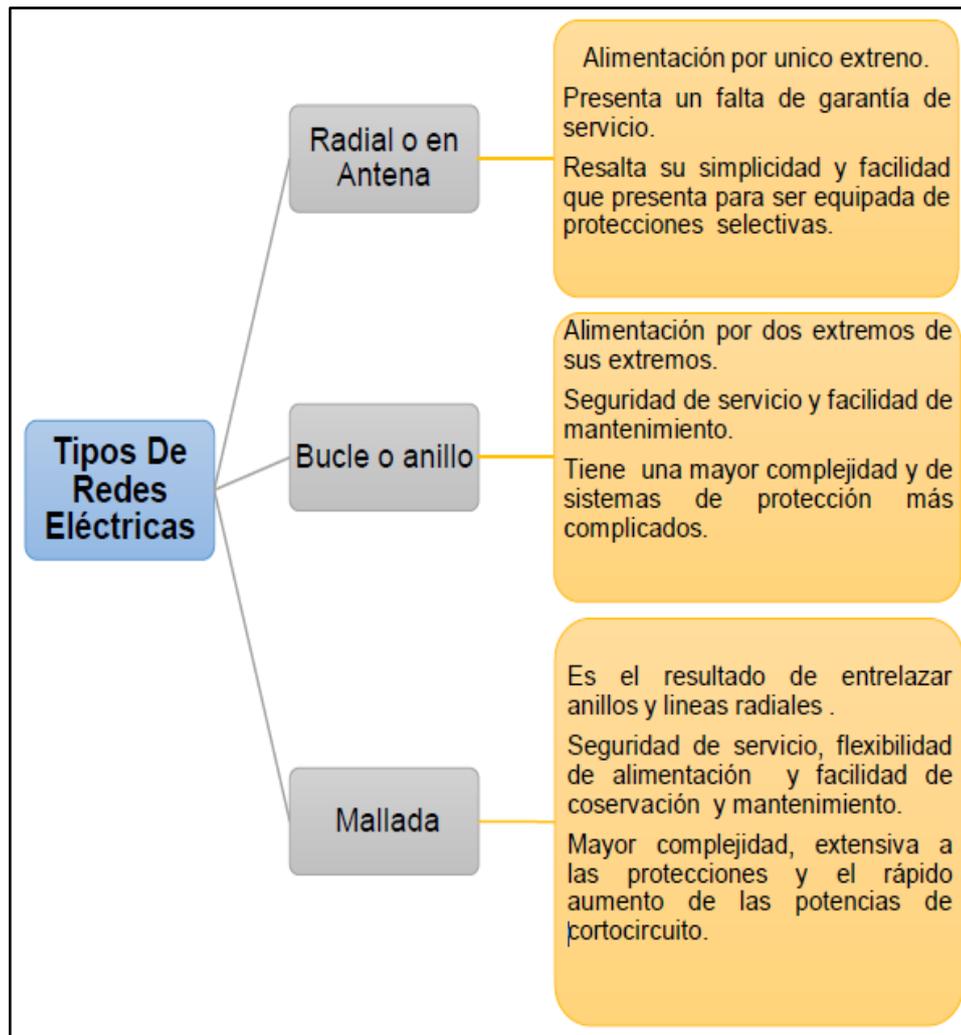


Figura 3. Tipo de Redes Eléctricas.
Fuente: (Loaiza M., 2016).

Los principales elementos que destacan en Medio Voltaje (MV), son los transformadores, elementos de seccionamiento, elementos de protección, alimentadores primarios (6,3kV-22kV), mismos que suelen ser aéreos o subterráneos. A partir de los transformadores de distribución nacen las redes de Bajo Voltaje (BV), que de igual manera estas pueden ser aéreas o subterráneas y finalizan en el consumidor en las acometidas con voltajes de 120/240V o 127/220V según la configuración.

En las redes de distribución encontramos alimentadores primarios, ramales que son complejos por su construcción y usuarios que se conectan lejanamente, en estos casos es complejo disminuir las pérdidas ya que no es posible compensar caídas de tensión, ocasionando irregularidad en la distribución con respecto a los centros de generación. Es por esto, que las regulaciones vigentes obligan a las empresas de distribución a mantener un voltaje estable y dentro de los estándares normados lo cual permite garantizar la calidad de energía y del servicio.

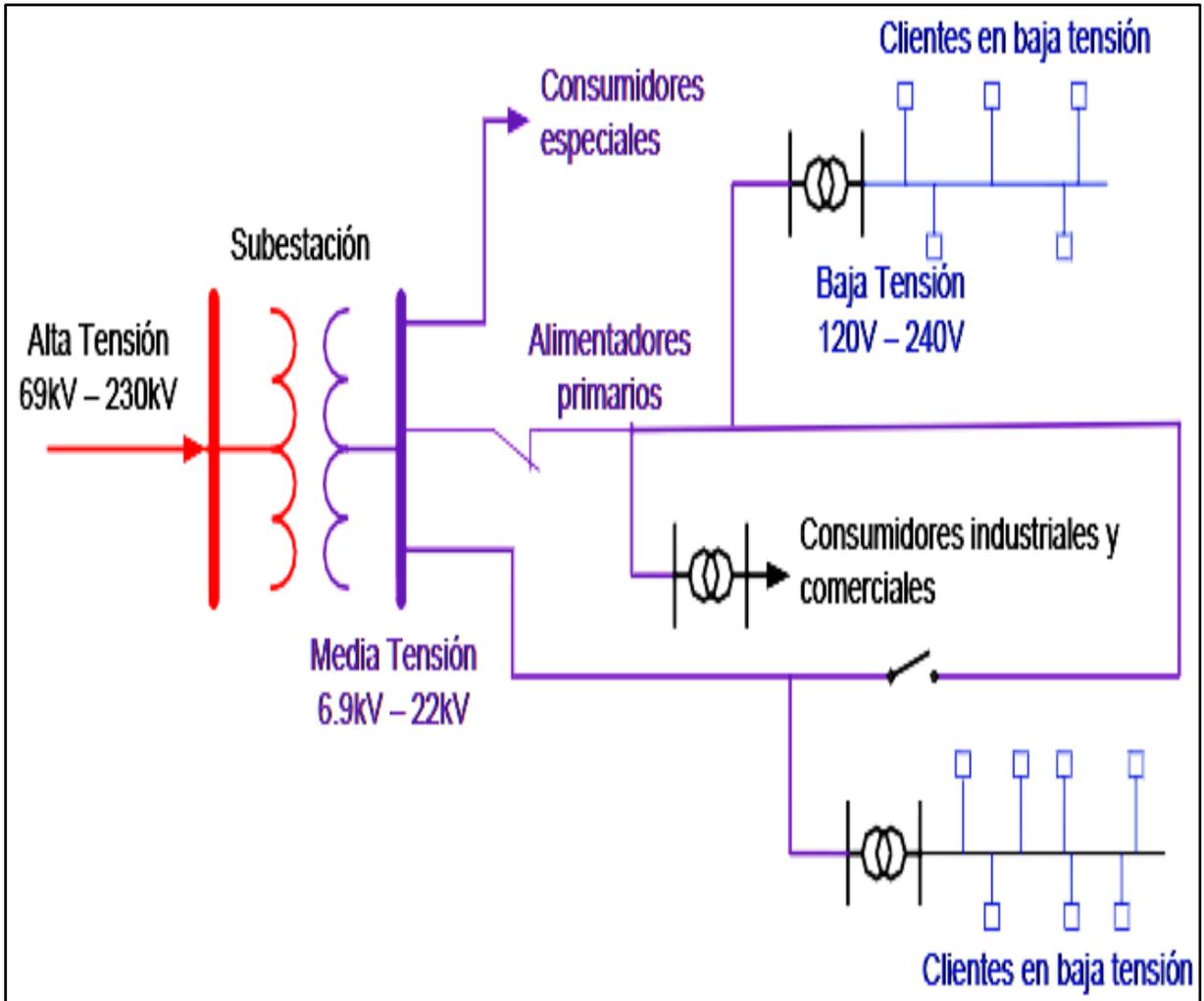


Figura 4. Esquema típico de una Red de Distribución Convencional.

Fuente: (Samaniego, Junio, 2015).

En la Figura 4, se considera el incremento en la demanda energética y el cambio de la matriz energética mediante la incorporación de nuevas tecnologías que se integrarán a la red de distribución tal como cocinas de inducción, calentadores de agua (termo-tanques) y el auto eléctrico, ya que esto implica una preocupación más a las empresas eléctricas. En el futuro próximo, las empresas eléctricas deben buscar la manera de satisfacer la creciente demanda por medio de expansiones en sus redes.

2.4 Pérdidas Eléctricas.

Las pérdidas de energía son originadas por diversas causas y son un problema para las empresas eléctricas de distribución, debido a que son afectadas sus áreas de concesión, y sus diferentes subsistemas como líneas de transmisión, redes de distribución primarias, transformadores, redes secundarias, sistemas de medición entre otras (Intriago A., Veloz, & Ramirez, 2013).

En resumen, las pérdidas de energía eléctrica (ARCONEL, Boletín Estadístico, Sector Eléctrico ecuatoriano, 2017) no son más que una diferencia entre generación eléctrica y el consumo de energía eléctrica (ΔP). La diferencia mencionada se conoce como pérdidas de Transmisión y Distribución siendo estas pérdidas parte de una energía no consumida y por tanto no es facturada.

La siguiente ecuación muestra el cálculo de las pérdidas totales (Loaiza M., 2016).

$$PT = ETIS - EFC \quad (\text{Ec. 1})$$

PT = Pérdidas totales de energía.

ETIS = Energía total ingresada al sistema.

EFC = Energía facturada a los clientes.

2.4.1 Tipos de pérdidas de energía.

De forma simplificada se conocen las pérdidas como técnicas y no técnicas, como muestra la Figura 5 se presentan las causas de las pérdidas de energía.

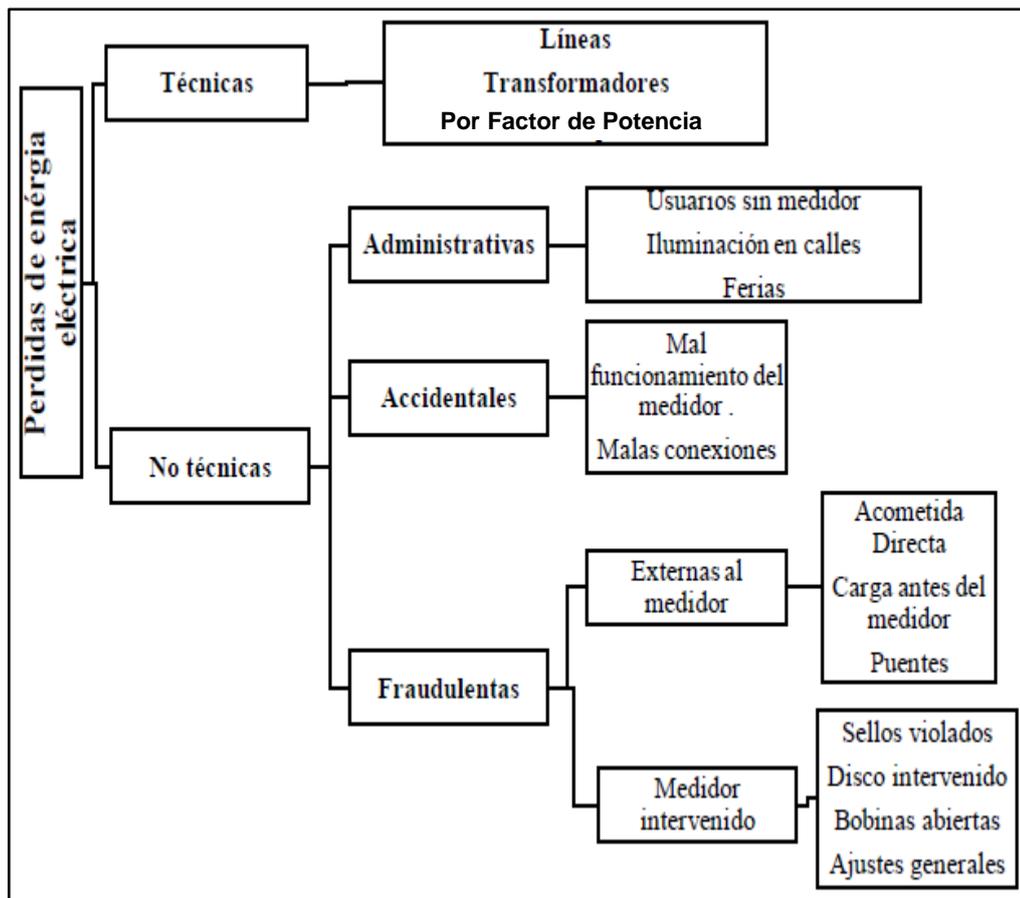


Figura 5. Tipos de pérdidas de energía eléctrica. Red Convencional.

Fuente: (Loaiza M., 2016).

2.4.1.1 Pérdidas Técnicas.

Las pérdidas técnicas son aquellas causadas por disipación de energía en forma de calor, afectan a todas las etapas y son proporcionales a la corriente que circula por los conductores y la longitud de los mismo, se debe incluir como pérdidas técnicas aquellas debidas al efecto corona.

Según las regulaciones nacionales, las pérdidas totales deben tender a cero y con un valor máximo de 6% del total de la energía comprada, según (ARCONEL, Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2017) las pérdidas técnicas deben ser de alrededor del 4% total de la energía comprada a las generadoras.

2.4.1.2 Pérdidas No Técnicas.

Son conocidas también como perdidas negras; producto del fraude, incorrecta medición o estimación de energía hacia el consumidor. Los cálculos de las pérdidas no técnicas se las consideran como una diferencia entre las pérdidas totales del sistema eléctrico y las pérdidas técnicas estimadas (Intriago A., Veloz, & Ramirez, 2013). Es decir, existen mediciones deficientes, facturación incorrecta de los usuarios, o usuarios no registrados, como se muestra en la figura 6.



Figura 6. Ejemplo de Conexión Ilegal, fraude.
Fuente: (Intriago A., Veloz, & Ramirez, 2013).

Este tipo de pérdidas no son reflejadas en facturaciones hacia los usuarios, ya que se considera energía no consumida, lo cual impide registrar con exactitud el lugar de esta fuga. Estas pérdidas negras ocasionan desfases económicos, puesto que esta energía no es facturada, y por decirlo es desperdiciada; por lo tanto, es energía incobrable lo que significa gastos financieros para las empresas distribuidoras.

Las pérdidas técnicas afectan a la calidad del suministro eléctrico, considerando que las pérdidas técnicas (Chala, 2012) y no técnicas significan para las empresas eléctricas:

- Menor disponibilidad de energía.
- Menor nivel de voltaje.
- Disminución de ingresos por consumo no facturados.
- Mayor compra de energía a las unidades de generación.
- Mayor costo por mantenimientos en los sistemas eléctricos.

Tabla 1. Pérdidas Técnicas y No Técnicas por Empresas Distribuidoras.

Empresa	Disponible en el Sistema (MWh)	Pérdidas del Sistema (MWh)	Pérdidas del Sistema (%)	Pérdidas Técnicas del Sistema (%)	Pérdidas No Técnicas del Sistema (%)
CNEL-Guayaquil	5.571.673,87	654.732,75	11,75	8,41	3,34
CNEL-Guayas Los Ríos	2.141.226,52	326.174,41	15,23	11,71	3,52
CNEL-Manabí	1.625.335,67	391.583,30	24,09	11,97	12,12
CNEL-EI Oro	1.119.026,43	168.644,82	15,07	9,67	5,4
CNEL-Milagro	684.047,97	127.102,88	18,58	7,38	11,21
CNEL-Sto. Domingo	673.342,42	76.013,78	11,29	8,73	2,56
CNEL-Sta. Elena	667.595,15	101.269,42	15,17	8,68	6,49
CNEL-Esmeraldas	570.312,92	129.773,20	22,75	9,14	13,61
CNEL-Los Ríos	444.087,51	87.331,35	19,67	7,77	11,89
CNEL-Sucumbíos	331.294,27	51.394,02	15,51	12,36	3,15
CNEL-Bolívar	87.499,80	5.740,24	6,56	6,56	0,00
CNEL EP	13.915.442,53	2.119.760,17	15,23	9,5	5,73
E.E. Quito	4.395.810,63	271.290,11	6,17	4,95	1,22
E.E. Centro Sur	1.078.265,84	76.852,72	7,13	6,17	0,96
E.E. Ambato	644.314,14	37.366,34	5,8	5,69	0,11
E.E. Norte	575.892,71	53.149,41	9,23	6,3	2,93
E.E. Cotopaxi	536.995,03	45.806,23	8,53	6,96	1,57
E.E. Riobamba	377.827,30	41.393,28	10,96	7,97	2,98
E.E. Sur	355.784,53	35.890,14	10,09	8,76	1,32
E.E. Azogues	110.193,60	4.684,60	4,25	3,87	0,39
E.E. Galápagos	51.755,98	4.747,98	9,17	7,42	1,75
Total Empresas Eléctricas	8.126.839,76	571.180,80	7,03	5,71	1,32
Total	22.042.282,30	2.690.940,98	12,21	8,10	4,1

Fuente: Elaboración del autor en base (ARCONEL, Boletín Estadístico, Sector Eléctrico ecuatoriano, 2017).

Lo cual repercute en las empresas distribuidoras como:

- Aumenta el pago de transporte de energía entre la transmisión y la distribución.
- Disminuye la vida útil de los elementos de los sistemas eléctricos principales.
- Inversiones altas por renovación de equipos, estructuras etc.
- Menores planes de reposición y expansión.

2.4.1.3 Situación actual del país.

Según datos estadísticos, en el Ecuador (ARCONEL, Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2017), los registros de pérdidas del año 2014 se ubica alrededor de un 12,38%. A continuación, se muestra en la Tabla 2 las pérdidas según su tipo.

Como se puede observar las pérdidas han ido disminuyendo gradualmente, esto se debe a que los sistemas eléctricos en las redes de distribución van mejorando. Es inevitable que un sistema eléctrico presente pérdidas técnicas, debido a la resistencia óhmica de los conductores, los sistemas de distribución poseen márgenes de pérdidas mayores debido a la mayor longitud de las redes. Las empresas de distribución mejoran sus redes con el fin de mantener niveles de tensión óptima, mejorando la calidad de energía.

Tabla 2. Pérdidas Anuales de Energía en el Sistema de Distribución del Ecuador en GWh.

Año	Pérdidas Técnicas (MWh)	Pérdidas No Técnicas (MWh)	Pérdidas del Sistema (%)
2000	930,54	1276,38	21,89
2001	1092,77	1241,32	22,31
2002	1042,70	1410,92	22,51
2003	1140,91	1492,50	22,89
2004	1282,43	1548,88	23,01
2005	1321,50	1650,22	22,76
2006	1292,72	1776,18	22,25
2007	1335,65	1754,18	21,42
2008	1421,21	1751,87	19,61
2009	1499,10	1266,17	17,31
2010	1499,79	1247,64	16,33
2011	1560,95	1073,13	14,73
2012	1599,12	946,94	13,60
2013	1632,57	932,69	12,62
2014	1722,08	868,02	12,38
2015	1836,86	224,25	12,21
2016	1674,84	993,66	11,74
Total	23885,74	21454,95	18,21

Fuente: Elaboración del autor en base (ARCONEL, Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2017).

La Tabla 3 muestra las pérdidas mensuales durante el año 2017 de la totalidad de empresas distribuidoras en Ecuador.

Tabla 3. Pérdidas Mensuales de Energía Eléctrica en los Sistemas de Distribución (GWh).

Fecha	Pérdidas Técnicas	Pérdidas No Técnicas	Pérdidas Sistema (%)
Enero	151,65	96,34	12,89
Febrero	119,63	31,09	8,54
Marzo	163,00	135,69	15,02
Abril	145,14	50,03	10,19
Mayo	157,78	115,57	13,73
Junio	126,30	56,27	9,80
Julio	127,91	81,72	11,37
Agosto	133,70	95,18	12,18
Septiembre	128,48	64,12	10,40
Octubre	137,06	116,21	13,06
Noviembre	117,87	40,81	9,01
Diciembre	91,51	56,20	13,58
Total	1.600,044	939	11,64

Fuente: Elaboración del autor en base (ARCONEL, Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2017).

Con respecto a las estadísticas (ARCONEL, Boletín Estadístico, Sector Eléctrico ecuatoriano, 2017), para un punto de comparación entre los años 2014 al 2017 se evidencia una mejora en los sistemas de distribución, con una variación de un 6%. Con respecto a los años 2016 y 2017 su variación es mínima. A continuación, tenemos las curvas de pérdidas mensuales con respecto al año 2017.

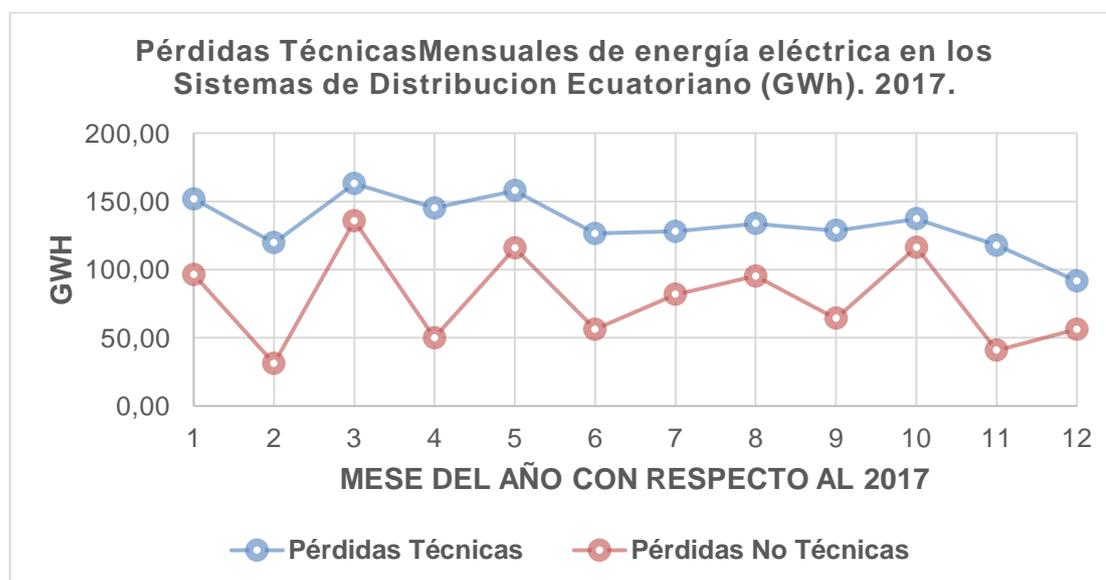


Figura 7. Curva de Pérdidas Técnicas y No Técnicas de Energía en el Sistema de Distribución del Ecuador en GWh.

Fuente: Elaboración del autor en base (ARCONEL, Boletín Estadístico, Sector Eléctrico ecuatoriano, 2017), (ARCONEL, Agencia de Regulación y Control de Electricidad, 2017).

2.5 Smart Grids.

Se conocen como redes inteligentes (Loaiza M., 2016), aquellas redes que incorporan nuevas tecnologías de la informática en las distintas etapas (generación, transmisión y distribución), con el propósito de mejorar la calidad de suministro, la utilización de recursos distribuidos lo cual asegura que la red sea eficiente, sostenible, segura y rentable. La innovación de las redes inteligentes se vincula en una tecnología digital que da paso a la comunicación bidireccional entre las empresas distribuidoras y sus clientes.

La necesidad de implementar las redes inteligentes, se basa en dar paso a las tecnologías avanzadas de comunicación que permitan mejorar el concepto de maniobra, control, comunicación y operación de los sistemas (Fons, Casarotto, & Moya, 2010). Debido a los problemas existentes en los sistemas eléctricos de distribución convencionales se viabiliza la inserción de estas tecnologías, está demostrado que la implementación de una red inteligente incrementa la fiabilidad y calidad de suministro permitiendo detectar y minimizar problemas por pérdidas técnicas, fallos entre otras. La capacidad de detección de problemas en la red de distribución permite aislar la causa (cargas desbalanceadas, fallas, pérdida de generación), evitando la propagación de cualquier tipo de anomalía y permitiendo su rápida recuperación a condiciones normales (Inga, 2016).

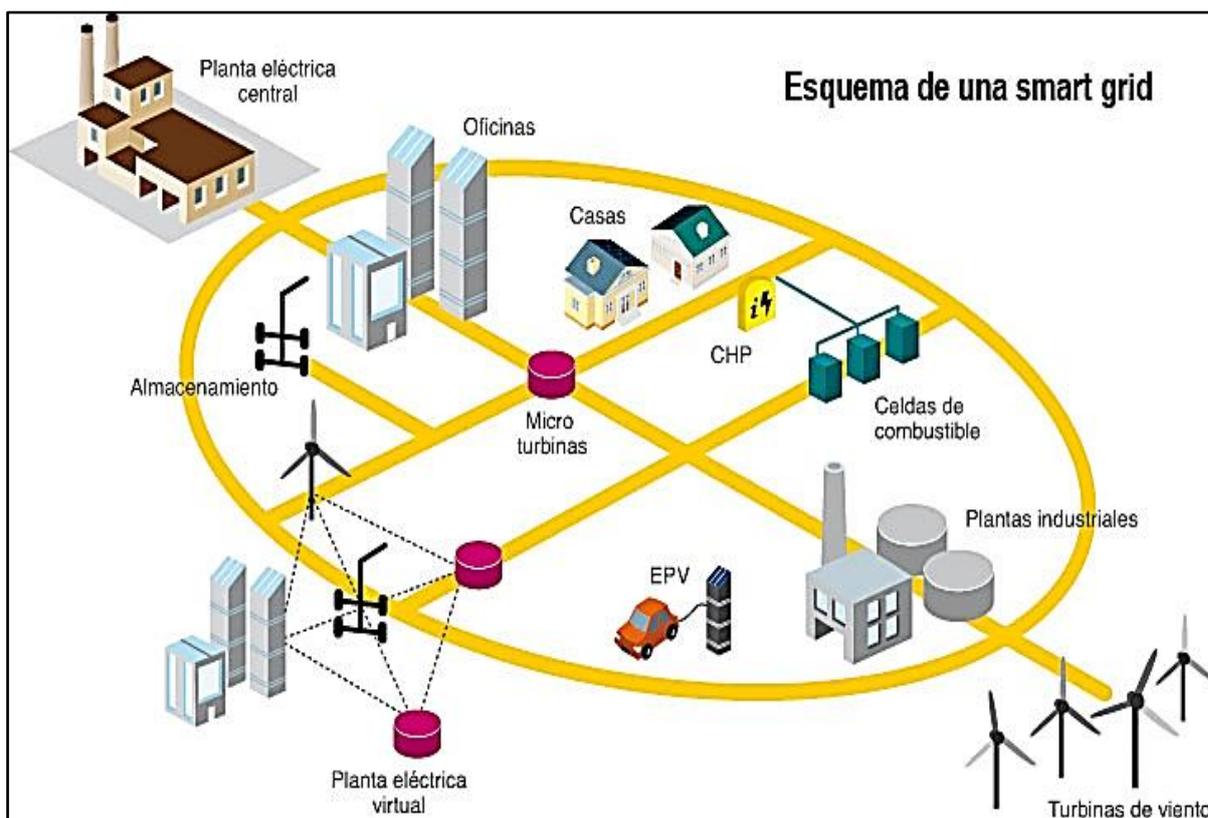


Figura 8. Esquema de una red inteligente con fuentes renovables.
Fuente: WEB. constructorelectrico.com/redes-inteligentes-smart-grid/

Las redes inteligentes tienen como objetivo mantener el equilibrio de las redes eléctricas aguas arriba (Samaniego, Junio, 2015), así como mantener la conservación del medio ambiente permitiendo una integración de fuentes renovables y no renovables mediante la denominada generación distribuida (GD). En nuestro medio el consumo de energía eléctrica va en aumento, por lo tanto, se debe aprovechar las fuentes de energía naturales locales (solar, eólica, hidráulica), desplazando las fuentes convencionales (basadas en fósiles).

Según el cambio propuesto en la matriz energética del país (ARCONEL, Boletín Estadístico, Sector Eléctrico ecuatoriano, 2017), se pretende la incorporación de tecnologías que impactarán en las etapas de generación, transporte, distribución, comercialización y consumo; motivo por el cual la implementación de las redes inteligentes es el paso natural para asegurar un sistema integral eco-amigable, técnicamente confiable y con operación económica viable.

Esta investigación se centra en el uso de la GD, en la etapa de distribución convirtiendo las redes existentes en redes inteligentes para reducir las pérdidas de energía (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014), considerando el cambio de modelo energético convencional y la progresiva incorporación de estas tecnologías por parte de las empresas de distribución.

Existen varios motivadores para la implementación de nuevas tecnologías, entre estos se puede considerar:

- Disminución de pérdidas técnicas en la etapa de distribución.
- Disminución de pérdidas técnicas en los alimentadores primarios radiales.
- Reducción de costos de operación.
- Reducción de costos por implementaciones y expansiones de redes
- Disponibilidad de fuentes de energías limpias, amigables con el medio ambiente.
- Mejorar la calidad de suministro.
- Aumento de la confiabilidad de la red de distribución.
- Mejorar los servicios entre las empresas eléctricas y los usuarios.

Las redes inteligentes son capaces de integrar las acciones de cada agente de la red. por esta razón se considera que la evolución de la red tradicional a la red inteligente se realizará en el largo plazo a escala nacional y en el mediano plazo en lo local.

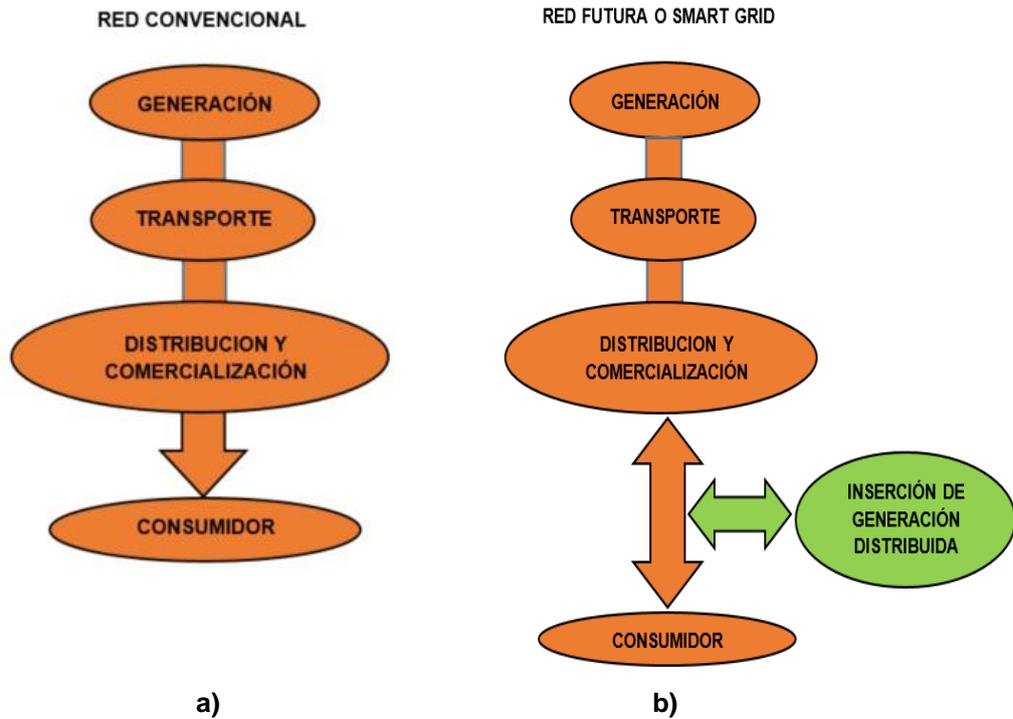


Figura 9. a). Modelo de una Red Convencional / b). Modelo de una Red Futura (Loaiza M., 2016).
 Fuente: Elaboración del autor en base (Loaiza M., 2016).

Las redes inteligentes son la base de un nuevo modelo de las redes de distribución. Estas además de gestionar los procesos de distribución y optimización técnica permiten interactuar con el cliente final, convirtiéndolo en un consumidor proactivo, esto permite un mejor uso de la energía y a la vez ahorro (Fons, Casarotto, & Moya, 2010), (Loaiza M., 2016).

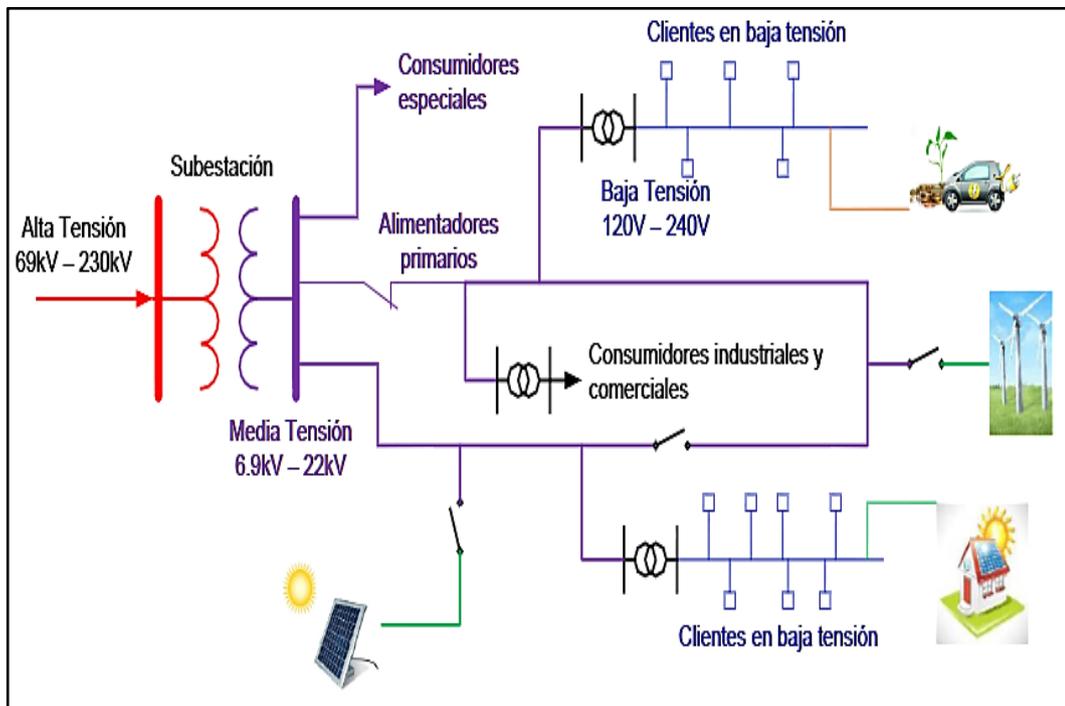


Figura 10. Incorporación de Energías No Convencionales a un Sistema de Distribución Radial.
 Fuente: Samaniego Juan (Samaniego, Junio, 2015).

La Figura 11 muestra una red de distribución con la incorporación de GD, indicando de qué manera se insertan a la red y el uso que se puede obtener, de tal modo que reconfigura la red convencional a una red inteligente. Por otra parte, la GD llega a ser amigable con el ambiente lo cual la convierte en un modelo de desarrollo sostenible.

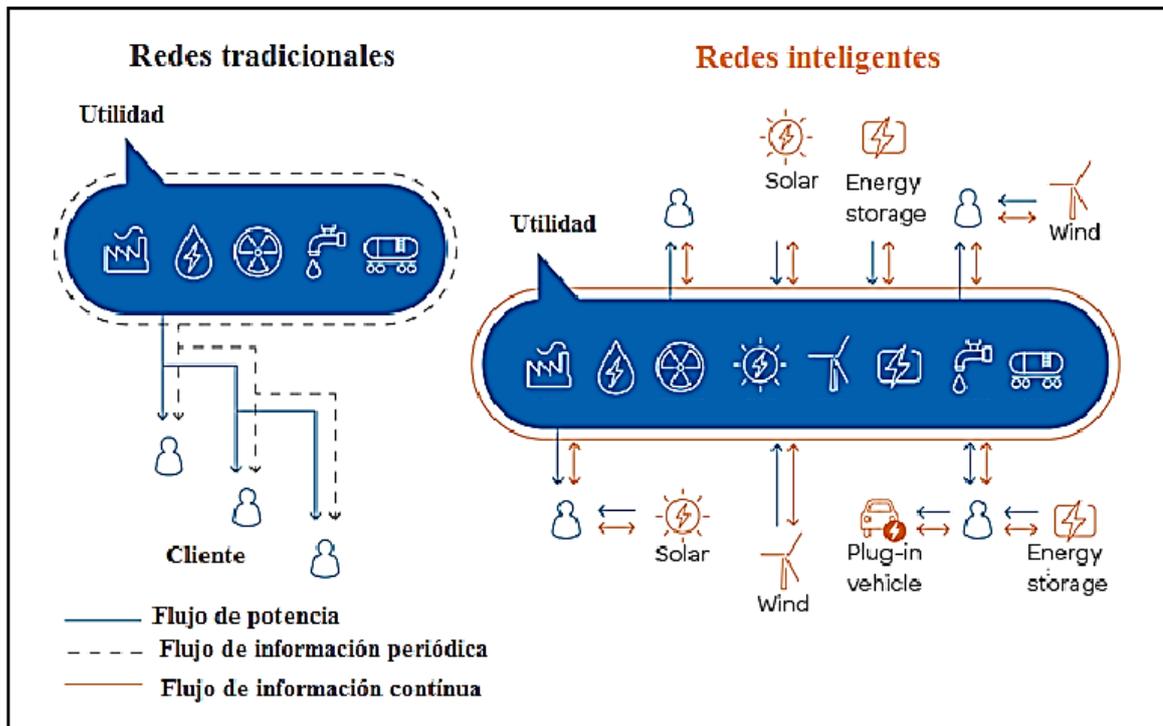


Figura 11. Comparación entre Redes Tradicionales vs Redes inteligentes.
Fuente: web AT&T.

2.6 Reconfiguración de Alimentadores.

Los alimentadores primarios forman parte de un Sistema Eléctrico de Distribución (SED) (Fons, Casarotto, & Moya, 2010), (Granda, 1998), los cuales producen importantes pérdidas a causa de sus grandes longitudes. La reconfiguración tiene como objetivo optimizar la red a una estructura radial, ya que un buen funcionamiento permite mantener los niveles de tensión dentro de rango permitidos.

La configuración típica de una red es de topología radial, es decir con pocos puntos de alimentación, lo cual hace que sea fácil operar en casos de falla (equipos de maniobra, equipos de protección y de seccionamiento entre otros). Si se considera una variación en la topología típica de una red este cambio o mejora se denomina reconfiguración.

El objetivo de la reconfiguración de alimentadores o redes de distribución es reducir las pérdidas técnicas (Fons, Casarotto, & Moya, 2010), (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014). Para obtener una reconfiguración, se puede considerar el uso de distintos métodos capaces de cumplir con su objetivo.

En esta investigación se utilizará algoritmos inteligentes capaces de correr el flujo de potencia en base a una herramienta computacional en la plataforma MATLAB para interpretar sus resultados y aplicar un método eficiente de reducción de pérdidas basado en la reconfiguración de la red.

2.7 Descripción de los Métodos aplicados a la Reducción de Pérdidas.

El objetivo de la “Evaluación de la Reducción de Pérdidas Técnicas mediante Algoritmos Inteligentes en Redes de Distribución Radiales” es analizar los métodos propuestos en la referencia (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014), para posteriormente simular una red modelo de 13 Nodos (Distribution Test Feeders, 2017).

Los métodos propuestos (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014), consisten en aprovechar la reconfiguración de la red, efectuando un rápido y preciso cálculo de flujos de potencia, controlando a cada uno de los nodos (variación de los parámetros eléctricos como: niveles de voltaje de ángulo y magnitud, así como la configuración de la red de distribución). Mediante la optimización de la red radial con posibles combinaciones con las cuales pueda operar y ver la configuración de red más óptima para determinar el mínimo de pérdidas. Para ello se debe considerar:

- Información referente a cargas y las fuentes de alimentación de la Red.
- Limitar los nodos (número práctico).
- Definir la red modelo.
- Reconfigurar la red
- Usar los algoritmos y buscar la solución más óptima.

En base a las consideraciones mencionadas, se proponen dos sistemas de análisis, el primero es una red modelo o de prueba y la segunda es una red de estudio con características cercanas a una de distribución real. Las características a ser tomadas en cuenta son:

- Datos de Bus.
- Características de: generadores, transformadores, conductores, entre otros.
- Valores de entrada y salida de cada Nodo.

2.7.1 Algoritmos aplicados a la Reducción de Pérdidas.

Los algoritmos aplicados para reducir las pérdidas técnicas se ejecutan por medio de interacciones. Los diferentes métodos (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014), realizarán la reconfiguración de una red convencional a una red inteligente, transformándola en una red fiable y con calidad de energía. Los siguientes métodos que componen el algoritmo son funciones que permitirán optimizar la red de distribución.

Los métodos: GD, OLTC y VVC (siglas en inglés) se desarrollan dentro de un Script, para cada caso de estudio sobre la plataforma de software Matlab. El Script será la herramienta con la que procederemos a evaluar la red PREDIS (red real de estudio creada en la Plataforma PREDIS de Francia, presentado en la sección 3.4, del Capítulo 3.) con datos reales de una red de distribución de Francia. Se analiza cada caso (variaciones de voltajes).

Los métodos se pueden interpretar de forma matemática y conceptual, debido a la programación que facilita realizar el análisis de la topología de la red y al mismo tiempo la reconfiguración de la red radial.

2.8 Generación Distribuida.

La generación distribuida en los sistemas eléctricos y de distribución tiene como objetivo integrar un nuevo modelo de generación ubicada cerca del cliente (Khushalani & Schulz, 2014). En consecuencia, es necesario cambiar el modelo de generación centralizada a unos modelos de generación descentralizado y dinámico, conocido como generación distribuida, o en términos ahora usados por la red Inteligente se denomina DER (en inglés; Distributed Energy Resource) (Villaruel, Carter, Gutiérrez, Rudnick, & Huechapán, 2000).

La GD actúa en el sistema eléctrico con varias fuentes de energía, generalmente ubicadas cerca de los consumidores, no como los sistemas eléctricos convencionales que poseen pocas fuentes de energía lejanas y de gran potencia. La GD forma parte de una micro red de energía, y pueden abastecer de energía de forma local mejorando el sistema de distribución, interactuando con las redes mediante intercambios cooperativos.

La nueva forma de generación, en la cual incluye en su modelo la GD (Sarina Adhikari, 2013), aprovecha al máximo las fuentes naturales, haciendo uso óptimo de los recursos energéticos disponibles. Estos sistemas se constituirán en generadoras ubicadas cerca o en las ciudades y poblados, y se aportarán su generación a las redes de distribución.

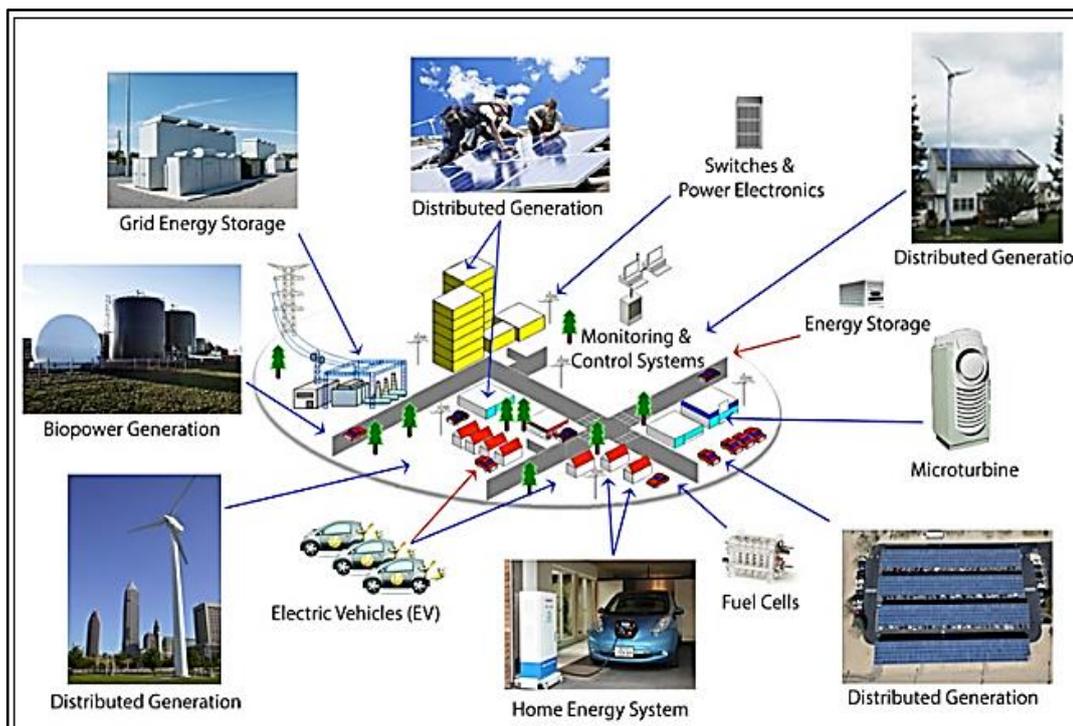


Figura 12. Generación Distribuida, modelo con Fuentes Alternativas de Deneración.
 Fuente: WEB: dfc-economiahistoria.blogspot.com/2013/05/hacia-un-nuevo-modelo-energetico.

La generación distribuida suele ser categorizada por sus diferentes rangos de potencia, la Tabla 4 describe la clasificación según el parámetro de potencia. Los rangos de potencia varían según los países debido a los niveles de potencia de sus generadores convencionales.

Tabla 4. Generación Distribuida Según su Categoría.

Descripción	Potencia W/kW
Micro	1 W < 5kW
Pequeña	5kW < 5MW
Mediana	5 MW < 50MW
Grande	50 MW < 300MW

Fuente: (Ghia & Del Rosso, Diciembre de 2013).

2.9 OVER LOAD TAP CHARGE (OLTC).

El cambiador de tomas en carga (OLTC) es un mecanismo de regulación presente en los transformadores, que permite variar el voltaje de salida de un transformador (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014). Permite una variación de entre el 5% y el 25% de la tensión nominal. Los cambiadores de tomas en carga pueden ajustarse bajo requerimiento robusteciendo a la red, permitiendo al SED mantener perfiles de tensión con su operación automática, esta tecnología no requiere desconexión lo cual permite mantener continuidad de suministro.



Figura 13. OLTC en el interior de un transformador.

Fuente: WEB: [wikipedia.org/wiki/Tap_changer](https://es.wikipedia.org/wiki/Tap_changer)

2.10 CONTROL DE VOLTAJE VARIABLE - VOLT VAR CONTROL (VVC).

El control de voltaje variable (o VVC en inglés) mejora las estrategias de control de la energía volt/var en la red de distribución (añade el factor de generación virtual a sus redes) que consiste en la inyección de reactivos, que permite mantener niveles de tensión aceptables en todos los puntos del alimentador bajo todas las condiciones de carga (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014). La función objetivo del VVC es la optimización de tensión mediante la inyección de reactivos de los generadores incluida la generación distribuida. Sus ventajas son:

- Reducción de la demanda - 1,5% a 2,1%.
- Reducción de la energía – 1,3% - 2%.
- Rentable.
- Reducir el número de operaciones en OLTC y reconectores.
- Mejorada el perfil de voltaje.

El objetivo de VVC es mejorar la calidad de energía, optimizando a la red con presencia de la GD, debiendo cumplir con lo siguiente:

- Apoyar a los objetivos de una "Smart Grid".
 - Mejorar la eficiencia reduciendo las pérdidas técnicas.
- Es indispensable en el despliegue generalizado de generación distribuida.

La generación distribuida y el almacenamiento de esta energía pasan a formar parte de la red una vez conectadas, con el fin de que el sistema se vuelva sostenible (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014). Esta incorporación de energía permite que el sistema inteligente gestione niveles de la red localmente, para que en un nivel más elevado se vincule con otras redes de la misma empresa de distribución empleando el mismo algoritmo, permitiendo que los sistemas eléctricos sean técnicamente flexibles y puedan lidiar con los cambios repentinos en los niveles de voltaje.

La Figura 14 indica como decae los niveles de voltaje entre el primer usuario y el usuario final, ocasionando caída de tensión en la red hacia el ultimo usuario, lo cual indica que no se encuentran niveles de voltaje estables u óptimos dentro de los permitidos.

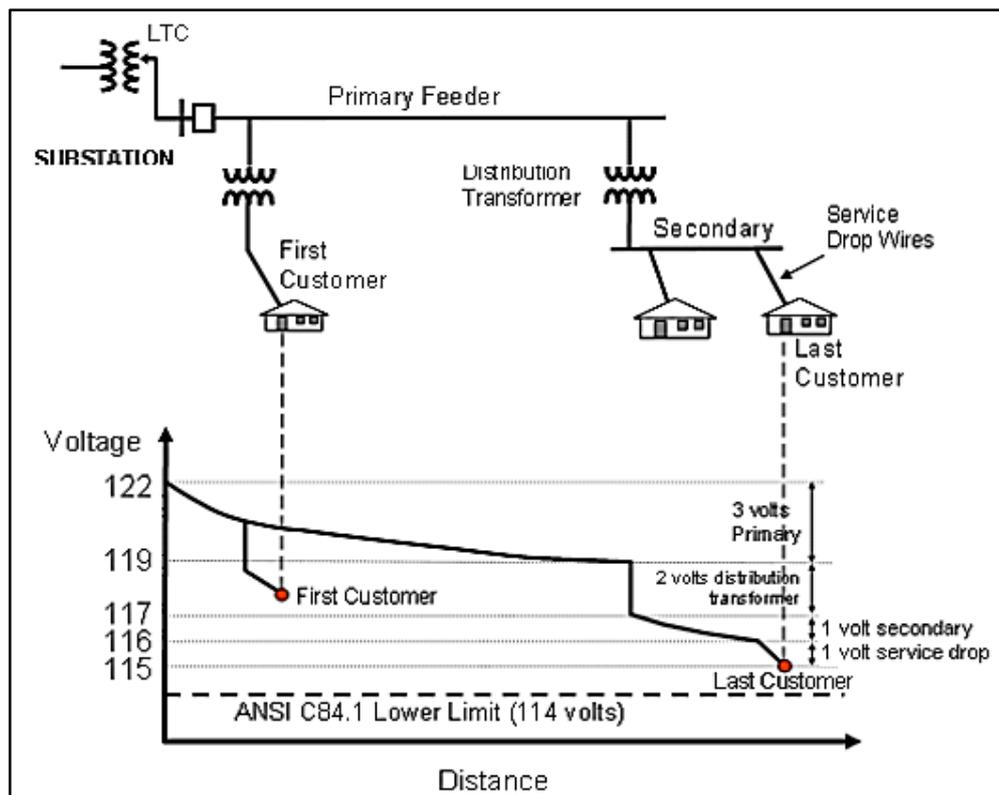


Figura 14. Red Primaria y la Caída de Tensión.
Fuente: WEB: cialab.ee.washington.edu/nwess/2012/talks/uluski.pdf.

La introducción de la técnica VVC es muy conveniente para estos casos, puesto que regula los niveles de voltaje y los mantiene en niveles estables.

CAPITULO III.

3.1 Desarrollo del Algoritmo Inteligente, Programa Computacional.

3.1.1 Introducción.

Para analizar el flujo de potencia y determinar la situación actual del sistema eléctrico, ha sido necesario desarrollar un programa computacional por la facilidad que implica al momento de analizar un gran número de ecuaciones, matrices, iteraciones, entre otras, por la cantidad de información que se debe usar para el desarrollo. Para sistemas complejos por su topología es importante usar una herramienta computacional que permita ejecutar toda la información que se tiene en un sistema eléctrico, mismo que resuelva con exactitud los valores de voltaje (en ángulo y magnitud), pérdidas y número de iteraciones.

Esta investigación tiene como propósito analizar el flujo de potencia de una red de estudio creada en la Plataforma PREDIS (centro de innovación y capacitación en energía distribuida) de Francia, la cual es una réplica real de una red de distribución radial. Todos sus elementos que compone el sistema eléctrico de estudio como generadores, transformadores, redes o líneas eléctricas y sus características son reales. Para el análisis de flujo de potencia se cuenta con cierta información; diagrama unifilar, características de nodos (o barras), generación, carga, valores de demanda (activa y reactiva) de igual manera las resistencias y reactancias del conductor, así como las distancias entre nodos.

El programa cuenta con una base de funciones que desarrolla con efectividad el cálculo, considerando la formulación matemática, y la aplicación del método de Merlín y Black (apertura secuencial de las ramas hasta llegar a una configuración radial óptima) para ejecutar el algoritmo y obtener la solución que cumpla con las expectativas y sus valores de voltaje estén dentro del rango admisible ($\pm 5\%$ del valor nominal), estos valores determinan el funcionamiento de la red permitiendo la inserción de generación distribuida, considerando las limitaciones técnicas antes mencionadas (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014).

Por medio de los algoritmos desarrollados en varios Script de MATLAB, se puede analizar las condiciones de la red en estado estacionario, permitiendo evaluar las pérdidas técnicas y al mismo tiempo interactuar con la generación distribuida, alternativa que contribuye para reducir las pérdidas. Es importante conocer la topología de la red para ubicar correctamente la generación distribuida, punto clave para la reducción de pérdidas (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014), aumentando los índices de calidad y eficiencia energética.

En este capítulo se describirá el aporte que puede dar este algoritmo para la minimización de pérdidas técnicas, mediante la optimización en las redes primarias de distribución, que requieren de diversos cálculos matemáticos para determinar un escenario óptimo. Se requiere

de varios cálculos para lograr la convergencia en una ejecución de un flujo de potencia, para determinar la reducción de pérdidas.

Los métodos inteligentes para las reducciones de pérdidas no son nuevas. En la referencia “(Samaniego, Junio, 2015)” aplican algoritmos inteligentes, así también procedimientos para reducir las pérdidas mediante la inserción de generación distribuida con el fin de mejorar la calidad de energía. La introducción de la inteligencia en las redes de distribución radial permite el desarrollo es un soporte para afrontar retos relacionados con una eficiente distribución de energía eléctrica (Granda, 1998).

3.2 Conceptualización Del Programa.

Los desarrollos de optimización, están sujetos a una serie de parámetros que enfocan a la optimización de la red primaria de un sistema eléctrico de distribución radial, se requieren de múltiples procesos para ser ejecutados, con el fin de lograr un escenario que predomine únicamente la reducción de pérdidas en el sistema de potencia. La reconfiguración de las redes, permite realizar operaciones radialmente, objetivo de este estudio, que con el algoritmo inteligente y sus funciones encontrará la configuración que presente el mínimo de pérdidas. El método eficiente de Merlín y Black (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014), permite la apertura secuencial de las ramas hasta que la corriente alcance el mínimo y así alcanzar una configuración radial.

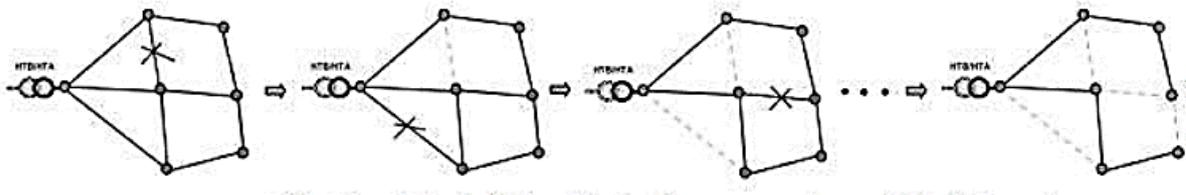


Figura 15. Principio de Merlín y Black, apertura secuencial de las ramas.
Fuente: (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014)].

Las redes primarias de distribución, se componen de varios elementos, razón por la cual se debe conocer su topología, que permita realizar cambios y adaptarla a una forma radial de distribución. Se analiza la red y se corre el flujo de potencia, esto permitirá conocer sus pérdidas de potencia, corrientes de línea y sus voltajes (ángulo y magnitud) de cada Nodo (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014). Para agilizar el cálculo ha sido necesario implementar el método eficiente de Merlín y Black en el algoritmo, obteniendo resultados óptimos, con un numero de iteraciones bajo. La reconfiguración de la red se alcanza con diferentes procesos de cálculo, El algoritmo es ejecutado dentro de un script base interactivo en el cual se ingresan datos de bus y nodos, que contienen las características de conductores, generadores, transformadores, cargas, entre otros, así el script se encarga de analizar las pérdidas y presentar los valores de las variables con valores óptimos.

3.3 Descripción y Funcionalidad del Algoritmo Inteligente.

Una explicación rápida sobre la funcionalidad del algoritmo es que debe encontrar la reconfiguración radial óptima, por ejemplo, las redes de distribución deben ser más flexibles, esto es posible gracias al desarrollo de funciones avanzadas de operación inteligente (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014). El diagrama unifilar abarca la red modelo del estudio, compuesta de 13 Nodos, permitiendo tener una mejor visualización de lo que se plasma en el algoritmo. El modelo es una red de Laboratorio de la plataforma PREDIS, replica de una red de distribución real de Francia, cuyo sistema reconoce la inserción de generación distribuida de la cual es apta para la presente investigación. Se describe a continuación la secuencia de la funcionalidad del Algoritmo:

- Lectura de datos de entrada y salida.
- Calculo de matrices de impedancias y reactancias, jacobianos, etc.
- Corre el flujo de potencia.
- Calculo de pérdidas en el sistema.
- Calculo de corrientes de línea.
- Calculo de voltajes (ángulo y magnitud).
- Numero de iteraciones

El algoritmo interactúa con las características de la red, estas características se muestran en las Tablas 5 y 6. En el script base está compuesto por variables y funciones, encargadas de generar los cálculos matemáticos descritos anteriormente, en otras palabras, es el que ejecuta la función de cálculo en estado estable (flujo de potencia) en términos de producción energética y consumo. Por otra parte, en el script de estudio se encuentran los parámetros de entrada y salida, datos de bus o nodos descritos en el diagrama unifilar de la Figura 17. Para el análisis del caso de estudio se divide en tres (3) sub casos, considerando escenarios diferentes, para interpretar los diferentes resultados, los casos se describen a continuación.

Para el primer caso, denominaremos al Script Caso1 (contiene Caso 1.1, Caso 1.2, Caso 1.3, Caso 1.4). El Caso 1.1 se realiza un estudio de la red (Figura 17) sin GD (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014), y para los demás casos (Caso 1.2, Caso 1.3, Caso 1.4), se realiza con presencia de GD (Figura 18), con diferentes ubicaciones (Tabla 6).

El Caso 2 (contiene Caso 2.1, Caso 2.2, Caso 2.3, Caso 2.4), se modifica el Script del Caso 1, incrementando una técnica con algoritmos inteligentes para regular el cambiador de tomas con carga (OLTCs) y realiza la reconfiguración de red con la inserción de GD.

El Caso 3 (contiene Caso 3.2, Caso 3.3, Caso 3.4), no se considera el Caso 1.1, ya que no cuenta con GD. El Caso 3 se analiza con otra técnica, cuyo algoritmo tiene una función

avanzada para optimizar las pérdidas, encontrando el mínimo dentro de la función de optimización, con el fin de regular los niveles de tensión en el lado secundario de la GD en la red.

Las estrategias usadas en el algoritmo permiten conocer los beneficios que tiene esta herramienta para la reducción de pérdidas, gracias a la integración (inserción) de GD en la red, tomando en cuenta la correcta ubicación de las mismas, encontrando la estructura óptima de operación radial que minimice las pérdidas.

3.4 Estructura del Algoritmo Inteligente.

La estructura del algoritmo se simplifica en un diagrama de bloques, como indica la Figura 18, que constituye la función de ejecutar una serie de cálculos (voltajes, pérdidas, corrientes de línea, etc.) que permitirá conocer el estado de la red (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014). Es decir, el programa ejecuta los valores de entrada y salida de la red a ser analizada, cumpliendo con las restricciones (funciones creadas por el programador) que se establecen dentro de la estructura del algoritmo y por medio de instrucciones devuelve los resultados obtenidos.

El diagrama de bloques, está compuesto por las siguientes instrucciones: Entrada – Algoritmo – Salida. Siendo el algoritmo quien se encarga de leer los datos de entrada para luego modificarlos, creando nuevas instrucciones para ejecutar los cálculos mediante funciones avanzadas. Para esta investigación se consideran los elementos que conforma las redes de las Figuras 16 y 17.

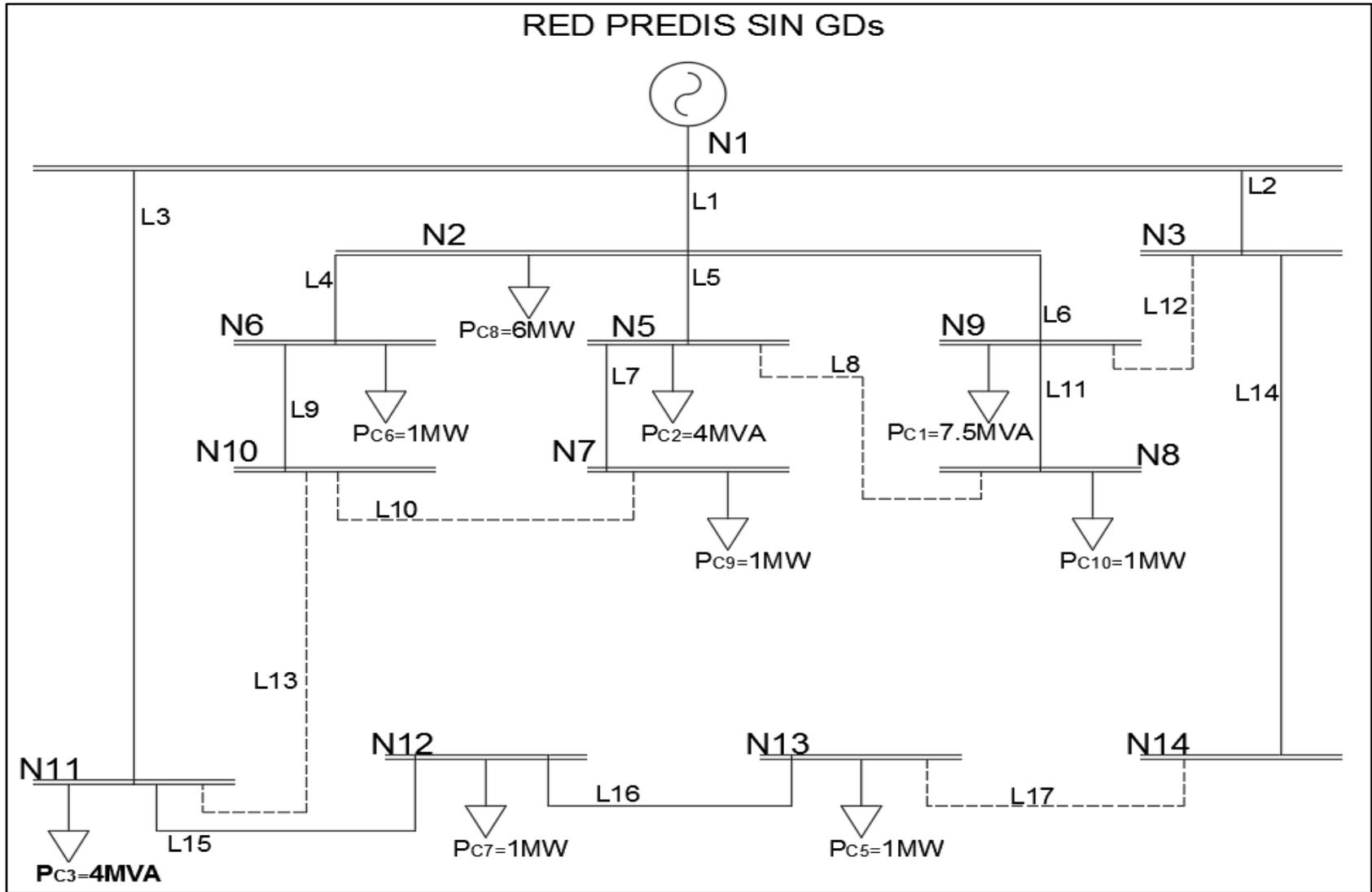


Figura 16. Diagrama Unifilar de la Red de Distribución, Laboratorio PREDIS.
Fuente: Elaboración del autor en base (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014).

Se forma una estructura ligada a cada uno de sus elementos de la Figura 16, la cual se definen en una tabla que parametriza los datos de entrada y salida de forma sencilla, creada para ser usadas en el Script de MATLAB propuesto.

Tabla 5. Características Eléctricas de la Red PREDIS.

Nodo Salida	Nodo Entrada	Descripción	R Ω /Km	X Ω /Km	Longitud Km	Cw	I max (A)	Estado de Línea
N1	N2	Auto-Transformador	0 pu	0,8 pu	0	0 pu	1 pu	No controlado
N1	N3	Auto-Transformador	1 pu	1,6 pu	0	0 pu	1 pu	No controlado
N1	N11	Auto-Transformador	2 pu	1,6 pu	0	0 pu	3 pu	No controlado
N2	N6	Conductor	0,224	0,35	10	0 pu	363	Cerrado
N2	N5	Conductor	0,125	0,108	8	0,003 pu	538	Cerrado
N2	N9	Conductor	0,266	0,117	20	0,001 pu	402	Cerrado
N5	N7	Conductor	0,613	0,35	5	0 pu	195	Cerrado
N5	N8	Conductor	0,613	0,35	4	0 pu	195	Abierto
N6	N10	Conductor	0,224	0,35	1	0 pu	363	Cerrado
N7	N10	Conductor	0,613	0,35	1	0 pu	195	Abierto
N9	N8	Conductor	0,613	0,35	4	0 pu	195	Cerrado
N3	N9	Conductor	0,266	0,117	1	0 pu	1 pu	Abierto
N10	N11	Conductor	0,316	0,128	0,5	0 pu	1 pu	Abierto
N3	N14	Conductor	0,316	0,128	5	0,001 pu	302	Cerrado
N12	N11	Conductor	0,224	0,35	30	0 pu	363	Cerrado
N13	N12	Conductor	0,224	0,35	30	0 pu	363	Cerrado
N13	N14	Conductor	0,224	0,35	10	0 pu	363	Abierto

Fuente: Elaboración del autor en base (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014).

La siguiente tabla muestra las características de la GD, ubicada en diferentes nodos que constituye la red de estudio.

Tabla 6. Características de Carga y Generación de la Red PREDIS.

Nodos	Carga-Red PREDIS	Generación GD
N1		
N2	PL8= 6 MW	
N3		
N5	PL2= 4 MVA	Gen 5 = 1,5 MW
N6	PL6= 1MW	
N7	PL9= 1MW	Gen 2 = 1,5 MW
N8	PL10= 1MW	
N9	PL1= 7,5 MVA	*Gen 4 = 1,5 MW
N10		*Gen 3 = 5,5 MW
N11	PL3= 74 MVA	
N12	PL7= 1 MW	*Gen 3 = 5,5 MW
N13	PL5= 1 MW	*Gen 4 = 5,5 MW
N14		Gen 1 = 13 MW

Fuente: Elaboración del autor en base (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014).

Para Gen3 y Gen4 existe dos posibles nodos de conexión, permitiendo una mejor evaluación al momento de correr el flujo de potencia. La siguiente figura muestra la red PREDIS con la presencia de GD.

Se debe considerar que la estructura del algoritmo posee restricciones técnicas que la red de estudio debe respetar, como son el voltaje (debe estar comprendido entre +/- 5% del valor nominal), el flujo de la corriente en cada línea no debe exceder el máximo corriente admisible del conductor. Estas restricciones son parte fundamental de la estructura que tiene el algoritmo inteligente aplicado a la red de distribución de estudio, que son verificadas posterior al cálculo de flujo de potencia.

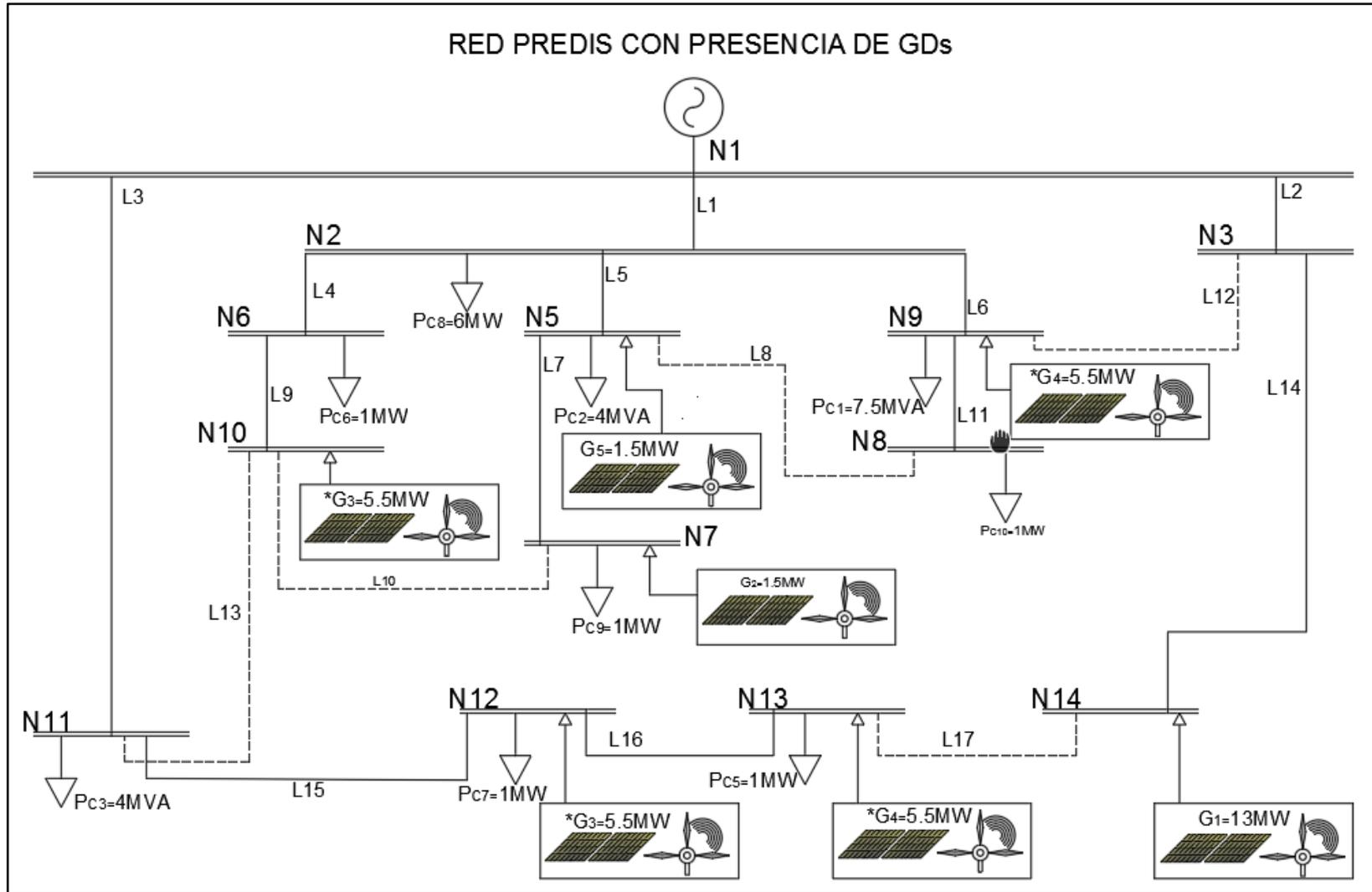


Figura 17. Reconfiguración de la Red Radial con la presencia de GD.
 Fuente Elaboración del autor en base (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014).

3.5 Descripción del Algoritmo Utilizado en la Plataforma De Matlab.

Mediante un diagrama de bloques (Figura 18) se describe el algoritmo general utilizado.

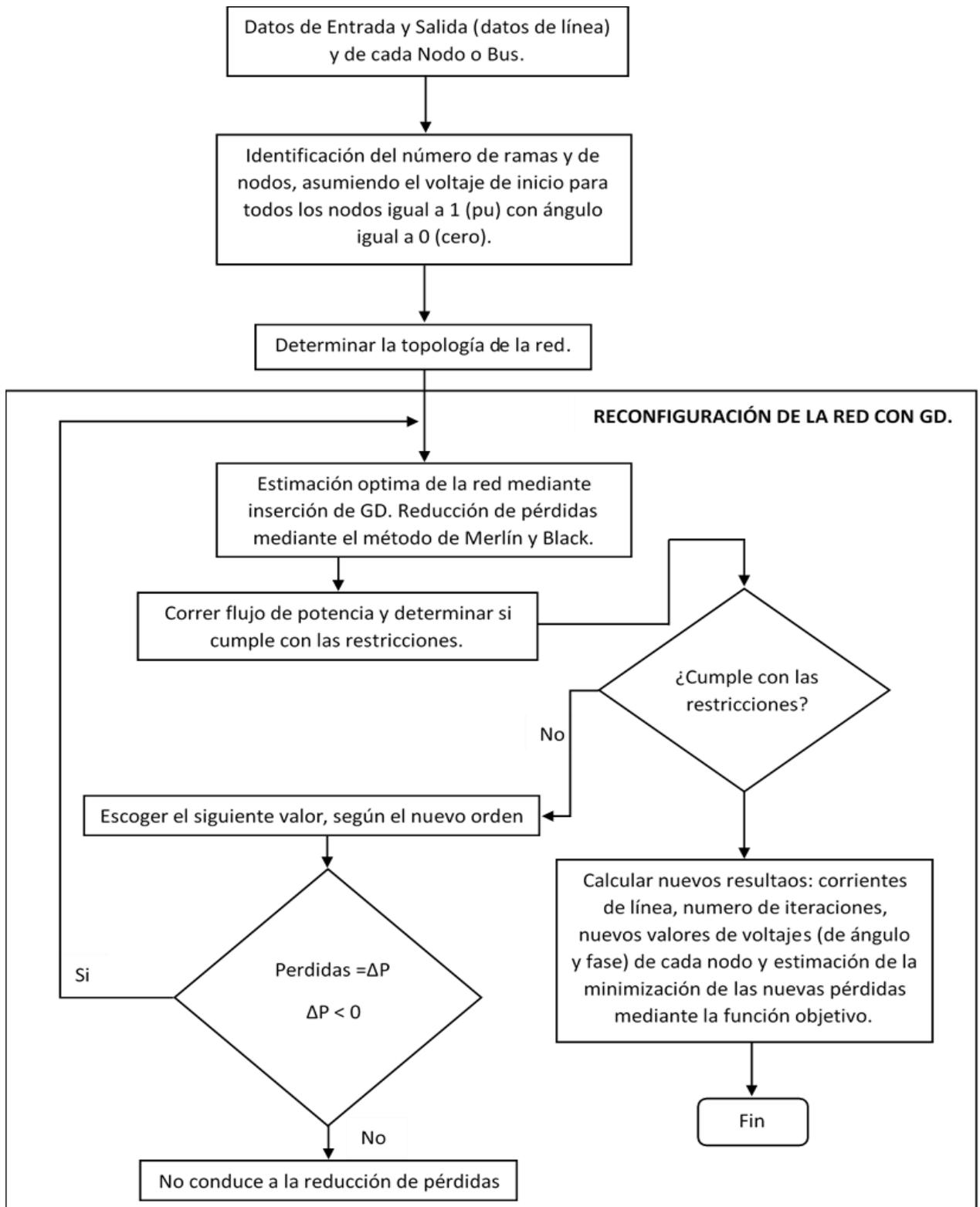


Figura 18. Diagrama de Bloques del Algoritmo en General.

Fuente: Elaboración del autor.

En ésta sección se hace referencia al algoritmo en general, como una herramienta que analiza el flujo de potencia de una red radial, mediante el cual permite conocer valores importantes como; las pérdidas en el sistema, corrientes de línea (pu) para cada Nodo, voltajes de ángulo (grados) y de magnitud (pu), de tal manera que se pueda volver a ejecutar el mismo ejemplo, pero con el uso de técnicas diferentes hasta encontrar el mínimo de pérdidas, usando las funciones avanzadas que componen el algoritmo inteligente.

El algoritmo permite correr el flujo de potencia siguiendo una serie de procedimientos, obteniendo las corrientes de línea (pu) que circula en los diferentes nodos, pérdidas de potencia, voltajes, número de iteraciones, entre otros. El algoritmo usa el método de Merlín y Black, tomando la opción de la apertura de ramas de manera secuencial lo que hace que se obtenga la mayor reducción posible de pérdidas, al mismo tiempo que cumplan con las restricciones indicadas anteriormente.

La opción de reconfiguración de la red con presencia de GD se convierte en una Smart Grid, convirtiéndose en una nueva red, cuya nueva configuración topológica permite realizar nuevos cálculos, consiguiendo una reducción de pérdidas significativas con respecto a la configuración inicial.

La intención del algoritmo es intentar mantener los voltajes dentro de los valores permitidos. Una de las técnicas es el Volt Var Control (VVC), la cual optimiza la potencia reactiva de cada GD presente en la evaluación y análisis de la red de estudio, para controlar el voltaje. Mediante la función `fmincon`, se obtienen valores de potencia reactiva optimizados para la GD, ubicada en los distintos nodos de la red, reduciendo en un mínimo las pérdidas. Para los valores iniciales se setea (declaración inicial específica) cada nodo a 1pu y a 0°.

CAPITULO IV.

4.1 Análisis y Resultados.

Se presentan los resultados de los diferentes casos, datos obtenidos en la plataforma de MATLAB, para el algoritmo expuesto en esta investigación. Las simulaciones son tomadas de la red de distribución PREDIS, ingresando los datos necesarios de manera que el algoritmo pueda realizar el flujo de potencia. Se ha tomado un ejemplo de prueba, modelo practico para el análisis de flujo de potencia, con el fin de validar el algoritmo propuesto y poder comparar resultados (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014).

4.2 Validación del Algoritmo, Caso de Prueba.

Para poder validar el algoritmo, se ha tomado un caso de prueba de 13 Nodos (Distribution Test Feeders, 2017). Con la red de distribución de 13 Nodos, en Simulink se ejecutó el análisis de flujo de potencia. La siguiente figura indica el esquema de la red de prueba IEEE con la que se trabajó para realizar la validación de datos, tomando las mismas características que conforma la red (Figura 19).

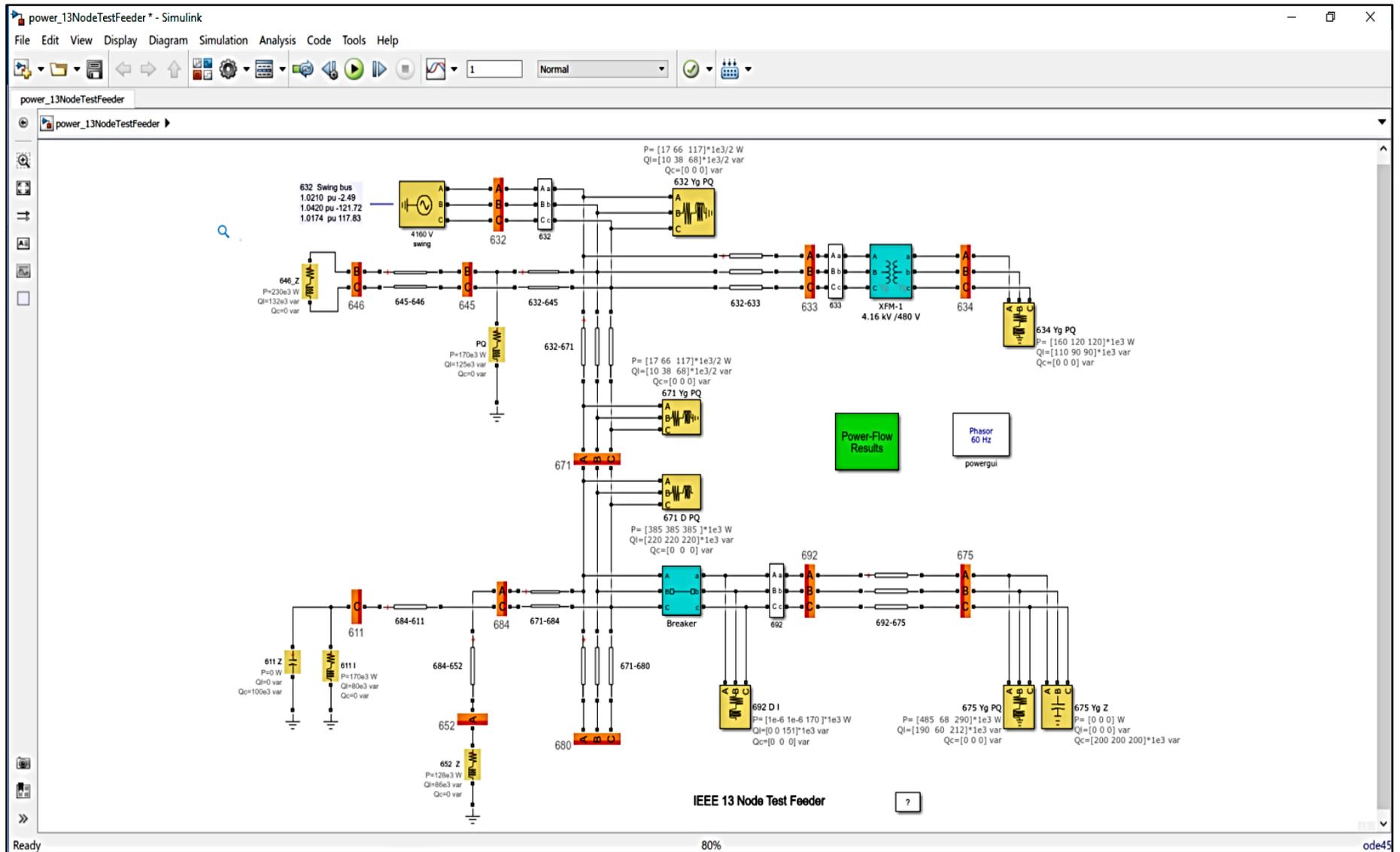


Figura 19. Red de distribución en Simulink, MATLAB (Distribution Test Feeders, 2017).
Fuente: Web: <https://la.mathworks.com/help/physmod/sps/examples/ieee-13-node-test-feeder.html>.

A continuación, se muestra los datos que se trabajó en el archivo de Excel, datos ingresados manualmente al algoritmo. Los datos están parametrizados con fórmulas realizadas en Excel para reducir a valores en por unidad (pu). En la Tabla 7 se especifica las características de la red de prueba 13 Nodos IEEE, para cada línea entre los Nodos de salida y entrada, la resistencia de línea en pu y la reactancia de línea en pu, de igual manera el estado (1=cerrado y 0=abierto). en la que se encuentra la red línea se modelado con la representación π .

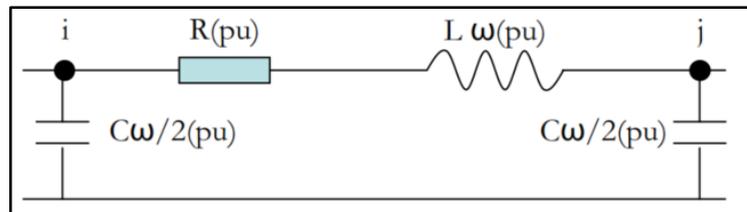


Figura 20. Datos de entrada y salida de línea.
Fuente: (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014).

Tabla 7. Datos de Entrada y Salida de Línea (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014).

Nodo Entrada	Nodo salida	R (pu)	X (pu)	Cw/2	ESTADO
632	645	4,75984E-05	4,34441E-05	0	1
632	633	2,69451E-05	4,22919E-05	0	1
633	634	4,15879E-06	7,56144E-06	0	1
645	646	2,8559E-05	2,34598E-05	0	1
650	632	0,03	0,09	0	1
684	652	7,69041E-05	2,93346E-05	0	1
632	671	4,96207E-05	0,000156399	0	1
671	684	2,8438E-05	2,91433E-05	0	1
671	680	2,48104E-05	7,81993E-05	0	1
671	692	3,78072E-08	0	0	1
684	611	2,85521E-05	2,89462E-05	0	1
692	675	2,85774E-05	1,59786E-05	0	1

Fuente: Elaboración del autor en base (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014).

Tabla 8. Datos de Bus o Nodos.

Nodo	VL inicial pu	θ inicial pu	kW Generada pu	kVAR pu	Carga Consumida	kVAr Consumida	Tipo de Nodo
632	1	0	0	0	0,4	0,232	3
633	1	0	0	0	0	0	3
634	1	0	0	0	0,8	0,58	3
645	1	0	0	0	0,34	0,25	3
646	1	0	0	0	0,46	0,264	3
650	1	0	0	0	0,244	0	1
652	1	0	0	0	0,256	0,172	3
671	1	0	0	0	2,31	1,32	3
675	1	0	0	-1,2	1,686	0,816	3
680	1	0	0	0	0	0	3
684	1	0	0	0	0	0	3
611	1	0	0	-0,2	0,34	0,16	3
692	1	0	0	0	0,34	0,302	3

Fuente: Elaboración del autor en base (Kechagia, Swaminathan, & Morales, 2014).

Las Tablas 7 y 8, son datos de formato para el flujo de carga. Los valores se expresan con las siguientes bases $S_{base} = 5000$ kVA y $U_{base} = 4.16$ kV, reduciendo en pu (por unidad) las características del conductor (R, X e $I_{m\acute{a}x.}$). Se redujeron las características originales (R Ω /km, X Ω /km, Carga Consumida y kVAr Consumidos) a valores en pu en función a sus valores bases. Se indica también que para cada tipo de nodo se tiene; 1 para nodos de voltaje y 3 para nodos PQ.

Tabla 9. Resultados de Pruebas de cada Nodo.

Algoritmo desarrollado aplicado a la red de prueba de 13 Nodos			SIMULINK_13 NODES Test Feeder IEEE	
Nombre de Nodos	VL (pu)	V θ (Grados)	VL (pu)_SIMULINK	V θ (Grados)_SIMULINK
632	0,999013153	-2,894855458	1,021	-2,49
633	0,998972133	-2,948059699	1,042	-121,72
634	0,998381735	-3,862919033	0,9938	-3,24
645	0,998959421	-2,924930566	1,0329	-121,9
646	0,998942227	-2,934435982	1,0312	-121,9
650	1,00	0,00	1,00	0,00
652	0,998363925	-4,755183275	0,9796	-5,48
671	0,998409633	-4,748716334	0,9871	-5,53
675	0,998355078	-4,759188341	0,9806	-5,77
680	0,998409633	-4,748716334	0,9871	-5,53
684	0,998385937	-4,771915991	0,9851	-5,55
611	0,998373175	-4,787347868	0,9741	115,76
692	0,998409564	-4,748592643	0,9871	-5,53
BUS SLACK/BARRA SLACK (Nodo 650)				

Fuente: Elaboración de autor en base (Distribution Test Feeders, 2017).

Tabla 10. Resultados de Pruebas. Máximos y Mínimos.

	Script de Prueba	Simulink
Max. (pu)	1	1,042
Min. (pu)	0,998355078	0,9741
Promedio. (pu)	0,998690432	1,000123077
Pérdidas	0,0051	0,0686248

Fuente: Elaboración de autor en base (Distribution Test Feeders, 2017).

Se aprecia una considerable la variación entre las pérdidas para este caso de prueba de 13 Nodos IEEE. Se ha realizado un promedio entre los valores máximos y mínimos con el fin de conocer si sus valores se encuentran dentro de los valores nominales, como indica la Tabla 10. El algoritmo cuenta con un margen de error menor al 1,5% con respecto al caso de prueba, lo cual hace valido y aplicable el presente modelo.

Tabla 11. Validación de Datos, Análisis de Similitud y Exactitud de Prueba (Distribution Test Feeders, 2017).

Referencia de Nodos	Porcentaje de Similitud.
632	97,85%
633	95,87%
634	100,46%
645	96,71%
646	96,87%
650	100,00%
652	101,92%
671	101,15%
675	101,81%
680	101,15%
684	101,35%
611	102,49%
692	101,15%

Fuente: Elaboración del autor.

Para concluir con la prueba, la siguiente figura muestra la curva de tendencia que tiene el Script con respecto a Simulink. Se ha evaluado el modelo IEEE, Test Feeder 13 Nodos, con dos métodos diferentes que han evaluado el flujo de potencia, mostrado con un ejemplo la eficiencia del algoritmo ejecutado en el Script. Será empleado el algoritmo para convertir una red radial típica a una red radial inteligente.

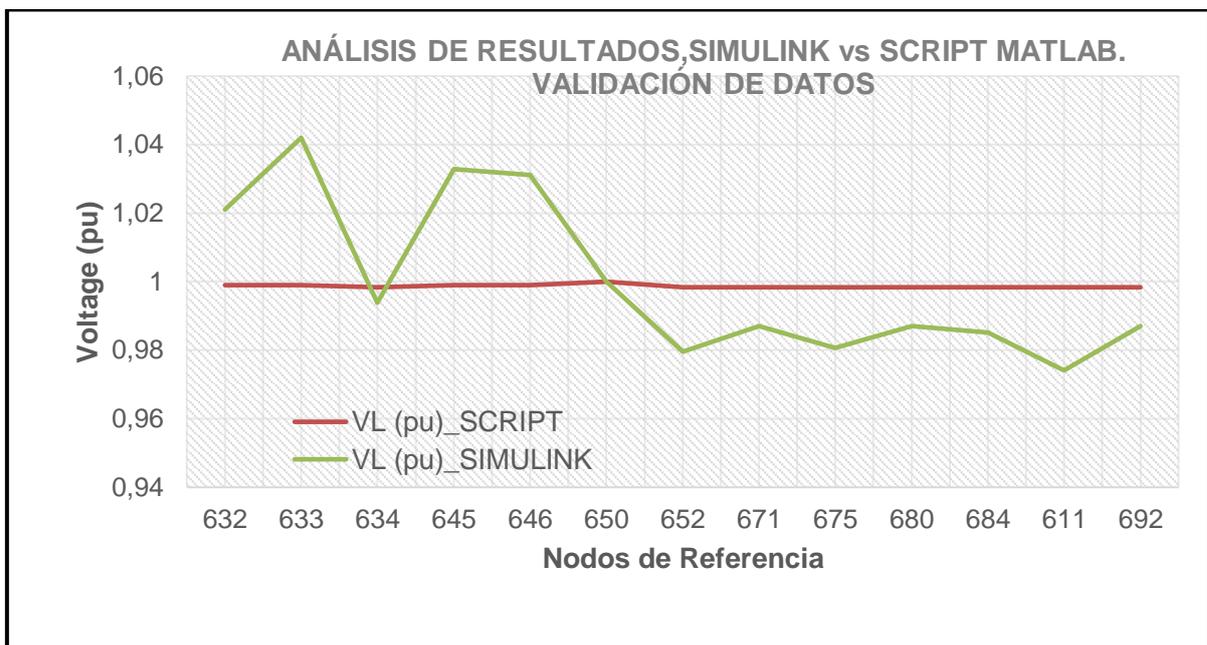


Figura 21. Curva de Niveles de Voltaje, Respecto al Script de Matlab vs Simulink.

Fuente: Elaboración del autor.

4.3 Aplicación del Algoritmo, Caso de Estudio.

Basándonos en los antecedentes de prueba, el presente estudio usará el mismo modelo de algoritmo para ejecutar flujos de potencia óptimos en la red de distribución PREDIS de 13 Nodos. Tal como se indica el diagrama unifilar en la Figura 16 las cargas se encuentran distribuidas a lo largo de la red de distribución radial. Para ingresar los datos y obtener resultados del modelo, se considera el uso de las mismas bases del caso prueba.

4.3.1 Caso 1 de Estudio.

Los datos son trabajados de igual manera en un archivo de Excel, una vez parametrizado los datos son introducidos al algoritmo, almacenando en un Workspace con el nombre de busin.mat para los datos de Bus, para los datos de salida y entrada de línea con el nombre de linein.mat., siendo parte del Caso 1 de estudio, el cual se subdividirá en 4 casos (Caso 1.1, Caso 1.2, caso 1.3, Caso 1.4.). Para ésta primera parte no se considera la GD, con el fin de evaluar el comportamiento de la red. Los datos empleados son reales, como se indicó en las Tablas 5 y 6.

Un breve análisis de los resultados obtenidos para el Caso 1. Para cada Caso tenemos que: Caso 1.1, existentes subtensiones en varios nodos con valores muy por debajo de los nominales, considerando que no tiene este caso la presencia de GD. Para los siguientes casos ha sido necesario considerar la Tabla 6, conectando la GD para mejorar los niveles de voltaje. Para el Caso 1.2 las referencias de la Tabla 6 y la Figura 17 nos han servido para determinar que generadores conectar a la red y en que Nodo, en este caso Gen 2=1.5MW conectado al N7 y Gen 3=2Mw conectado a N12. Si analizamos la Tabla 12, el Caso 1.2 mantiene valores muy similares al Caso 1.1, esto se debe a que la inserción de las GDs es aun marginal y no están conectados a los nodos con problemas de niveles de tensión adecuados.

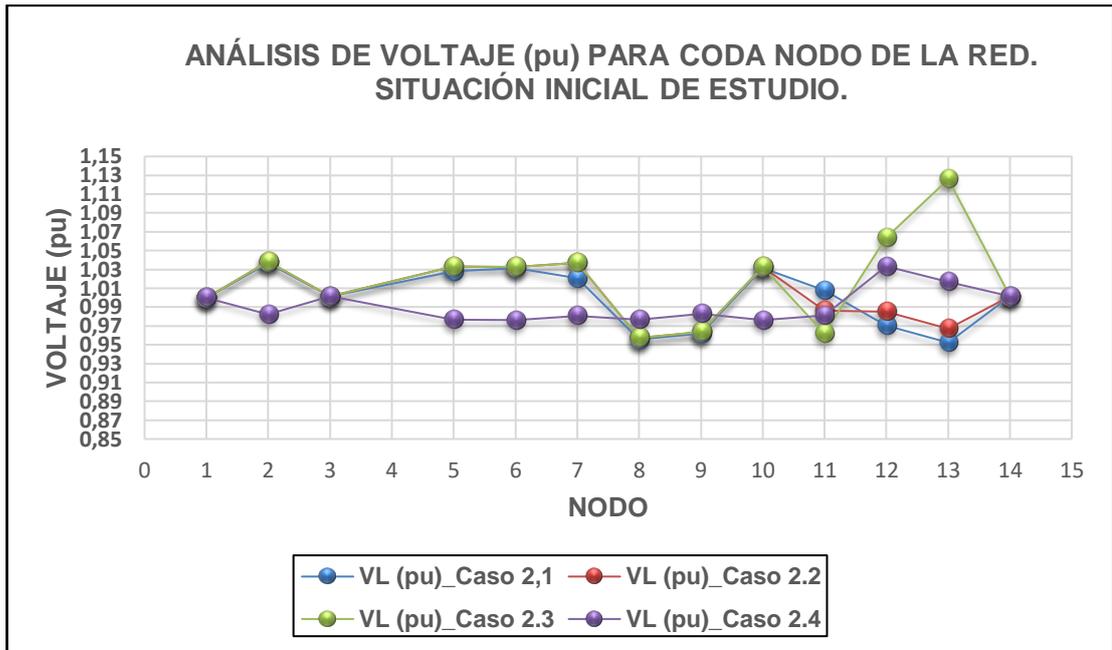


Figura 22. Curva de Niveles. Voltajes (magnitud) en pu con respecto al Script del Caso 1.
Fuente: Elaboración del autor.

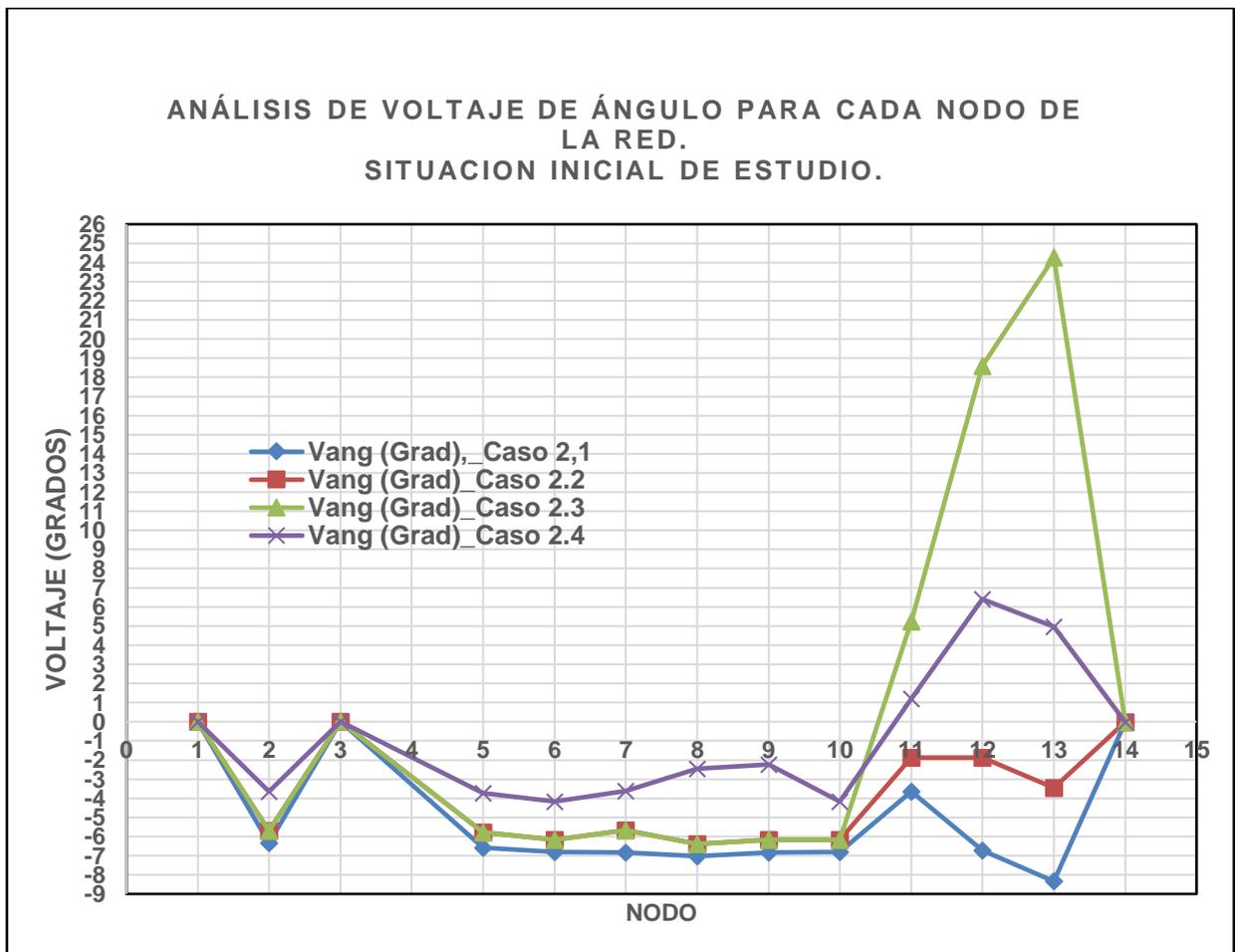


Figura 23. Curva de Niveles. Voltaje de ángulos en pu con respecto al Script del Caso 1.
Fuente: Elaboración del autor.

De igual manera para el Caso 1.3, la GD se conecta a los Nodos N5, N7, N9, N10, N12, N13, N14, proporcionando su máxima potencia para Gen 2, Gen 5 y Gen 4. Para este caso lo que el algoritmo hace es reconfigurar las GDs en la red de distribución. Sus resultados no fueron favorables, con respecto a los casos anteriores (Caso 1.1 y Caso 1.2), debido a la mala ubicación de la GD, creando sobretensiones con valores lejanos a los óptimos, otra razón es que Gen 3 y Gen 4 están muy cerca entre sí con respecto a la conexión en la red. Para el análisis del Caso 1.4 ha sido necesario cambiar la ubicación de Gen 4, con una nueva conexión en N9 (Nodo 9), para este caso, la ubicación de las GDs fueron los correctos, con una correcta inserción de la GD en la red, se obtuvieron valores dentro de los nominales y las pérdidas fueron menores en ésta configuración.

Tabla 12. Evaluación de Resultados para el Caso 1, uso del Algoritmo Inteligente.

	Script Caso 1.1	Script Caso 1.2	Script Caso 1.3	Script Caso 1.4
Max	1,0017	1,0017	1,1082	1,0334
Min.	0,8872	0,8891	0,8891	0,9763
Promedio.	0,9444	0,9454	0,9987	1,0049
Pérdidas	0,0056	0,0045	0,0188	0,0027

Fuente: Elaboración del autor.

El Caso 1.4 es aceptable ya que presenta aproximadamente un -55% de reducción de pérdidas con respecto al Caso 1.1. El Caso 1.2 presenta un -20% con relación al Caso 1.1, esto quiere decir que el Caso 1.4 sus pérdidas son aún muy bajas con respecto a los casos anteriores. Por lo tanto, el Caso 1.4 es una buena configuración para la inserción de GD en la red modelo.

4.3.2 Caso 2 de Estudio.

El uso de las funciones avanzadas para la inserción de Energías Renovables son una de los objetivos que tiene el algoritmo para mejorar el perfil de voltaje. En consecuencia, de los resultados obtenidos en el Caso 1, tuvimos que hacer uso de los OLTCs, para regular los niveles de sus voltajes en la red de distribución. En este caso elegimos los nodos en los que se va a controlar los niveles de voltaje, como indica la Tabla 13 que muestra cuales son los nodos a intervenir.

Tabla 13. Valores de tensión establecidos para los OLTCs.

	Caso 2.1_OLTC	Caso 2.2_OLTC	Caso 2.3_OLTC	Caso 2.4_OLTC
Nodo				
N2	1,02	1,02	1,02	-
N3	-	-	-	-
N11	1,00	-	0,95-1,00	1 - 0,96

Fuente: Elaboración del autor.

Para el Caso 2_OLTC analizamos el caso anterior con el fin de mejorar los niveles de voltaje, llevando a una configuración con voltajes aceptables dentro de los valores óptimos con tensiones dentro de los rangos permitidos. La Tabla 14 indica que los resultados son mejores que el caso anterior (Caso 1).

Tabla 14. Nuevos Valores establecidos con OLTCs.

	Script Caso 2.1 OLTC	Script Caso 2.2 OLTC	Script Caso 2.3 OLTC	Script Caso 2.4 OLTC
Max	1,0369	1,0383	1,1258	1,0334
Min.	0,9523	0,9574	0,9574	0,9763
Promedio.	0,9946	0,9978	1,0416	1,0049
Pérdidas	0,0049	0,0039	0,0178	0,0027

Nota. Valores en pu

Fuente: Elaboración del autor.

La Tabla 14 indica que los resultados son mejores que el caso anterior (Caso 1), presentando niveles de voltajes aceptables en todos los escenarios, y las pérdidas son menores en un 20%. Para el Caso 2.3 la inserción de GD es mayor, con un ajuste de voltaje considerable, mejorando en un 5%, pero aun así la ubicación de GDs en éste caso no es adecuada. Para el Caso 2.4 las condiciones de GD son excelentes, puesto que no requirió de un ajuste con OLTCs, debido a la correcta ubicación de la GD, en general en todos los casos analizados mejora debido al uso de OLTCs.

A continuación, se muestran los resultados mediante unas gráficas el correcto funcionamiento del Algoritmo con OLTCs.

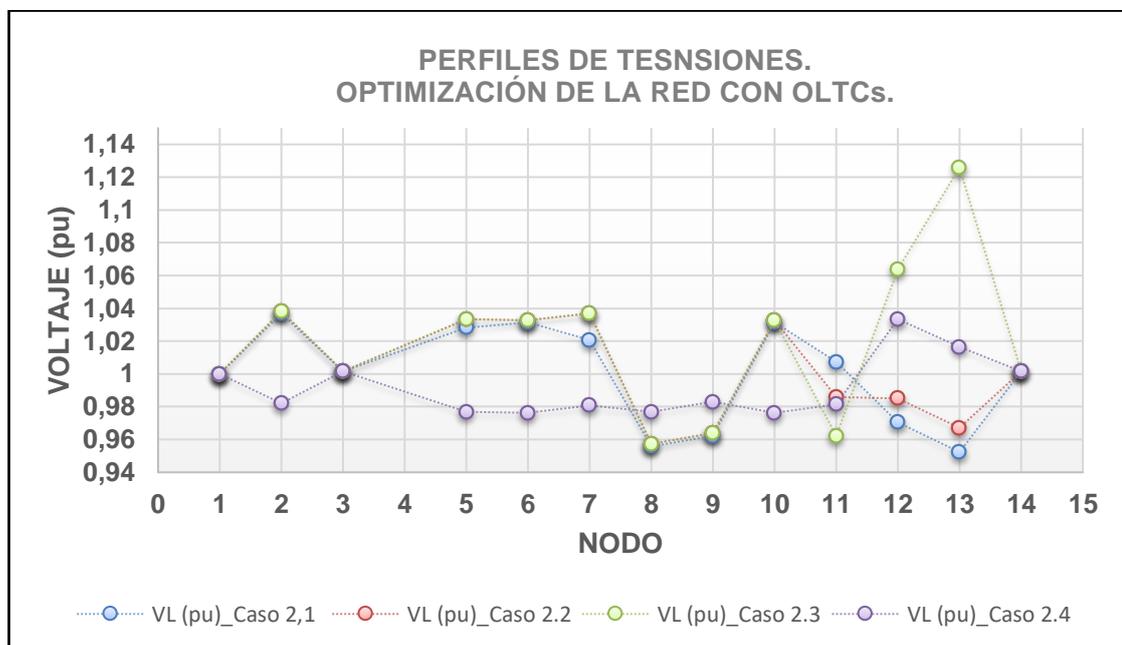


Figura 24. Curva de Niveles. Voltajes (magnitud) en pu con respecto al Script del Caso 2.
Fuente: Elaboración del autor.

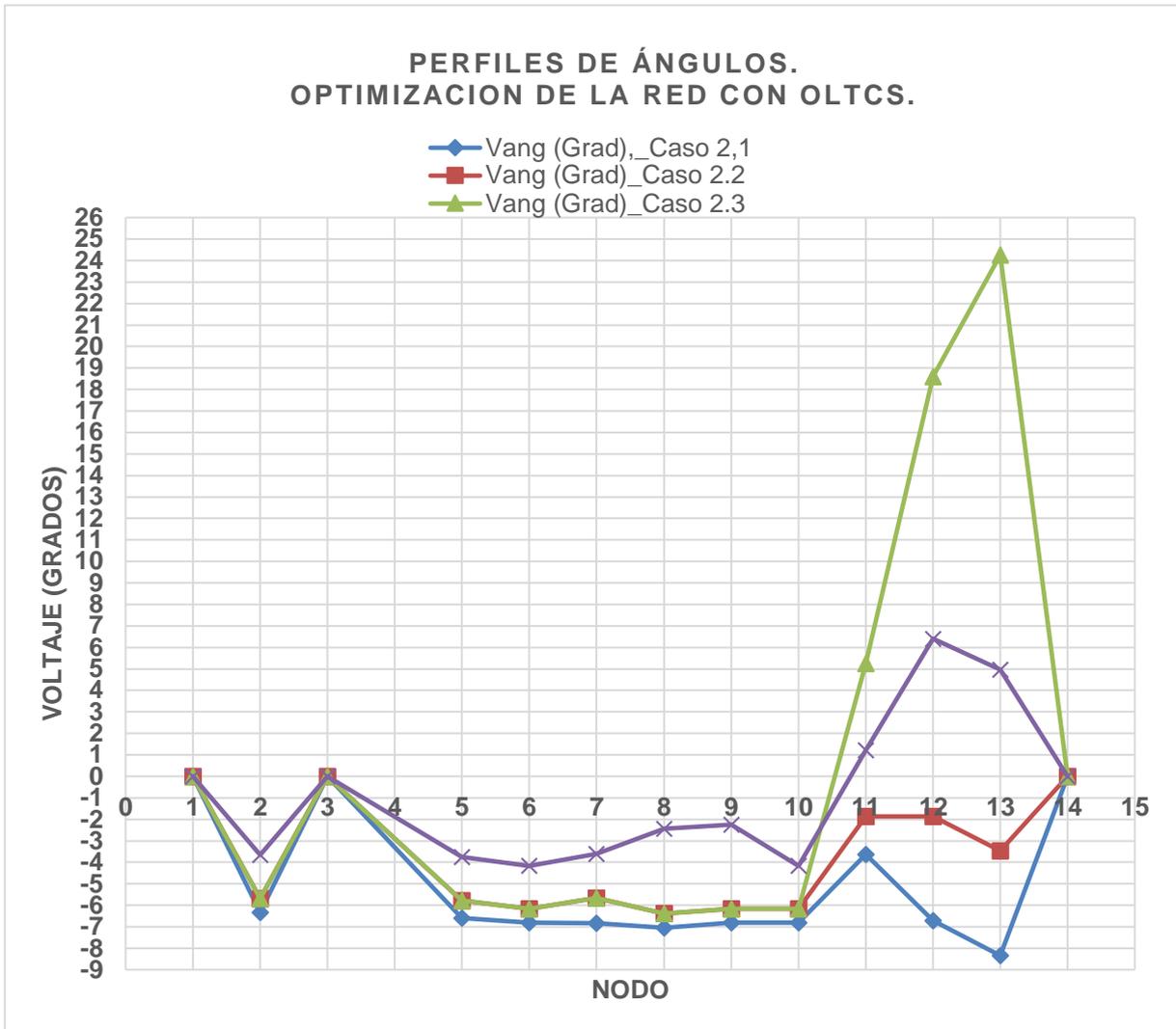


Figura 25. Curva de Niveles. Voltaje de ángulos en pu con respecto al Script del Caso 2.
Fuente: Elaboración del autor.

Concluyendo con el Caso 2, no ha sido necesario el uso de OLTCS para el Caso 2.4, debido a que la GD se encuentra ubicada correctamente en la red de distribución, pero el Caso 2.3 es un buen ejemplo para ver el ajuste de los voltajes usando OLTCS con una mala ubicación de la GD.

4.3.3 Caso 3 de Estudio.

La apertura secuencial de ramas es una técnica avanzada, muy usada en la actualidad para las redes inteligentes. Los niveles de voltaje van mejorando a medida que la red se optimice hasta encontrar la configuración de red más óptima con respecto a la original. La reconfiguración está dada por el método eficiente de Merlín y Black incorporado en el algoritmo desarrollado en MATLAB. Dentro de ésta función se encuentran la técnica Volt Var Control (VVC) para intentar tener los valores dentro de los rangos permitidos, es decir mantener en los niveles nominales dentro del rango de +/-5% (0,095-1,05pu).

Tabla 15. Resultados del Caso 3.1 – 3.4.

	Script Caso 3.2	Script Caso 3.3	Script Caso 3.4
Max	1,0184	1,0146	1,0171
Min.	0,8948	0,8946	0,9749
Promedio.	0,9566	0,9546	0,9960
Pérdidas	0,0046	0,0209	0,0025

Nota. Valores en pu

Fuente: Elaboración del autor.

Como se podrá ver, para el Caso 1 (Caso 3.1) no es posible usar VVC debido a que las redes para ese caso no tienen presencia de GD. Los resultados de esta sección muestran que los casos 3.2 y 3.3 presentan niveles de voltajes de sus fases por debajo de 0,90 pu, sin embargo, las pérdidas han sido optimizadas. La función “fmincon”, es la función de optimización con restricciones que permite determinar la potencia reactiva óptima para la GD conectada a la red de distribución de estudio. Las restricciones vienen dadas por el limite; estableciendo un máximo y un mínimo para inyectar los reactivos a la GD, que se conecta en los diferentes nodos de la red, es decir $lb = -0,35$ (mínimo) y $ub = 0,40$ (máximo), siendo lb y ub los limites.

Para el Caso 3.2 los nodos a intervenir serán Nodo 7 (bus 7) y Nodo 12 (bus 12), siendo que en estos nodos serán inyectados reactivos, de la siguiente manera:

- $lb = -0.35 * [\text{bus}(6,4) \text{ bus}(11,4)];$
- $ub = 0.4 * [\text{bus}(6,4) \text{ bus}(11,4)];$

El Caso 3.3 tiene una configuración diferente, puesto que los nodos a intervenir serán Nodo 7 (bus 7), Nodo 12 (bus 12) y Nodo 13 (bus 13), nodos a los que serán inyectados reactivos, de la siguiente manera:

- $lb = -0.35 * [\text{bus}(6,4) \text{ bus}(11,4) \text{ bus}(12,4)];$
- $ub = 0.4 * [\text{bus}(6,4) \text{ bus}(11,4) \text{ bus}(12,4)];$

El Caso 3.4 tiene la siguiente configuración en sus nodos a intervenir serán Nodo 7 (bus 7), Nodo 9 (bus 9) y Nodo 12 (bus 12), nodos a los que serán inyectados reactivos, de la siguiente manera:

- $lb = -0.35 * [\text{bus}(6,4) \text{ bus}(8,4) \text{ bus}(11,4)];$
- $ub = 0.4 * [\text{bus}(6,4) \text{ bus}(8,4) \text{ bus}(4)];$

Es la forma con la que el algoritmo interactúa las restricciones y ejecuta la función mediante fmincon las restricciones que tiene esta técnica (bus(fila x columna)). La Tabla 16 muestra los datos de los Nodos o de Bus de la red de estudio que se encuentran en las Figuras 16 y 17 (diagramas unifilares de la red PREDIS). Las características de la red se consideran de las Tablas 5 y 6

Tabla 16. Datos de Bus de la red de estudio PREDIS.

Nodo	VL inicial pu	θ inicial pu	kW Generada pu	kVAR pu	Carga Consumida	kVAr Consumida	Tipo de Nodo
1	1	0	0	0	0	0	1
2	1	0	0	0	0,06	0	3
3	1	0	0	0	0	0	3
5	1	0	0,015	0	0,02	0,008	3
6	1	0	0	0	0,01	0	3
7	1	0	0,015	0	0,01	0	1
8	1	0	0	0	0,01	0	3
9	1	0	0,055	0	0,0375	0,015	3
10	1	0	0,055	0	0	0	3
11	1	0	0	0	0,02	0,008	3
12	1	0	0,055	0	0,01	0	3
13	1	0	0,055	0	0,01	0	3
14	1	0	0,13	0	0	0	3

Fuentes: Elaboración del autor en base.

Los resultados se ven reflejados en las siguientes figuras.

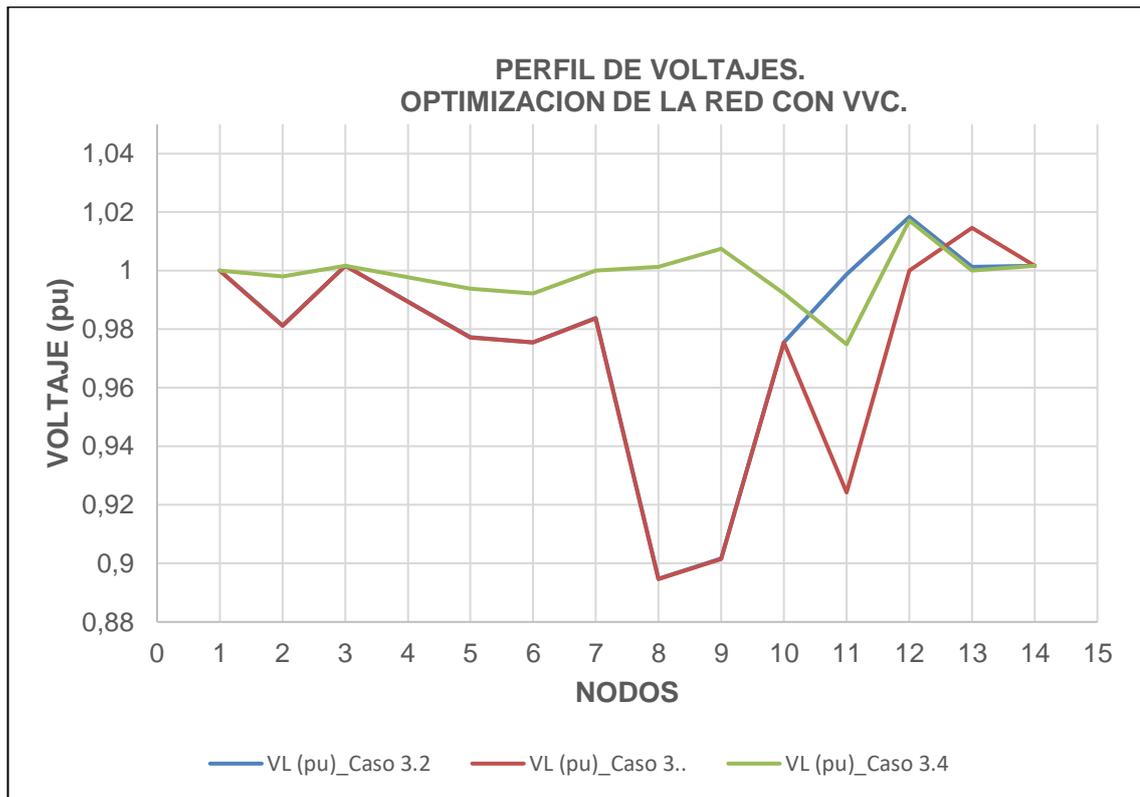


Figura 26. Curva de Niveles. Voltajes (mangitud) en pu con respecto al Script del Caso 3.
Fuente: Elaboración del autor.

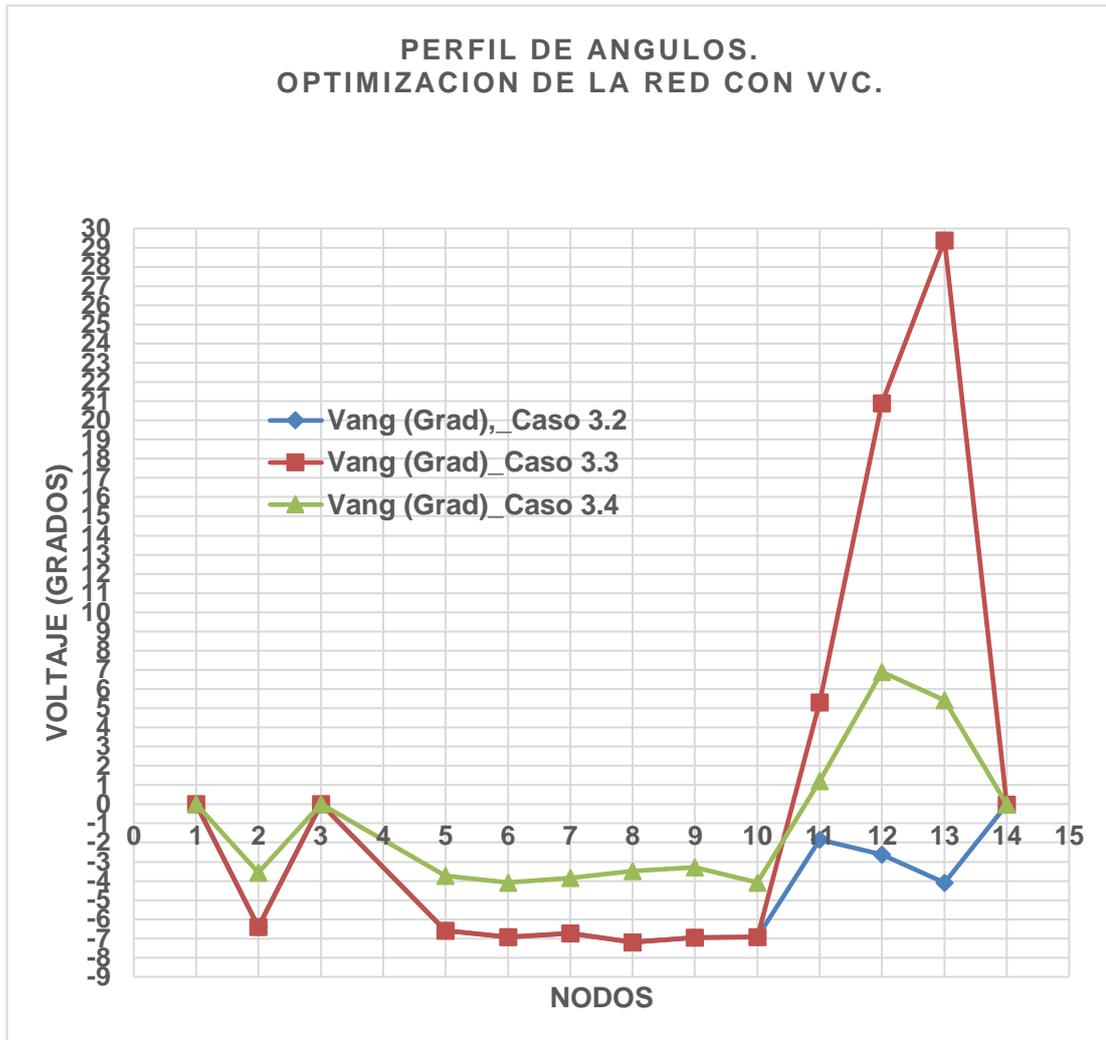


Figura 27. Curva de Niveles. Voltaje de ángulos en pu con respecto al Script del Caso 3.
Fuente: del autor.

En ésta evaluación los resultados son mucho mejores que los anteriores, sin embargo, ha sido necesario que la GD inyecte reactivos a la red de estudio en un rango que limita al algoritmo para optimizar las perdidas, cuando los generadores entregaron potencia reactiva para mejorar tensión los resultados en el análisis de flujo de potencia son aceptables; por ejemplo, los datos de originales del Caso 1.4 se ha reducido hasta en un 9.45% aproximadamente con respecto al Caso 3.4. por lo tanto, se valida que el algoritmo funciona correctamente.

CAPITULO V.

5.1 Conclusiones y Recomendaciones.

5.1.1 Conclusiones.

Del presente trabajo se puede concluir que:

- Las redes de distribución radial alcanzan su estado óptimo mientras son flexibles ya que pueden soportar la inserción de generación distribuida, misma que puede provenir de fuentes renovables o convencionales. Esta vinculación de energía en distintos puntos de la red ayuda a reducir pérdidas técnicas. Esta situación favorece a las empresas de distribución ya que permite que reduzcan sus pérdidas, reduzca la energía comprada a las generadoras y se postergue las inversiones en reforzamiento de redes tanto en distribución como en subtransmisión.
- El algoritmo desarrollado demostró la utilidad para identificar las configuraciones que reduce las pérdidas técnicas en redes de distribución, se comparó una red modelo IEEE de prueba con 13 nodos con una red real; obteniéndose resultados similares en los valores de voltaje de fases, esto valida la viabilidad del algoritmo para el caso de estudio, el margen de error fue menor al 1.5%, que se considera aceptable para su validación del mismo.
- La red de estudio de la plataforma PREDIS cuenta con características de una red inteligente, lo que posibilitó la evaluación de las pérdidas al introducir algoritmos inteligentes en su red de estudio.
- Se demostró en tres casos distintos que la correcta ubicación de GDs es la clave de la reducción de las pérdidas técnicas, puesto que una ubicación inadecuada conlleva a empeorar el perfil de voltaje de la red.
- La evaluación de origen, en el Caso 1.1 sin la GD con respecto al Caso 3.4, cuyo caso se implementó la técnica VVC, resultó mejorar en un 55% los niveles de voltaje de la red de estudio, haciendo una breve comparación entre los casos iniciales con respecto al último caso de estudio.
- Se evalúa la técnica óptima para la reducción de pérdidas, considerando totalmente que es la VVC, ya que mediante su función objetivo con la inyección de reactivos en los terminales secundarios de la GD va cumpliendo con las restricciones de voltaje establecidas. En los Casos 3.3 y 3.4, se pudo constatar que la GD al tener potencia reactiva negativa, permite al algoritmo funcionar correctamente, puesto que los generadores absorbieron la potencia reactiva para controlar los niveles de voltaje, reduciendo en el mínimo sus pérdidas.

- El algoritmo presenta un gran desempeño y es fácil de utilizar, por lo tanto, es necesario únicamente tener conocimiento de la red a optimizar con el fin de obtener los resultados de configuración deseadas.

5.2 Recomendaciones.

- El presente trabajo puede ser usado como punto inicial de una línea de investigación interna de la Facultad de Ingeniería Eléctrica, puesto que emplea una herramienta iterativa. Del mismo modo puede, usarse para modelar las redes de distribución ecuatorianas con el fin de conocer el estado actual de las mismas.
- La línea de investigación de este tema contiene un sistema eléctrico de potencia, que podría ser utilizado para apoyar a la implementación de micro redes, con el fin de incentivar a los consumidores a generar energía eléctrica con el uso de fuentes renovables.

Las evaluaciones de las pérdidas en los sistemas de distribución en el sector ecuatoriano son notorias, por lo que este modelo puede ser aplicado en casos prácticos, uno de ellos es evaluar el impacto del costo parcial y beneficio de la implementación de redes inteligentes como proyecto social

BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Anaut, D., Di Mauro, G., Meschino, G., & J., S. (2009). Optimización de Redes Eléctricas Mediante la Aplicación de Algoritmos Genéticos. *Información Tecnológica*, Vol. 20(4), 137-148.
- [2]. ARCONEL. (2017). *Agencia de Regulación y Control de Electricidad*. Obtenido de www.regulacionelectrica.gob.ec/estadistica-del-sector-electrico/perdidas/
- [3]. ARCONEL. (2017). *Boletín Estadístico, Sector Eléctrico ecuatoriano*.
- [4]. ARCONEL. (2103). Plan Maestro de Electrificación, 2013 al 2022. *Estudio y Gestión de la Demanda Eléctrica*, Vol. 2, 21-55.
- [5]. Augugliaro, A., Dusonchet, L., & Ippolito, M. (2001). An efficient iterative method for load-flow solution in radial distribution networks. *Power Tech Proceedings, IEEE Porto*.
- [6]. Caicedo, N., Lozano, C., & Díaz, J. (2005). Loss Reduction in Distribution Networks using Concurrent Constraint Programming. *IEEE*.
- [7]. CELEC. (14 de Julio de 2016). *Transelectric*. Obtenido de [/www.celec.gob.ec/transelectric/images/stories/baners_home/Plan%20expansion/mapa%20snt%20a%20diciembre%202013.pdf](http://www.celec.gob.ec/transelectric/images/stories/baners_home/Plan%20expansion/mapa%20snt%20a%20diciembre%202013.pdf)
- [8]. Chala, T. (2012). *Pérdidas en Distribución de Energía Eléctrica*. Obtenido de Google: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/1898/2/01%20Perdidas%20en%20distribucion.pdf>
- [9]. Cristian, M. (1989). *Flujo de Potencia Trifásico para Sistemas de Distribución*. Santiago de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [10]. Deeba, S. R. (2016). Evaluation of technical and financial benefits of battery-based energy storage system in distribution networks. Australia.
- [11]. Deeba, S. R. (2015). A tool to estimate maximum arbitrage from battery energy storage by maintaining voltage limits in an LV network. *IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*.
- [12]. Distribution Test Feeders. (19 de Marzo de 2017). *IEEE, PES*. Obtenido de Power & Energy Society: <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/testfeeders.pdf>
- [13]. Enacheanu, B., Raison, B., Caire, R., & Devaux, O. (February 2008). Radial Network Reconfiguration Using Genetic Algorithm Based on the Matroid Theory. *IEEE Transactions on Power Systems*,, 186-195.
- [14]. Fons, M., Casarotto, C., & Moya, M. (2010). Reconfiguración de Sistemas Eléctricos de Distribución para Minimización de Pérdidas. *Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional del Comahue*, 1-7.

- [15]. Ghia, A., & Del Rosso, A. (Diciembre de 2013). Reducción de Pérdidas Sistemas DE Transmisión y Distribución. *Cámara de la Construcción de Argentina*, 7-22.
- [16]. Gómez, J. (2014). La Universidad en la Transformación hacia las Redes Inteligentes. *Revista Científica de la Universidad de Cienfuegos*, pág. 59.
- [17]. Granda, R. P. (1998). *Reducción de Pérdidas Mediante Reconfiguración de la Red de Distribución*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- [18]. Granobles, R. (2000). Desarrollo e implementación en software de un algoritmo para la reconfiguración de redes de distribución de energía eléctrica. *Tesis de Grado de Maestría, Universidad del Valle, Cali*.
- [19]. Inga, A. (2016). Estrategias de Negocio Para Medición Inteligente Acoplando Energías Renovables. *Primer Congreso Internacional y Expo Científica*, (pág. pág. 10). Quito.
- [20]. Intriago A., L., Veloz, H., & Ramirez, C. (2013). Plan Estratégico para la Reducción de Pérdidas Comerciales en EMELMANABI S.A. *EMEL, MANABÍ*.
- [21]. Jiménez, R. (2014). Dimensionando las pérdidas de electricidad. Washington, DC. *Banco Interamericano de Desarrollo*.
- [22]. Kechagia, N., Swaminathan, B. P., & Morales, D. (2014). *SMART GRID AND SUPERVISION*. International Master in Electrical Engineering for Smart Grids and.
- [23]. Kerdphol, T. (2015). ANN based optimized battery energy storage system size and loss analysis for distributed energy storage location in PV-microgrid . *Asia Conference: IEEE ISGT*. Bangkok, Thailand.
- [24]. Khushalani, S., & Schulz, N. (12 de junio de 2014). Unbalanced Distribution Power Flow with Distribution Generation. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition*. IEEE PES.
- [25]. Kieny, C., & Hadjsaid, N. (20-24 juillet 2008). Distribution grid security management with high DG penetration rate: situation in France and some future trends. *PES General Meeting, Panel Session*. Pittsburgh.
- [26]. Lasseter, R. H. (2011). Smart Distribution. *Coupled Microgrids, Proceedings IEEE*, Vol. 99.
- [27]. Loaiza M., D. P. (2016). *Estudio de situación actual de las redes inteligentes en la ciudad de Guayaquil y su aplicación como método de reducción de pérdidas de energía*. Guayaquil: Universidad Católica de Guayaquil.
- [28]. Lobato, E., Rouco, L., & Navarrete, N. (10-13 Sept. 2001). An LP-based optimal power flow for transmission losses and generator reactive margins minimization. *Power Tech Proceedings, IEEE Porto*. Porto: IEEE.
- [29]. Matos, A., & Melo, P. (1999). Multiobjective Reconfiguration for Loss Reduction and Service Restoration Using Simulated Annealing. *Semantic Scholar, INESC Porto*.

- [30]. Nouredine, H., Luong, L., Raphael, C., & Bertrand, R. (2010). 2.1.10 Integrated ICT framework for distribution network whit decentralized energy resources: Prototype, Desing and Development. *Conference IEEE, General Meeting*. Minneapolis: IEEE.
- [31]. Ochoa, L. F., D. T., & Harrison, G. P. (2 de mayo de 2010). DG Impact on Investment Deferral: Network Planning And Security of Supply. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, 1134-1141.
- [32]. Paudyal, S., & Canizares, C. A. (2011). Optimal Operation of Distribution Feeders in Smart Grids. *IEEE TRansactions on Industrial Electrics*, Vol. 58.
- [33]. Samaniego, B. (Junio, 2015). Desarrollo de un algoritmo de interrelación para microredes de distribución eléctrica. *Tesis Previo a la Obtención de Título de Master en Sistemas Eléctricos de Potencia*.
- [34]. Sarina Adhikari. (2013). *Control of Solar Photovoltaic (PhV) Power Generation In Grid-connected and Islanded Microgrids*. Knoxville, Tennessee: Trace: Tennessee Research and Creative Exchange.
- [35]. Thottan, M., & Ji, C. (2003). Deteccion de Anomalias en las Redes IP. *IEEE Transactions on Signal Proceessing*, Vol. 51.
- [36]. Villaruel, M., Carter, S., Gutiérrez, I., Rudnick, H., & Huechapán, J. (2000). MODELACIÓN PARA LA PLANIFICACIÓN OPTIMA DE REDES RADIALES DE DISTRIBUCIÓN. *Departamento de Ingeniería Eléctrica, Unversidad dela Frontera, Chile*.