



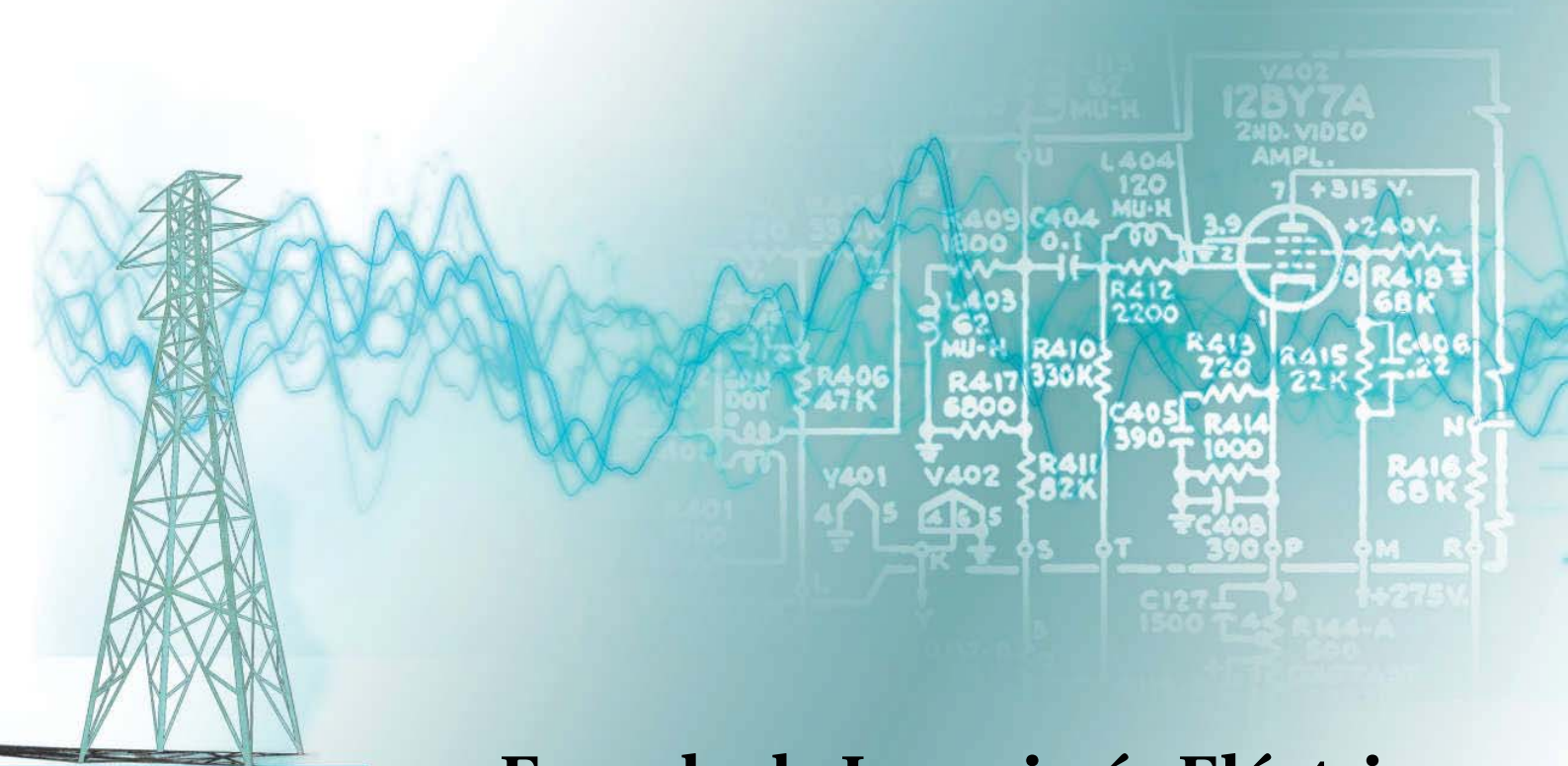
PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Sebastián Andrés Aguirre Bernal

Localización de Reguladores de Tensión en Redes de Distribución Eléctrica considerando Generación Distribuida

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Eléctrico



Escuela de Ingeniería Eléctrica



Localización de Reguladores de Tensión en Redes de Distribución Eléctrica considerando Generación Distribuida

Sebastián Andrés Aguirre Bernal

Informe Final para optar al título de Ingeniero Civil Eléctrico,
aprobada por la comisión de la
Escuela de Ingeniería Eléctrica de la
Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
conformada por

Sr. Jorge Mendoza Baeza
Profesor Guía

Sr. Miguel Lopez González
Segundo Revisor

Sr. Sebastián Fingerhuth M.
Secretario Académico

Valparaíso, 27 de Febrero de 2018

Dedico este trabajo principalmente a mis padres, Mariela y Carlos y a todos los que han formado parte de este largo camino.

Resumen

La distribución eléctrica se puede definir como una rama de lo que corresponde a los sistemas eléctricos de potencia (SEP), en la cual en los últimos años, debido a factores ambientales, políticos, tecnológicos, entre otros, se ha incrementado un método de generación denominado generación distribuida. La generación distribuida (GD), se ubica dentro del sistema de distribución y cuenta con diversas tecnologías de producción de energía. Es por esto que este trabajo se enmarca bajo el desarrollo de un estudio y análisis del comportamiento de los reguladores de tensión, los cuales forman parte del sistema de distribución y se ven afectados por el impacto que causa la GD en los flujos de potencias del sistema.

Se estudia el comportamiento de los reguladores de tensión comerciales, las funciones operativas que poseen y como éstos actúan frente a distintas condiciones de operación del sistema eléctrico. También se presentan los problemas que han presentado los reguladores de tensión frente a los flujos inversos de potencia, y como los investigadores, han realizado estudios que muestran la mejor operación posible frente a estas condiciones.

Posteriormente se presentan las distintas técnicas de optimización, describiendo la terminología y conceptos que se encuentran detrás de cada técnica, posteriormente, se realiza la elección del método a utilizar para el problema de localización e implementarlo en una red real, para lo cual se desarrollan evaluaciones prácticas de localización y en conjunto con softwares de análisis y de programación, se desarrolla un algoritmo que permite elegir la mejor ubicación de estos elementos dentro del sistema eléctrico. Finalmente se presentan los resultados obtenidos de éste análisis, realizando, para comparar los resultados y robustez del algoritmo. Primero un sistema de 17 barras, el segundo sistema de 59 barras. Los resultados obtenidos muestran la ubicación de los reguladores de tensión cuando se encuentra en presencia de generación distribuida, así como también se establece un procedimiento basado en las pérdidas que presenta el sistema, para cada posición, para determinar la ubicación óptima del dispositivo.

Palabras claves: Sistemas de distribución, generación distribuida, métodos de optimización, reguladores de tensión, impacto de la GD, flujos de potencia, localización.

Abstract

The electrical distribution can be defined as a branch of what corresponds to power electrical systems (SEP), in which in recent years, due to environmental, political, technological factors, among others, a generation method has increased called distributed generation. Distributed generation (DG) is located within the distribution system and has various energy production technologies. This is why this work is framed under the development of a study and analysis of the behavior of voltage regulators, which are part of the distribution system and are affected by the impact caused by the DG in the power flows of the system .

The behavior of commercial voltage regulators is studied, as well as the operational functions they have and how they act in response to the different operating conditions of the electrical system. The problems presented by the voltage regulators against the reverse power fluxes are also presented, and like the researchers, they have carried out studies that show the best possible operation against these conditions. Subsequently, and in relation to the above, the different types of energy generation are presented, explained in detail in terms of the technology and operation they have.

Subsequently, the different optimization techniques are presented, describing the terminology and concepts that are behind each technique, which have exemplifications for better understanding, later, the choice of the method to be used for the localization problem is made and implemented in a real network, for which evaluations and practical localization strategies are developed and in conjunction with analysis and programming softwares, an algorithm is developed that allows choosing the best location of these elements within the electrical system. Finally, the results obtained from this analysis are presented, to compare the results and robustness of the algorithm. First a system of 17 bars, the second system of 59. The results obtained show the location of the voltage regulators when it is in the presence of distributed generation, as well as a procedure based on the losses presented by the system, for each position, to determine the optimal location of the device.

Keywords: Distribution systems, distributed generation, optimization methods, voltage regulators, DG impact, power flows, location.

Índice general

Introducción.....	1
Objetivos generales.....	2
Objetivos específicos	2
1 Sistemas Eléctricos de Distribución	4
1.1 Sistema Eléctrico de Potencia.....	4
1.2 Definición y características de los Sistemas de Distribución.....	5
1.3 Requisitos que debe cumplir un sistema de distribución eléctrica.....	7
1.4 Redes de distribución	7
1.4.1 Clasificación de las redes de distribución según su ubicación geográfica	7
1.4.2 Clasificación de las redes de distribución de acuerdo al tipo de cargas.....	8
1.4.3 Clasificación de las redes de distribución eléctrica según la topología de la red	9
1.4.4 Clasificación de las redes de distribución según su tipo de construcción.	10
1.5 Reguladores de tensión	11
1.5.1 Características y funcionamiento	12
1.5.2 Protecciones del regulador	13
2 Generación Distribuida.....	14
2.1 Características y definiciones	14
2.2 Energías Renovables.....	17
2.3 Energías no renovables.....	19
2.4 Beneficios y desventajas de la generación distribuida	19
2.5 Flujos de potencia y pérdidas totales	20
2.6 Marco regulatorio de la GD	22
2.6.1 Decreto Supremo 327.....	22
2.6.2 Decreto Supremo 244.....	23
2.7 Impacto de la GD sobre el sistema de distribución	23
2.8 Interacción de la GD y operación de los reguladores de tensión	24
2.8.1 Modo bidireccional	25
2.8.2 Modo bidireccional reactivo	26
2.8.3 Modo de cogeneración	27

3 Métodos de optimización	29
3.1 Clasificación de los métodos de optimización.....	30
3.2 Algoritmos de optimización.....	30
3.2.1 Técnicas Meta-heurísticas Basadas en Trayectorias.....	33
3.2.2 Técnicas Meta-heurísticas Poblacionales	35
3.3 Estado del Arte: Métodos de Optimización aplicados a la Localizacion de Reguladores de Tensión	37
4 Planteamiento del problema	42
4.1 Función Objetivo y Restricciones.....	42
4.2 Algoritmo Genético.....	45
4.3 Control de Regulador de Tensión ante Generación Distribuida	47
5 Simulaciones y Resultados.....	50
5.1 Introducción.....	50
5.2 Sistema de prueba de diecisiete nodos Civanlar.....	50
5.2.1 Información del sistema	51
5.2.2 Generación Distribuida	52
5.2.3 Localización de un Regulador de Tensión	54
5.2.4 Selección de localización	56
5.2.5 Localización de dos Reguladores de Tensión	58
5.3 Análisis Red Real de 59 Nodos	61
6 Discusión y conclusiones.....	67
Bibliografía	69

Introducción

El sistemas eléctrico de potencia (SEP), es el encargado de que todas las personas tengan la facilidad de tener energía eléctrica en sus hogares, centros de estudios, trabajos, etc, sin embargo, detrás se encuentra un gran número de áreas y actividades que hacen posible este suministro a todos los clientes; dentro de este gran sistema, se distinguen tres áreas las cuales corresponden a tres segmentos identificados claramente por las normativas y leyes que rigen este mercado, las cuales corresponden al segmento de generación eléctrica, el segmento de la transmisión y el segmento de la distribución de energía eléctrica. Este trabajo se enfoca en este último segmento, el de la distribución eléctrica, donde se han desarrollado metodologías y estudios de alta complejidad para llevar a cabo la planificación, diseño e implementación de las redes eléctricas y los respectivos equipos que componen este sistema, con el objetivo de realizar estas actividades lo más eficiente posible a medida que lo van permitiendo las tecnologías desarrolladas.

Sin embargo, el crecimiento sostenido de la actividad industrial, en conjunto con el crecimiento de la población mundial, ha significado un gran aumento en la demanda energética en todo el mundo, que a su vez y de la mano con las distintas tecnologías que se desarrollan en cuanto a la generación de electricidad, cada vez, se encuentra más presente un tipo de generación denominado generación distribuida, en la cual, las empresas o los usuarios pueden generar su propia energía eléctrica y/o aportar con la energía generada al sistema de distribución. La implementación de la generación distribuida a conseguido una descentralización del mercado, debido a que los agentes activos en la generación de energía han aumentado, trayendo distintos beneficios tanto a los usuarios como a la red de distribución.

La generación distribuida ayuda a mejorar los índices de confiabilidad del sistema, así como también es un aporte en cuanto a la mejora del perfil de tensión del sistema y la reducción de pérdidas en las líneas, siempre que se haga el adecuado estudio de diseño e implementación de la unidad generadora. Sin embargo, los recientes incrementos en implementaciones de la generación distribuida han llevado a las empresas de distribución a nuevos desafíos. Tradicionalmente, las redes de distribución han sido diseñadas y se han utilizado para transportar la energía desde el sistema de transmisión hasta los niveles de voltaje más bajos que corresponden a los consumidores. Un generador que suministra electricidad directamente a la red invierte la dirección normal de los flujos de potencia, por lo cual, los distintos equipos que se han implementado en las redes para operar con un flujo de potencia en un sentido, podrían

resultar afectados por esta inversión flujo, produciendo una operación indeseada de los equipos eléctricos instalados en las redes de distribución.

Los reguladores de tensión son un componente fundamental en las redes de distribución, ya que las empresas se ven obligadas a entregar niveles de voltaje dentro de ciertos límites establecidos por los entes reguladores del mercado, ya que de no ser así, se ven expuestas a costosas multas y los clientes se ven afectados por un servicio que no cumple con los requisitos mínimos de calidad de servicio. Además, los costos asociados a la obtención e implementación de los reguladores de tensión no dejan de ser considerables, por lo cual se hace necesario métodos que garanticen la óptima ubicación de estos dispositivos.

En general, los reguladores de tensión son elementos que forman parte del sistema de distribución, el cual su funcionamiento básico es derivado de un autotransformador y tienen el objetivo de entregar una tensión constante en un determinado punto de la red debido a las caídas de tensiones que se producen a lo largo de los alimentadores.

Debido a que la generación distribuida puede aportar tanto en la mejora de los niveles de tensión como también en las reducciones de pérdidas en las líneas, es objetivo de este trabajo estudiar de qué modo afecta al funcionamiento de los reguladores de tensión en los sistemas de distribución, los flujos inversos y las variaciones de tensión que puede provocar este tipo de generación con el objetivo de desarrollar mecanismos de programación que permitan una óptima ubicación de los reguladores de tensión cuando la red de distribución se encuentre en presencia de generación distribuida, manteniendo de esta forma los perfiles de tensión adecuados y las regulaciones de las líneas dentro de los parámetros establecidos.

Para este proceso es necesario establecer métodos que optimicen la localización de los reguladores de tensión dentro de las redes de distribución eléctrica, debiendo realizar un estudio de qué métodos son los más apropiados para el problema de localización. Así como también, es necesario determinar el funcionamiento que tendrá el regulador de tensión para cuando este, se

Objetivos generales

- El objetivo de este proyecto es realizar un estudio de las redes de distribución eléctrica cuando cuentan con generación distribuida y cómo la inyección de potencia por parte de la generación distribuida afecta a la localización de los reguladores de tensión dentro del sistema

Objetivos específicos

- Estudiar el uso y operación de los reguladores de tensión
- Estudiar la inyección de potencia de los generadores distribuidos en las redes eléctricas de distribución

- Desarrollar un modelo de localización de los reguladores de tensión considerando variabilidad de la potencia y de la generación distribuida
- Realizar las evaluaciones necesarias para generar estrategias prácticas de localización

1 Sistemas Eléctricos de Distribución

Este capítulo presenta una descripción completa en cuanto a las definiciones y características que componen un Sistema Eléctrico de Distribución, especificando los elementos más importantes que constituyen éste sistema y haciendo énfasis en los aspectos más relevantes a considerar para éste trabajo de título.

1.1 Sistema Eléctrico de Potencia

El sistema eléctrico de potencia (SEP) es el conjunto de centrales generadoras, líneas de transmisión y sistemas de distribución que en su conjunto operan como un todo. En la operación normal de estos segmentos, las maquinas del sistemas operan de forma constante y la frecuencia en todo el SEP se mantiene inalterable.

El proceso de llevar la energía a los consumidores finales, da partida en el segmento de la generación eléctrica, en la cual se destacan distintos tipos de centrales según la forma de producir esta energía, entre las cuales se encuentran las centrales termoeléctricas, centrales hidroeléctricas, centrales de energía solar, entre otras. Luego esta energía es llevada a través de líneas de transmisión de alta tensión, las cuales serán las encargadas de transportar la energía a grandes distancias a través del país, para esto, la energía es llevada a subestaciones elevadoras, en la cual la tensión debe elevarse a tal punto que nos permita reducir las pérdidas producidas por las grandes distancias por las que se debe transportar la energía. Finalmente es el segmento de distribución el encargado de que la energía que llega desde las centrales generadoras, llegue a los consumidores finales a través de sus redes de distribución.

En la Figura 1-1 se identifican los distintos segmentos y elementos que componen la red eléctrica, incluyendo el segmento en estudio que corresponde al sistema de distribución, éstos se especifican a continuación:

1. Generación eléctrica
2. Transformador Elevador
3. Transmisión eléctrica
4. Subestación reductora
5. Red de distribución
6. Regulador de tensión monofásico

7. Transformador reductor de distribución
8. Consumo

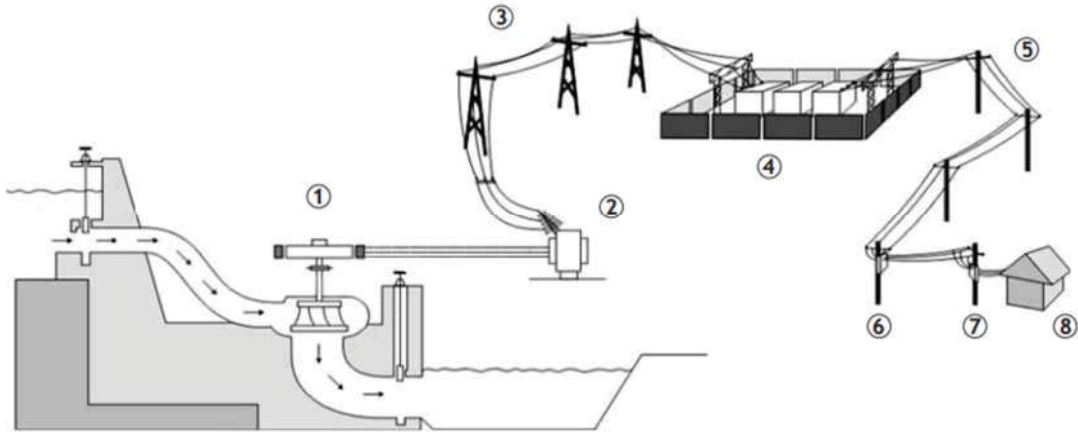


Figura 1-1: Sistema eléctrico y sus segmentos (www.furnas.com.br)

Las inversiones que se deben realizar en el segmento de la generación y distribución eléctrica superan el 80% del total de la inversión que se realiza en todo el SEP. La mayor repercusión económica se encuentra en el sistema de distribución, esto obliga a realizar las inversiones mediante la aplicación de una cuidadosa ingeniería en planificación, diseño, construcción y operación de alta calidad. [1]

1.2 Definición y características de los Sistemas de Distribución.

Según algunos autores, los Sistemas eléctricos de Distribución lo definen como 'la parte de la infraestructura del suministro de energía que toma la electricidad de los circuitos de alta tensión y lo entrega a los clientes'. [2]

En Chile, la Comisión Nacional de Energía (CNE) dice que: *Los sistemas de distribución están constituidos por las líneas, subestaciones y equipos que permiten prestar el servicio de distribuir la electricidad hasta los consumidores finales, localizados en cierta zona geográfica explícitamente limitada. Las empresas de distribución operan bajo un régimen de concesión de servicio público de distribución, con obligación de servicio y con tarifas reguladas para el suministro a clientes regulados.* [3]

En general, los distintos sistemas de distribución se conforman por diversos elementos como redes eléctricas, subestaciones, transformadores de tensión, protecciones eléctricas, entre otros, los cuales modifican características del sistema para que el funcionamiento de éste sea de manera eficiente y segura, cumpliendo con la continuidad del servicio y los rangos de los parámetros que establecen las normativas y leyes que rigen este mercado.

Dentro de los sistemas de distribución, se encuentran ciertas características que hay que considerar al momento del diseño, planificación y modelamiento del sistema, ya que éstas permiten diferenciarlos de los sistemas de generación y transmisión.

1. Topología de la red: Lo define la configuración física de la red, las más usadas corresponden a las redes radiales y las redes enmalladas, estas topologías se muestran en las Figuras 1-5 y Figura 1-6. Las redes radiales son las más utilizadas debido a su bajo costo de implementación, en comparación al sistema enmallado, pero a su vez entrega una menor confiabilidad ya que las cargas dependerán esencialmente de una ruta de alimentación.
2. Razón R/X: Alta relación de Resistencia/Reactancia, no despreciable como en el caso de las líneas de transmisión, en las cuales la longitud de éstas permitía hacer despreciable la resistencia de la línea ya que generalmente es inferior respecto a la reactancia. En los sistemas de distribución, la resistencia es comparable con la reactancia de la línea, por lo que no se puede despreciar.
3. Múltiples conexiones: En los sistemas de distribución las conexiones pueden ser monofásicas, bifásicas y trifásicas, dependiendo de la naturaleza de la carga, por lo cual debe considerarse como un sistema desbalanceado, para así contar con una representación más exacta de lo que sucede en la red.
4. Líneas sin transposiciones: Debido a las grandes tensiones y grandes distancias que recorren las líneas de transmisión, es que a cierta distancia de su recorrido las fases son transpuestas para anular en parte los efectos capacitivos e inductivos que se presentan. Esto no sucede en las líneas de distribución, por lo que no se realizan transposiciones en sus líneas.
5. Cargas distribuidas: Las cargas se encuentran distribuidas a lo largo de todas las líneas que componen la red de distribución, es por esto que se debe tener especial cuidado en las tensiones de operación en cada punto de consumo, así como las condiciones de operación en cuanto a la regulación de tensión, factor de potencia, sobrecargas, etc.

Estas características nos indican cómo se comporta la red de distribución en comparación a los otros sistemas que forman parte del SEP. Es por esto que son de especial consideración al momento de su modelamiento para así no incurrir en errores de cálculo de pérdidas, errores de localización de elementos, entre otros.

Las empresas de distribución, para poder desarrollar la distribución de energía eléctrica, operan bajo un régimen de concesión de servicio público y tienen la obligación de servicio con tarifas reguladas para el suministro a clientes regulados. Éste régimen de concesión se encuentra en el Reglamento de la Ley General de Servicios Eléctricos (Decreto Supremo N°327) el cuál dicta los estatutos para que las empresas de distribución puedan efectuar el suministro de energía eléctrica a los usuarios finales, los cuales pueden ser clientes regulados o clientes libres.

En cuanto a los niveles de tensión, en el segmento de distribución se definen dos niveles, correspondientes al sistema de distribución primario y el sistema de distribución secundario. En el sistema de distribución primario se encuentran tensiones de 12 kV, 13.2 kV, 13.8 kV, 15 kV y 23

kV respectivamente. En cuanto al sistema de distribución secundario, que corresponde al sistema de baja tensión donde se realizan los puntos de conexión con los clientes, posee una tensión de 380 V.

1.3 Requisitos que debe cumplir un sistema de distribución eléctrica

Según el autor José Juárez [1] los distintos sistemas de distribución en general deben cumplir con los mismos parámetros tanto de diseño técnico y operación del sistema como:

1. Aplicación de normas nacionales y/o internacionales.
2. Seguridad para el personal y equipos.
3. Simplicidad en la construcción y operación del sistema (rapidez en las maniobras)
4. Facilidades de alimentación desde el sistema de potencia.
5. Optimización de costos.
6. Flexibilidad y posibilidad de ampliación del sistema.
7. Apta resistencia mecánica para los elementos que componen el sistema.
8. Entrenamiento del personal a cargo.
9. Confiabilidad tanto de los componentes como del sistema.
10. Continuidad del servicio.
11. Información relacionada con la zona del proyecto (ubicación, altitud, vías de acceso).
12. Información relacionada con las condiciones climáticas donde se ubica el sistema (velocidad de viento, precipitaciones, temperatura, contaminación.)
13. Información particular en cuanto a requerimientos técnicos de los clientes, ubicación de cargas especiales e industriales, tasa de crecimiento de las cargas
14. Regulación de tensión (niveles máximos admisibles).
15. Pérdidas de energía.
16. Control de la frecuencia.
17. Óptima localización de los elementos que componen el sistema.

1.4 Redes de distribución

Las redes de distribución son fundamental en el sistema eléctrico de distribución, ya que es por donde el flujo de potencia circula desde las subestaciones reductoras de tensión hasta llegar a los puntos de consumos identificados como cargas. A pesar de que la función de las redes de distribución es siempre la misma, es decir, permitir que la energía llegue a los clientes finales, éstas poseen distintas características que las hacen diferentes entre sí, clasificándose según la zona donde la red de distribución se encuentra suministrando el servicio, por el tipo de carga que el sistema se encuentra alimentando o por la topología de la red.

1.4.1 Clasificación de las redes de distribución según su ubicación geográfica

1. Red de distribución rural: Estos sistemas se encuentran en sectores donde existe poca densidad de carga, por lo que necesita soluciones especiales en cuanto a equipos y tipos de red. Sus principales características son:
 - Usuarios muy dispersos.

- Cargas generalmente monofásicas.
 - Dificultad de accesos en zonas montañosas, lo que implica mayores costos de transporte y manejo de materiales.
 - Se usa postería de concreto y de madera inmunizado.
 - Transformadores monofásicos y bifásicos.
2. Red de distribución urbana: Este tipo de sistema se encarga de alimentar a poblaciones y centros de gran consumo con una alta densidad de cargas. Es de suma importancia la selección adecuada de los elementos del sistema y su dimensionamiento para el sistema. Las principales características de la red de distribución urbana son las siguientes :
- Usuarios muy concentrados.
 - Facilidad de acceso.
 - Cargas monofásicas, bifásicas y trifásicas.
 - En general se usa postería de concreto.
 - Es necesario coordinar el trazado de las redes eléctricas con las redes de telefonía, redes de alcantarillado, etc., además tener en cuenta los parámetros de las edificaciones.
 - Se usan conductores de aluminio, cobre y ACSR.
 - Transformadores generalmente trifásicos

1.4.2 Clasificación de las redes de distribución de acuerdo al tipo de cargas

1. Redes de distribución industrial: Corresponde a los grandes consumidores industriales como lo son las industrias manufactureras de papel, acero, industrias del cobre, etc., que generalmente reciben el suministro eléctrico en alta tensión. Es frecuente que parte de la demanda eléctrica que posee la industria la generen ésta misma. Éste tipo de cargas tienen un componente importante de energía reactiva debido a la gran cantidad de motores instalados y con frecuencia se hace necesario corregir el factor de potencia.
2. Redes de distribución residencial: Comprende al sistema que está encargado de suministrar el servicio a las viviendas de las personas. Estas cargas generalmente son monofásicas y de características resistivas y en una menor grado comportamiento reactivo (electrodomésticos, electrónica, etc.).
3. Redes de distribución comercial: Es un término que se utiliza para sistemas de energía que abastece a grandes edificios, supermercados, escuelas, centros comerciales, etc. Como consecuencia de las exigencias especiales de seguridad tanto de las personas como de los bienes, es que éste tipo de sistema requiere de importantes fuentes de respaldo en casos de emergencia.
4. Redes de distribución para cargas de alumbrado público: Para contribuir a la seguridad ciudadana en las horas nocturnas se instalan redes que alimentan lámparas de mercurio y sodio de características resistiva. [2]

Las siguientes gráficas muestran la cargabilidad en p.u respecto a las horas del día que poseen los distintos tipos de cargas. Se muestran en la Figura 1-2 para carga industrial, Figura 1-3 para carga residencial y Figura 1-4 para carga comercial.

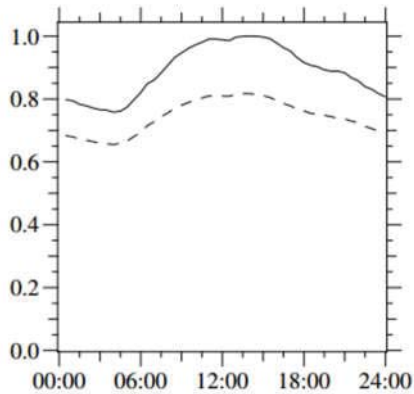


Figura 1-2: Carga para sistema industrial [2]

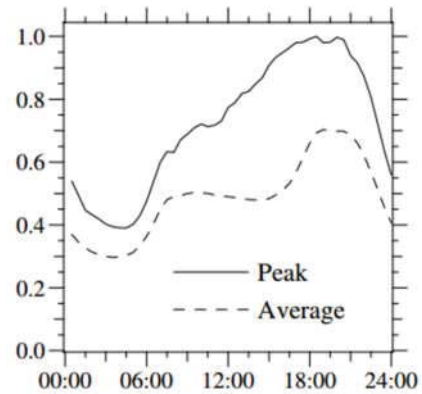


Figura 1-3: Carga para sistema residencial [2]

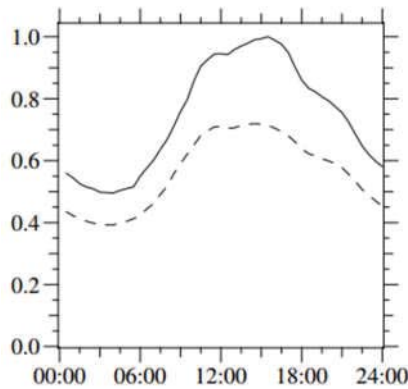


Figura 1-4: Gráfico de carga para sistema comercial [2]

1.4.3 Clasificación de las redes de distribución eléctrica según la topología de la red

1. Red de distribución radial: Corresponde a la configuración física que posee una disposición radial o arborescente, la cual posee un único alimentador de donde se derivan varios alimentadores que cumplen la función de distribuir la energía. Es la topología de red más usada debido a su fácil implementación y planificación. Su principal inconveniente es que al producirse falla en las líneas eléctricas, una gran cantidad de consumidores se ven afectados con el corte de suministro de energía.

2. Red de distribución enmallada: Posee una estructura que se aprecia en la Figura 1-6, esta red de distribución enmallada posee un mayor costo de implementación, pero ante una falla en la cual se deba interrumpir el consumo, serán menos los consumidores que se queden sin suministro en comparación a una red de distribución radial, por lo que posee una mayor confiabilidad que la distribución radial.

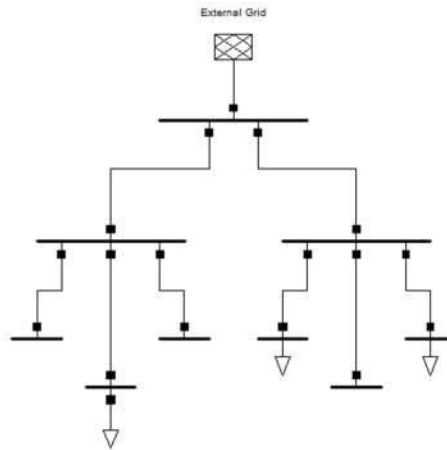


Figura 1-5: Red de distribución radial (Imagen propia)

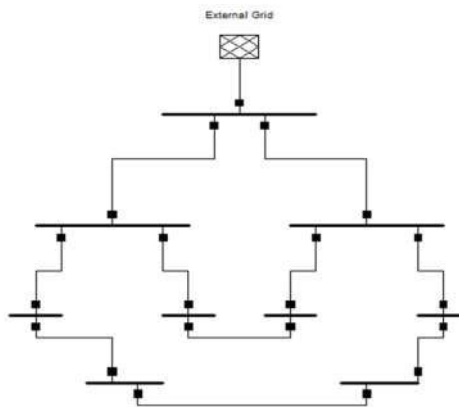


Figura 1-6: Red de distribución enmallada (Imagen propia)

1.4.4 Clasificación de las redes de distribución según su tipo de construcción.

1. Redes de distribución aérea: En esta modalidad, el conductor usualmente está desnudo, va soportado a través de aisladores instalados en crucetas, en postes de maderas o de concreto. Al compararse con un sistema subterráneo tiene las siguientes ventajas:
 - Costo inicial más bajo.
 - Fácil mantenimiento.
 - Fácil localización de fallas.
 - Tiempos de construcción más bajos.

A su vez, posee las siguientes desventajas:

- Mal aspecto estético.
- Menor confiabilidad.
- Menor seguridad (ofrece más peligro a los transeúntes).

- Son susceptibles a fallas y cortes de energía ya que están expuestas a: descargas atmosféricas, lluvia, granizo, polvo, vientos, etc.)
2. Redes de distribución subterránea: Este tipo de redes es utilizada en zonas donde por estética, condiciones de seguridad u otros factores no es aconsejable el sistema de distribución aéreo. Éste tipo de sistemas posee las siguientes ventajas:
- Mucho más confiables ya que la mayoría de las contingencias aéreas no ocurren a nivel subterráneo.
 - Mejor estética, ya que no se encuentran expuestas a la vista.
 - Mayor seguridad para los transeúntes.
 - Menor exposición a vandalismo.

Por otro lado, presenta desventajas como:

- Alto costo de inversión inicial.
- Se dificulta la localización de las fallas.
- El mantenimiento es más complicado y reparaciones más complicadas.
- Expuestas a una mayor humedad y roedores que pueden ocasionar fallas o deterioro de material. [1]

1.5 Reguladores de tensión

Mantener el perfil de tensión dentro de ciertos límites ayuda a las empresas a reducir las pérdidas de energía y mejora la regulación del voltaje. El control del voltaje es una tarea difícil, porque los voltajes están fuertemente influenciados por fluctuaciones de las cargas. Por lo tanto, las compañías eléctricas refuerzan sus sistemas para tener un mejor control sobre las variaciones de voltaje. [4]



Figura 1-7: Imagen real de un regulador de tensión [5]

Un regulador de tensión es básicamente un autotransformador con taps en uno de sus devanados, que permite variar el voltaje entregado, y que puede ser operado bajo carga. El dispositivo común es un regulador monofásico, el cual se puede aplicar a sistemas monofásicos o puede ser conectado junto a otras unidades para formar bancos trifásicos. [6]

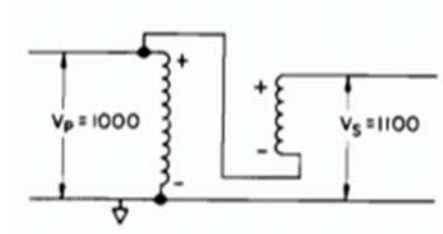


Figura 1-8: Autotransformador elevador [7]

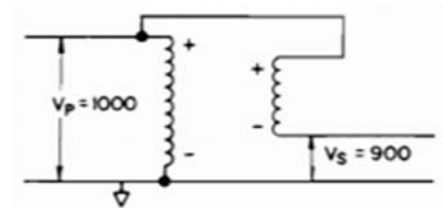


Figura 1-9: Autotransformador reductor [7]

1.5.1 Características y funcionamiento

Los reguladores de voltaje poseen dos devanados, un devanado en derivación y un devanado serie donde se encuentran los taps o steps (pasos). Comúnmente, los reguladores proporcionan un rango de -10% a +10% de variación de tensión con 32 pasos. Cada paso modifica la tensión en un 5/8%. Existen reguladores de tensión monofásicos y reguladores de tensión trifásicos utilizados comúnmente en subestaciones. [2]

El regulador de tensión monofásico posee tres bushings: La fuente (S), la carga (L), y la fuente-carga (SL). El devanado serie se encuentra entre la fuente (S) y la carga (L), La tensión no regulada, generalmente en media tensión, se presenta entre los bushings fuente (S) y fuente-carga (SL) y la regulación de salida entre los bushings carga (L) y fuente-carga (SL). [5]

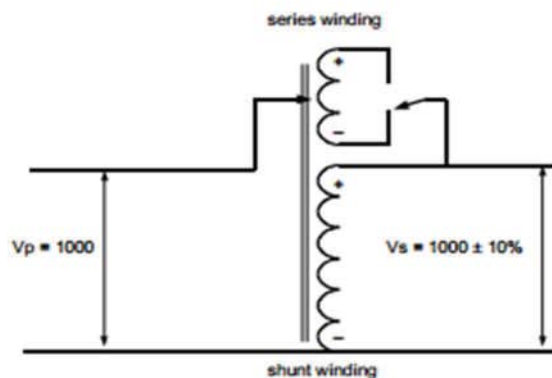


Figura 1-10: Diagrama simplificado conexión de regulador de tensión (www.cooperindustries.com)

Comúnmente, las empresas utilizan reguladores de tensión monofásicos, incluso para regular sistemas trifásicos. Los reguladores se pueden conectar de diferentes formas:

- Conexión Estrella aterrizada: En este tipo de conexión, las tres fases normalmente se encuentran conectado a tres reguladores de tensión monofásicos. La conexión línea-neutro son también apropiadas para circuitos bifásicos y monofásicos. Cada regulador controla de forma independiente el voltaje, lo que ayuda a controlar el desbalance así como el voltaje en estado estacionario.
- Conexión Delta abierto: Solo son necesarios dos reguladores de tensión monofásicos, cada uno conectado fase a fase.
- Conexión Delta cerrado: Tres reguladores monofásicos son conectados fase a fase. Usando esta configuración la regulación se extiende en un 50%, desde $\pm 10\%$ a $\pm 15\%$.

Los reguladores poseen un relé regulador de voltaje que controla el cambio de los taps. Éste relé tiene tres ajustes básicos para controlar el cambio de taps.

- Voltaje de set: Llamado también banda central o set point, el cual corresponde al voltaje que se desea tener a la salida del regulador.
- Ancho de banda: El regulador de voltaje monitorea la diferencia entre el voltaje medido y el voltaje de set. Sólo cuando la diferencia de voltaje excede el ancho de banda, es que el sistema de cambio de tap comienza. Se recomienda utilizar un ancho de banda de al menos dos veces el tamaño del tap. Los ajustes comunes son de 2 V , 2.5 V.
- Tiempo de retraso: Corresponde al tiempo de espera desde que el voltaje medido sale del ancho de banda hasta que el controlador inicia el cambio de tap. El tiempo típico de ajuste es de 30-60 (s). [2]

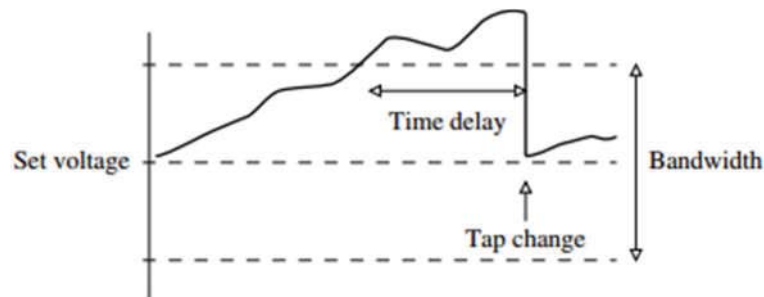


Figura 1-11: Ajustes relé de regulador [2]

1.5.2 Protecciones del regulador

- Descargadores de sobretensión serie: Los reguladores de tensión vienen equipados con un descargador de bypass conectado al devanado en serie, entre los bushings de la fuente (S) y la carga (L). El descargador de bypass limita el sobrevoltaje en el devanado serie que se produce debido a caída de rayos, fallas en las líneas, entre otros.
- Descargadores de sobretensión shunt: El descargador shunt protege el devanado en derivación del regulador de tensión. Éste descargador va conectado directamente entre el bushing de la carga (L) y tierra. Para protección adicional puede conectarse un descargador de derivación entre el bushing de la fuente (S) y tierra. [5]

2 Generación Distribuida

Bajo un constante desarrollo económico y energético, el país, bajo el mando de sus respectivos gobiernos, ha adoptado diversas políticas para un mejor desarrollo del mercado eléctrico, modificando considerablemente la conformación de los sistemas eléctricos de potencia, especialmente el segmento de distribución. Distintas modificaciones a los actuales decretos y leyes que rigen el mercado eléctrico, junto con los distintos avances tecnológicos que se han desarrollado aplicados a la forma de generar electricidad, ha permitido que la generación de energía eléctrica ya no sólo provenga por ejemplo de una gran central hidroeléctrica ubicada a miles de kilómetros desde el lugar de consumo, si no que ha permitido la incorporación de pequeños puntos de generación, los que se distribuyen cerca de los puntos de consumo y los cuales son capaces de satisfacer parte de la demanda, o bien la demanda completa de la red de distribución donde se encuentran. La implementación de nuevos puntos de generación dentro de la red de distribución posee distintas ventajas y desventajas al sistema eléctrico, por lo cual hay que realizar los estudios correspondientes para cada eventual escenario, considerando los efectos sobre la demanda y el sistema en general que provoca la generación distribuida.

2.1 Características y definiciones

La generación distribuida es un concepto relativamente nuevo en la literatura económica sobre los mercados de la electricidad, pero la idea detrás de ella no es nueva en lo absoluto.

En los primeros días de la generación de electricidad, la generación distribuida era una regla, no una excepción. Las primeras plantas de energía solo suministraron electricidad a los clientes del vecindario cercano a la planta de generación. Las primeras redes eran de corriente continua (DC), y por lo tanto, el voltaje de suministro era limitado, al igual que la distancia que podría usarse entre generador y consumidor. El equilibrio entre la demanda y el suministro se realizó parcialmente utilizando almacenamiento local de energía, es decir, baterías, las cuales podían acoplarse directamente a la red de continua. Junto con la generación a pequeña escala (GD), el almacenamiento local de energía también está regresando a escena. [8]

Si bien la literatura no define exactamente el término generación distribuida, por ejemplo, los países Anglo-Americanos usan el término de 'generación embebida', los países de América del Norte lo llaman "generación dispersa" y en Europa y partes de Asia lo denominan 'generación descentralizada', existen diferentes definiciones en cuanto a la clasificación de este tipo de generación. [9]

CIGRE (Council on Large Electric System), define la generación distribuida como todas las unidades de generación con una capacidad máxima de 50 MW a 100 MW, que normalmente se encuentran conectadas a la red de distribución y que no son planificadas ni despachadas centralmente. Claramente, esta última parte de la definición implica que las unidades de generación distribuida están fuera del control del operador de la red de transmisión, por lo que las unidades de generación construidas por el operador de la red de transmisión como una expansión de la red, no son consideradas como generación distribuida según la filosofía de la CIGRE. [8]

La IEEE define la generación distribuida como la generación de electricidad por instalaciones que son suficientemente más pequeñas que las centrales de generación que permiten la interconexión en prácticamente cualquier punto de un sistema de energía. [8]

Así también la IEA (International Energy Agency), la generación distribuida la define como las unidades que producen energía en el lado de los clientes o dentro de las empresas de distribución y que suministran directamente energía a la distribución local. Sin embargo, la AIE no hace referencia al nivel de capacidad de generación en comparación con las demás definiciones. [8]

Como se puede apreciar, existen variadas definiciones en cuanto a lo que significa el término de "generación distribuida". Realizando un análisis a [10], se desprende que hay ciertos parámetros que pueden ser discutidos para definir la generación distribuida más precisamente, los cuales son definidos por los autores y corresponden a:

- Localización: La definición más apropiada según el estudio es que 'la localización de la generación distribuida se define como la instalación y operación de unidades de generación de energía eléctrica conectadas directamente a la red de distribución o conectada a la red en el sitio del cliente'.
- Propósito: El propósito de la GD es proveer de una fuente de potencia activa para los clientes. De acuerdo a esta definición, la GD no necesita proporcionar potencia reactiva.
- Niveles de tensión: Para éste parámetro se concluye que los niveles de tensión no son relevantes para la definición de la generación distribuida, esto debido a que la capacidad de los niveles de tensión que se puedan conectar en el sistema de distribución, dependerán exclusivamente del sistema de distribución en cuestión, determinado por sus características técnicas y de diseño que el sistema posea.
- Área de suministro de potencia: Algunos autores también definen el área de suministro de potencia, por ejemplo, el área de suministro de la GD es la red de distribución. El área de suministro de potencia tampoco es considerado relevante al momento de definir a la GD, ya que en algunas ocasiones, en momentos de baja demanda, la GD puede exportar

energía a los sistema de transmisión, por lo que un área de suministro restringido descalificaría a la GD en un eventual escenario como éste.

- **Tecnología:** Muchas veces el término generación distribuida va relacionado con una cierta categoría de generación, por ejemplo, tecnologías de energías renovables. Sin embargo, las tecnologías a utilizar en la GD no es limitada. Por lo que la tecnología utilizada no es relevante para la definición de GD. En la práctica, son muchas las tecnologías disponibles para la generación distribuida, éstas se muestran en la Tabla 2-1, donde se identifica la tecnología utilizada y su capacidad típica de generación.
- **Impacto ambiental:** En reiteradas ocasiones, la generación distribuida se dice ser más amigable con el ambiente en comparación a la generación centralizada. De acorde a la definición del estudio, el impacto ambiental no define a la GD, esto porque analizar los impactos ambientales que conllevan este tipo de generación es complicado, por lo que no se incluye dentro de las características de la GD.
- **Propiedad:** Para los autores, la propiedad de la GD no es un aspecto relevante, por lo cual, los propietarios de la GD pueden ser empresas en general como también los mismos consumidores.
- **Penetración de la GD:** El nivel de penetración de GD instantánea máxima en una red eléctrica se define como :

$$Penetracion\ GD\ (\%) = \frac{P_{GD}}{P_T} * 100 \quad (2-1)$$

Donde

P_{GD} : Potencia instalada de GD en [W]

P_T : Potencia total de la red en [W]

Tabla 2-1: Tecnologías utilizadas en generación distribuida [10]

Tecnología utilizada	Tamaño típico por módulo
Ciclo combinado	35-400MW
Motores de combustión interna	5kW-10MW
Turbina a gas	1-250MW
Micro-Turbinas	35kW-1MW
Pequeña Hidro	1-100MW
Turbina eólica	200W-3MW
Fotovoltaico	20W-100kW
Térmico Solar	1-10MW
Biomasa	100kW-20MW
Geotérmica	5-100MW
Energía oceánica	100kW-1M
Stirling motor	2-10kW
Almacenamiento Baterías	500kW-5MW

2.2 Energías Renovables

- **Mini centrales hidroeléctricas:** Las mini centrales hidroeléctricas operan bajo el concepto de transformar la energía cinética del agua, en energía eléctrica. La generación hidroeléctrica es una de las principales fuentes de energía en Chile. Nuestra geografía favorece el uso de éste recurso, principalmente en el sur de nuestro país. Su desarrollo en Chile se inició en 1897 con la puesta en servicio de la mini central hidráulica Chivilingo. [11]

La clasificación usual de las centrales hidroeléctricas según su tamaño, empleada originalmente en Francia y que se ha hecho extensiva a Europa, y la usada por la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) es la siguiente:

Tabla 2-2: Clasificación de centrales hidráulicas [11]

Tipo de central	Clasificación europea	Clasificación OLADE
Micro central	Menor que 100 kW	Menor que 50 kW
Mini central	Entre 100 y 1000 kW	Entre 50 y 500 kW
Pequeñas centrales	Entre 1000 y 10000 kW	Entre 500 y 5000 kW

En Chile, la legislación eléctrica define como Medios de Generación No Convencionales, a centrales hidráulicas que posean una potencia inferior a 20.000 kW. [12]

- **Generación Eólica:** La energía eólica se produce a través de los movimientos de las masas de aire, es decir el viento, lo cual es provocado por las diferencias de temperaturas en las distintas zonas geográficas. La característica más importante en cuando a la energía eólica, es la variabilidad del viento, lo que determina las zonas específicas donde se pueden ubicar estos generadores. En la Tabla 2-3 se muestra la evolución de los generadores eólicos, se aprecia que actualmente existen generadores de hasta 5 MW de potencia, con alturas que alcanzan los 120 metros.

Tabla 2-3: Evolución en tamaño y potencia de los generadores eólicos [11]

Año	1980	1990	1995	2000	2004
Diametro rotor (m)	15	40	50	80	124
Potencia (kW)	50	500	600	2000	5400

- **Generación Fotovoltaica:** Las celdas fotovoltaicas o modulo fotovoltaicos, son las encargadas de generar la energía eléctrica, la cual es producida con la recepción de la luz solar y a través del efecto fotoeléctrico, se produce el desplazamiento de las cargas en su interior, entregando en su salida corriente continua.
- **Generación Térmica:** La energía eléctrica se produce mediante la conversión de la energía del sol en calor de alta temperatura el cual se obtiene mediante la concentración de los rayos solares sobre un fluido, usando espejos o lentes. El calor es transferido a una turbina o motor para la generación eléctrica.
- **Biomasa:** Comprende el conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural de la misma. Cualquier tipo de biomasa es proveniente del proceso de fotosíntesis vegetal que sintetiza materia orgánica a través del CO₂ del aire y otras sustancias. En este proceso, la energía solar se transforma en energía química, la cual es almacenada en distintos compuestos orgánicos, esto puede ser transformado por el hombre en energía eléctrica. La biomasa fue una de las

principales fuentes de energía para el hombre antes de la revolución industrial, se usaba para calentar los hogares, cocinar, producir cerámica, etc.

- Geotérmica: Se entiende por generación geotérmica, al aprovechamiento del calor existente en los subsuelos producidos por ejemplos, por las erupciones volcánicas. En Chile la actividad geotérmica se rige por la Ley N° 19657, en donde la energía geotérmica se define diciendo 'Se entenderá por energía geotérmica aquella que se obtenga del calor natural de la tierra, que puede ser extraída del vapor, agua, gases, excluidos los hidrocarburos, o a través de fluidos inyectados artificialmente para este fin'.
- Energía oceánica: La energía oceánica es aquella que aprovecha el movimiento de los océanos, producidos ya sea por el movimiento de las olas o las corrientes marinas, lo cual genera un gran potencial que es aprovechado para mover las turbinas generadoras de electricidad. [11]

2.3 Energías no renovables

- Micro-turbinas: Tecnología derivada de los turbocompresores, las micro-turbinas son turbinas de combustión interna, usando ya sea gas natural, hidrogeno, diésel o propano. Su principal característica es su alta velocidad de giro.
- Turbina a gas: Las turbinas a gas o turbinas de combustión interna funcionan en etapas, las cuales logran quemar el combustible, obteniendo gas a alta presión, lo que permite que gire la turbina a altas velocidades. Utilizan como combustible el gas natural o el petróleo y su eficiencia a plena carga está entre el rango del 20 al 40%
- Motores de combustión interna: Basan su funcionamiento, como su nombre lo dice, en la combustión de una mezcla comprimida entre aire y combustible, lo cual genera un trabajo mecánico lo que posteriormente, puede transformarse en energía eléctrica. Son un tipo de generación distribuida común y se utiliza principalmente como sistema de respaldo ante eventuales cortes del suministro eléctrico.
- Ciclo combinado: La generación de ciclo combinado es aquella donde se genera electricidad mediante dos tipos de turbinas, una turbina de gas y una turbina de vapor, por lo que para la generación de energía eléctrica se superponen dos ciclos. El primer ciclo toma aire directamente de la atmósfera, el cual es combustionado con el gas, generando gas a alta temperatura y trabajo en las turbinas del primer ciclo. El calor del gas a la salida de los compresores es aprovechado para calentar agua y generar vapor, el cual se hace pasar por la segunda turbina, de manera que ambos generan energía eléctrica.

2.4 Beneficios y desventajas de la generación distribuida

El interés de incorporar la generación distribuida a los sistemas eléctricos de distribución viene dado por los distintos beneficios que trae consigo este tipo de generación. En [8] atribuye este renovado interés por la generación distribuida principalmente por dos razones, la primera corresponde a una la liberación del mercado eléctrico, y por otra parte las preocupaciones medioambientales existentes. Ésta forma de generar energía lo ha permitido principalmente el creciente desarrollo tecnológico en los procesos de generación y las políticas de estado, que se

han encargado de regular el sector tanto para las empresas, como para los medios de generación distribuida. Sin embargo, una mal dimensionamiento o localización de generación distribuida puede ser perjudicial para el sistema de distribución.

La mayoría de los beneficios atribuidos a la implementación de generación distribuida en la redes de distribución, tienen tanto connotación técnica y económica, estando interrelacionadas entre sí. A continuación se especifican los principales beneficios asociados a la GD. [13]

Principales beneficios:

- Reduce las pérdidas de energía en las líneas de distribución
- Mejora el perfil de tensión del sistema
- Otorga una mayor seguridad para cargas críticas
- Aumento de los índices de confiabilidad del sistema
- Aumenta la eficiencia energética
- Mejora la calidad de suministro
- Alivia la congestión en transmisión y distribución
- Mayor competitividad y descentralización del mercado eléctrico, permitiendo la inserción de pequeñas y medianas empresas de generación
- Se retrasa las eventuales inversiones en transmisión y distribución.

Principales desventajas:

- Flujos de potencias bidireccionales en el sistema, lo que podría ocasionar el accionamiento de protecciones que no debiesen operar.
- Se debe rediseñar la coordinación y las protecciones a usar en el sistema
- Un mal funcionamiento o diseño de la GD puede provocar alzas de tensiones en el sistema
- Puede provocar un funcionamiento en modo isla indeseado.

2.5 Flujos de potencia y pérdidas totales

En las redes de distribución, los flujos de potencia activa y reactiva fluyen generalmente desde los niveles de mayor tensión hacia los de menor tensión. Pero, producto de la implementación de la GD, los flujos de potencia pueden invertirse y la red pasa de ser un sistema pasivo (alimentado por carga) a un sistema activo en donde los niveles de tensión y la dirección del flujo son determinados por la generación y la carga [14].

A continuación se presenta cada caso en los cuales el flujo de potencia se ve alterado producto de la generación distribuida. [15]

I. La GD suministra una potencia igual o inferior a la demanda de la barra

En esta situación la GD solo supe la demanda de energía de la barra a la cual está conectada, de modo que esto solo tendría un impacto sobre la magnitud de los flujos aguas arriba y no sobre su dirección, manteniéndose igual que si la GD fuera cero. En la

Figura 2-1 se muestra un diagrama unilineal que describe esta situación antes mencionada.

Con respecto a las pérdidas, debido a la disminución general de la magnitud del flujo de potencia aguas arriba en donde se encuentra conectada la GD, las pérdidas totales del sistema se verán disminuidas, sin embargo, estas se verán afectada en proporción a la demanda que la GD deje aguas arriba con respecto a la demanda que se encuentre aguas abajo, de su penetración, de la localización de la unidad generadora así como también del tipo de conductores.

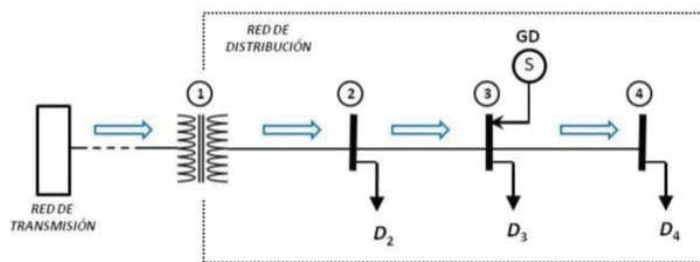


Figura 2-1: Flujo de potencia en condiciones normales ante presencia de GD [15]

II. La GD suministra una potencia superior a la de su barra e inferior o igual a la demanda aguas abajo

En esta situación la dirección del flujo de potencia es la misma que en el caso anterior, con la diferencia que la unidad generadora suplirá completamente la demanda de su barra y el excedente flujo de potencia toma una dirección aguas abajo del GD para suplir cierta parte de la demanda o su totalidad.

Al igual que la situación anterior, las pérdidas totales del sistema se verán disminuidas debido al cambio de la magnitud del flujo de potencia aguas arriba de donde está conectada la GD, no obstante, estas dependerán de la proporción entre la demanda total suministrada en relación a la demanda total de la red

III. La GD suministra una potencia igual o superior a la demanda aguas abajo e inferior a la demanda total de la red

Bajo esta condición, el suministro de energía por parte de la GD provocará un efecto directo sobre la dirección del flujo aguas arriba de donde se encuentra conectado y a la vez esto podría ocasionar un cambio en la magnitud de los flujos de potencia.

En la Figura 2-2 se muestra la dirección de los flujos de potencia de la red que se observaría en esta situación. En general, se esperaría una disminución de las pérdidas totales del sistema debido a las menores distancias recorridas por los flujos que abastecen la demanda de las barra, pero esto no siempre será así, ya que depende de las magnitudes de las demanda que se encuentre en cada barra.

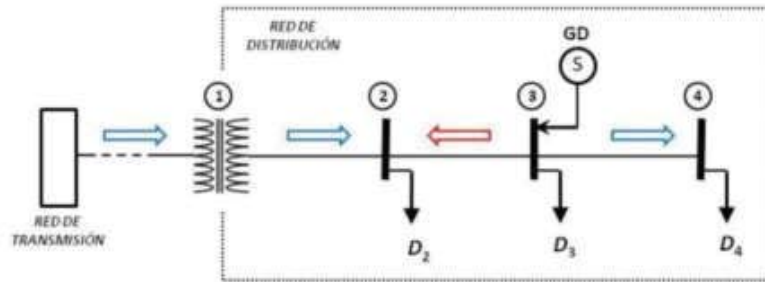


Figura 2-2: Flujo de potencia modificado debido a conexión de GD [15]

- IV. La GD suministrara una potencia igual o superior a la potencia demandada en la red**
 Para esta situación, el GD puede suplir la demanda de todas las cargas del sistema y entregar cierta energía a la red de transmisión. Como se puede observar en la Figura 2-3, la dirección del flujo podría ocasionar un aumento de las pérdidas si el flujo de potencia es mayor aguas arriba de la GD.

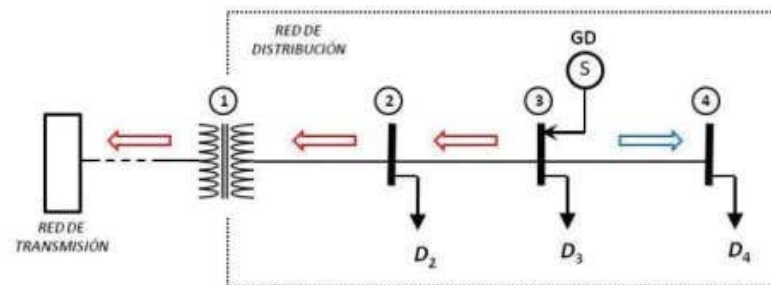


Figura 2-3: Flujo de potencia inverso en la red debido a GD [15]

2.6 Marco regulatorio de la GD

2.6.1 Decreto Supremo 327

Las redes de distribución en territorio nacional operan bajo una normativa que permite el funcionamiento regulado del servicio. Es por medio de esta normativa que se rige las condiciones del suministro eléctrico y también las respectivas tarifas.

Esta sección presenta parte de la normativa eléctrica vigente, la cual, establece criterios para asegurar la calidad de servicio en un sistema de distribución.

Sobre la regulación de tensión, el Decreto Supremo N° 327 en su artículo 243°, fija las magnitudes de tensión a 50 Hz y las holguras permitidas para un punto de conexión.

1. En Baja Tensión (BT): Excluyendo periodos con interrupciones de suministro, el valor estadístico de la tensión medido de acuerdo con la norma técnica correspondiente, deberá

estar dentro del rango de -7,5% a +7,5% durante el 95% del tiempo de cualquiera semana del año o de siete días consecutivos de medición y registro.

2. En Media Tensión (MT): Excluyendo periodos con interrupciones de suministro, el valor estadístico de la tensión medido de acuerdo con la norma técnica correspondiente, deberá estar dentro del rango de -6% a +6% durante el 95% del tiempo de cualquiera semana del año o de siete días consecutivos de medición y registro.
3. En Alta Tensión (AT):
 - 3.1. Tensión nominal de 154 kV y superiores: Excluyendo periodos con interrupciones de suministro, el valor estadístico de la tensión medido de acuerdo con la norma técnica correspondiente, deberá estar dentro del rango de -5% a +5% durante el 95% del tiempo de cualquiera semana del año o de siete días consecutivos de medición y registro.
 - 3.2. Tensión nominal inferior a 154 kV: Excluyendo periodos con interrupciones de suministro, el valor estadístico de la tensión medido de acuerdo con la norma técnica correspondiente, deberá estar dentro del rango de -6% a +6% durante el 95% del tiempo de cualquiera semana del año o de siete días consecutivos de medición y registro. [16]

2.6.2 Decreto Supremo 244

El Decreto Supremo 244 define las categorías de GD presentes en Chile, subdividiéndolas en tres grupos según su tamaño y punto de conexión de la unidad generadora.

1. Pequeños Medios de Generación Distribuida (PMGD): Medio de generación cuyo excedente de potencia sea menor o igual a 9 MW, conectando a instalaciones de una empresa concesionaria de distribución, o a instalaciones de una empresa que posea líneas de distribución de energía eléctrica que utilice bienes nacionales de uso público.
2. Pequeños Medios de Generación (PMG): Medios de generación cuyos excedentes de potencia suministrables al sistema sea menores o iguales a 9 MW conectados a instalaciones perteneciente a un sistema nacional, zonal o dedicado.
3. Medios de Generación no Convencionales (MGNC): Medios de generación cuya fuente sea no convencional y sus excedentes de potencia suministrada al sistema sea inferior a 20 MW.

El Decreto exige a todas las empresas distribuidoras permitir la conexión de cualquier PMGD que pueda conectarse ya sea mediante línea propia o de terceros. Así mismo, se exige a las empresas de distribución entregar a los interesados en un proyecto de GD toda la información técnica necesaria para la adecuada instalación, diseño y evaluación de la conexión de un PMGD. De la misma manera se exige a los propietarios del PMGD entregar toda la información que necesiten las empresas distribuidoras. [17]

2.7 Impacto de la GD sobre el sistema de distribución

Estándares [18] especifican que la GD no debe ser considerada como un regulador activo de los niveles de tensión en el sistema. Esto puede interpretarse como que no debe encargarse el voltaje del sistema a la potencia reactiva correspondiente a la GD. Esto no significa que no causa efectos en las tensiones del sistema, ya que la generación distribuida puede causar tanto un aumento como una disminución a lo largo del alimentador dependiendo del tipo de GD, su método de

control, la potencia suministrada y sus parámetros respecto al alimentador y la carga. La influencia de la GD en las variaciones de voltaje es pequeña cuando sólo inyecta potencia activa al sistema (factor de potencia unitario), comparado como cuando consume o entrega potencia reactiva.

Los generadores de inducción producen potencia activa, pero ellos siempre consumen potencia reactiva proveniente del sistema. Banco de capacitores son típicamente usados para compensar la potencia reactiva consumida por estos elementos. [19]

Generadores síncronos producen potencia activa y pueden producir o consumir potencia reactiva. Cuando un generador síncrono consume potencia reactiva del sistema, el efecto que produce es similar a cuando opera un generador de inducción. Si la GD consume potencia reactiva, tensiones pueden disminuir significativamente, en cambio, si la GD entrega potencia reactiva al sistema, el efecto es similar a los capacitores ya que las tensiones pueden aumentar significativamente. [19]

Generación distribuida como los generadores síncronos, pueden controlar los niveles de tensión del sistema con la potencia reactiva que pueden entregar o absorber. Sin embargo el rango de regulación de las tensiones puede no ser suficiente, por lo cual los reguladores de tensión pueden proporcionar el voltaje regulado deseado. Para poder controlar la tensión de distribución en el punto de acoplamiento, la GD debe funcionar en modo de voltaje constante. [19]

La GD también posee un efecto sobre las pérdidas de las líneas, modificando el perfil de tensión. El impacto de la generación distribuida en la reducción de pérdidas es similar al de los condensadores. La diferencia es que la GD afecta al flujo de potencia tanto real como reactivo, mientras que los condensadores sólo al flujo de potencia reactivo. Cuando el GD está diseñado para que satisfaga la carga local y éste se ubica cerca de la carga, puede proporcionar una reducción significativa en las pérdidas de la línea. [19]

2.8 Interacción de la GD y operación de los reguladores de tensión

Un análisis realizado a los estudios [19] y [20], deja en claro los problemas que enfrentan los reguladores de tensión cuando están expuestos a generación distribuida en el sistema. Esto es debido a que cuando un generador distribuido exporta energía al sistema, el flujo de potencia se dirige en un sentido contrario al normal.

El flujo inverso de potencia se puede producir como resultado de una conmutación del sistema de reconfiguración del alimentador, o puede producirse por que la GD está generando mayor potencia que la del sistema.

El problema se genera cuando los reguladores de tensión no son capaces de distinguir si el flujo inverso de potencia es generado por una conmutación del sistema, o éstos son provocados por una inyección por parte de una GD.

Existen varios modos de operación actualmente disponibles en los controladores modernos de los reguladores de tensión. El impacto de la generación distribuida en cada modo de operación tiene resultados distintos.

2.8.1 Modo bidireccional

La detección de flujo inverso de potencia permite al regulador reconocer situaciones en que el flujo de energía es opuesto a lo habitual.

Con el modo de detección bidireccional, el controlador del regulador de voltaje determina la dirección de operación (directo o inverso), basándose en la dirección del flujo de potencia activa. Éste modo de operación es solo recomendable para inversiones del flujo de potencias momentáneas y no para sistemas que posean GD, debido a que presenta problemas que puede llevar a niveles de tensión indeseados en el sistema.

En la Figura 2-1 la potencia activa que aporta la GD, es menor que la demanda de los consumidores (kW) aguas abajo del regulador. El flujo de potencia activa a través del regulador va de izquierda a derecha (Subestación a Generador). Con el modo bidireccional, el regulador opera en modo directo, regulando la tensión en el lado de los consumidores (lado 2).

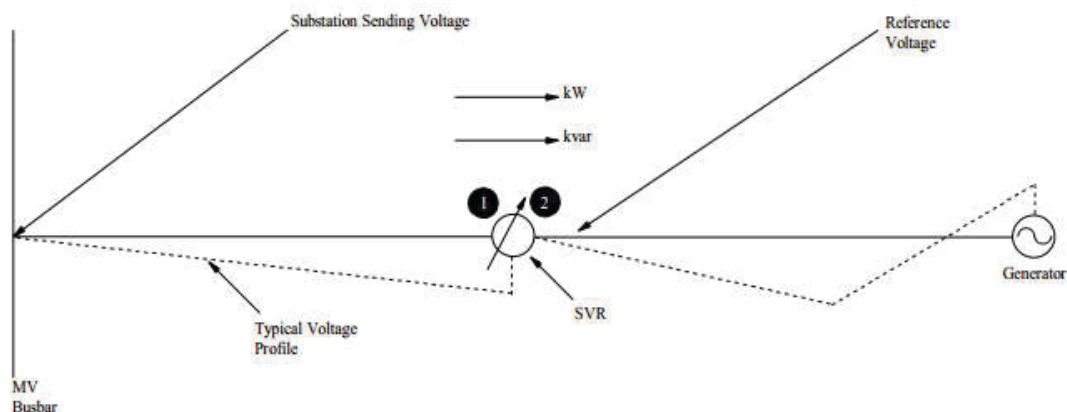


Figura 2-4: Esquema de alimentador de distribución y generación distribuida con regulador de tensión en modo de operación directa [20]

En la Figura 2-2, la potencia del generador excede la demanda de los consumidores entre el regulador y el generador, el flujo de potencia activa fluye a través del regulador desde derecha a izquierda (Generador a Subestación). Con el modo bidireccional normal, el regulador invertirá su dirección de operación e intentará regular el voltaje en el lado de la fuente (lado 1). El voltaje de la subestación está fijado y no puede ser alterado por el regulador de tensión. Si el voltaje en el lado de la fuente es mayor que el voltaje de setpoint, el regulador cambiara un tap para bajar esa tensión al voltaje de seteo. Como la tensión se encuentra fija en el lado de la barra, el regulador continuará con el cambio de taps hasta que alcance el mínimo tap. El efecto neto, es que se tendrá una sobretensión de +10% (o mayor) en el lado del generador.

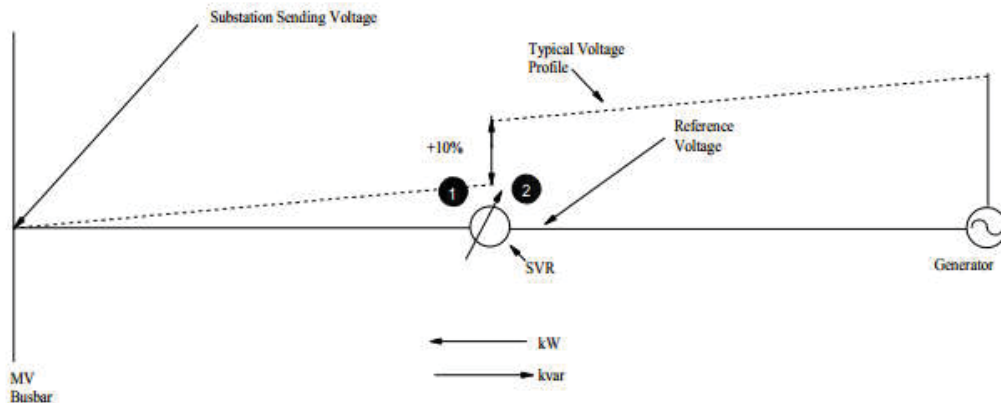


Figura 2-5: Esquema de alimentador de distribución y generación distribuida con regulador de tensión en modo de operación inverso [20]

2.8.2 Modo bidireccional reactivo

Este tipo de operación está propuesto en [20] como solución al modo de trabajo que debe tener un regulador de tensión cuando se encuentra en presencia de generación distribuida. En [19] el tipo de operación bidireccional reactivo ya se encuentra incluido junto con los otros tipos de operación que ofrece el controlador del regulador de tensión cuando se presenta un flujo inverso de potencia.

El controlador del regulador de tensión determina la dirección de operación basado en la dirección del flujo de potencia mediante la detección de las componentes reales y reactivas de la corriente.

El controlador incorpora niveles de umbral definibles por el usuario. Aquellas magnitudes de corriente real o reactiva desencadenan los cambios de taps específicos realizados por el controlador.

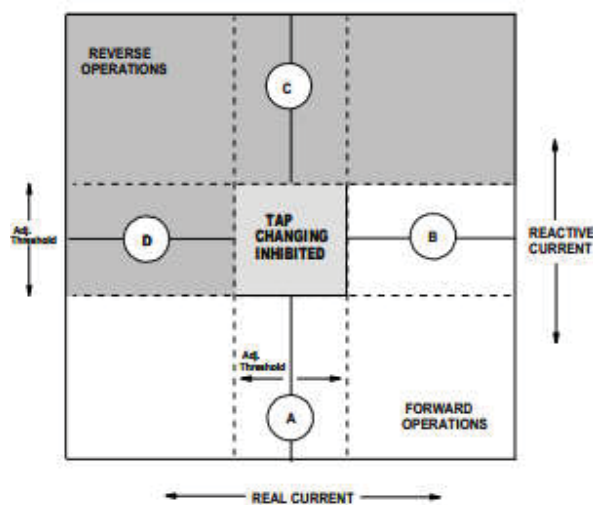


Figura 2-6: Modo del controlador en operación bidireccional reactiva [20]

El control determina que ajustes (directo o inverso) se usarán, detectando componentes reales y reactivos de la corriente. El controlador opera en modo directo (forward) siempre que la magnitud de la componente reactiva de la corriente exceda el umbral definido por el operador en la dirección negativa. Esto corresponde a un flujo reactivo de potencia ($V \times I^*$) desde la fuente a la carga a través del regulador. Esta área de operación es denominada sección "A" en la Figura 2-3

El controlador opera también en modo directo si la magnitud de la componente real de la corriente, excede el umbral en la dirección positiva mientras que la magnitud de la componente reactiva de la corriente se encuentra entre los umbrales. En esta instancia, el flujo real de potencia fluye desde la fuente a la carga a través del regulador y el flujo reactivo de potencia es suficientemente pequeño como para asumir flujo desde la fuente a la carga. Esta área de operación es denotada como la sección "B" en la Figura 2-3.

El controlador opera en modo inverso usando las configuraciones inversas siempre que la magnitud de la componente reactiva de la corriente exceda el umbral en la dirección positiva. Esto corresponde a un flujo de potencia reactivo desde la carga a la fuente. Se denota esta área como "C".

El controlador también opera en modo inverso si la magnitud de la componente real de la corriente excede el umbral en dirección negativa mientras la magnitud de la componente reactiva de la corriente se encuentre dentro del umbral. Esto significa un flujo de potencia real que fluye de la carga a la fuente a través del regulador. Esta área de operación se marca como D en la Figura 2-3. [20]

2.8.3 Modo de cogeneración

La compensación de caída de línea (LDC), corresponde a una parte integral del controlador del regulador de tensión. La LDC calcula la caída de tensión en la línea y realiza correcciones en la tensión basadas en las corrientes de línea, parámetros de línea R y X y el voltaje en el lado de carga. Se supone inherente que el flujo de corriente aguas abajo del regulador de tensión es aproximadamente proporcional a la corriente en el regulador con la constante de proporcionalidad disminuyendo de forma constante con el aumento de la distancia aguas abajo del regulador.

Normalmente la operación deseada de un regulador instalado en un alimentador que posea cogeneración es regular el voltaje en el lado de los clientes durante flujos de potencia que fluyan hacia la carga y regular el voltaje en el regulador cuando el flujo de potencia sea inverso, en el mismo lado de la carga.

Esto se logra simplemente no invirtiendo el control cuando se detecta flujo inverso y se alteran los ajustes de la LDC para explicar este cambio de dirección en el flujo de potencia.

El control siempre opera en modo directo. El control operará en el modo directo pero podría utilizar los ajustes de la compensación de caída de línea inverso, esto sucede cuando la componente real de la corriente supere por encima el umbral del 1% en el lado inverso.

El control seguirá usando los ajustes de LDC inverso hasta que la componente real de la corriente supere el umbral del 1% en el lado directo. El temporizador de operación (time delay) no se restablece en ninguna transición de ajustes de LDC directo o inverso.

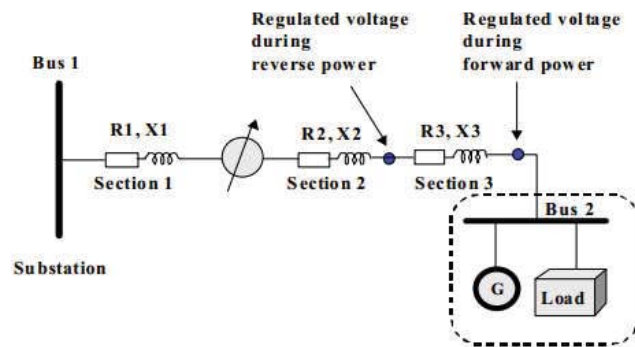


Figura 2-7: Esquema de puntos de regulación en modo cogeneración [19]

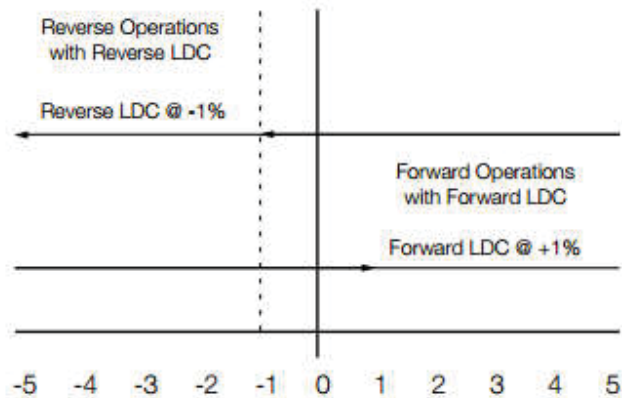


Figura 2-8: umbrales de operación en la cogeneración [21]

3 Métodos de optimización

Existen áreas del conocimiento y del quehacer humano donde surgen problemas relacionados con la mejora de determinados procesos o la obtención de mejores soluciones (generales o particulares). La disciplina que estudia este tipo de problemas y sus respectivas alternativas es conocida como optimización [22]. Los problemas de optimización pueden clasificarse en función de diferentes factores como son su complejidad, la existencia o no de restricciones, su carácter estático o dinámico, lineal o no lineal, mono-objetivo o multi-objetivo, etc. En cuanto a las técnicas de búsqueda, estas se pueden clasificar en función de si aseguran obtener el resultado óptimo (técnicas exactas) o si por el contrario permiten obtener soluciones cercanas al óptimo (técnicas aproximadas). [23]

La finalidad de los métodos de optimización, en general, es encaminar las soluciones encontradas hacia un máximo o un mínimo, según sea el caso. Estas búsquedas están sujetas a restricciones de tipo técnicas y operativas, que dependen directamente del problema a resolver, esto quiere decir que los métodos de optimización consisten en la selección de la mejor alternativa, según el criterio utilizado, que las demás alternativas posibles. [24]

De manera general, los elementos que componen los modelos de optimización, son:

- **Función Objetivo:** Es la principal característica del modelo, corresponde a la medida cuantitativa del funcionamiento del sistema que se desea optimizar, ya sea maximizar o minimizar.
- **VARIABLES:** Representan las decisiones que se pueden tomar para afectar el valor de la función objetivo. Desde un punto de vista funcional se pueden clasificar en variables independientes o variables dependientes, aunque matemáticamente no existe diferencia.
- **Restricciones:** Representan el conjunto de relaciones (expresadas mediante ecuaciones e inecuaciones) que ciertas variables están obligadas a satisfacer. Por ejemplo, potencias máximas y mínimas de operación, capacidad de producción, etc. [24]

3.1 Clasificación de los métodos de optimización

La clasificación de los métodos de optimización no es algo que se encuentre definido de forma clara, por ejemplo en [24] la clasificación la hace respecto a métodos clásicos, que define como los que se encuentran habitualmente en los libros de optimización y los métodos meta-heurísticos, que apareció ligado a lo que se denominó inteligencia artificial y que imita fenómenos encontrados en la naturaleza. Por otra parte en [25] se plantea una propuesta que define a los métodos de optimización dependiendo de los siguientes factores:

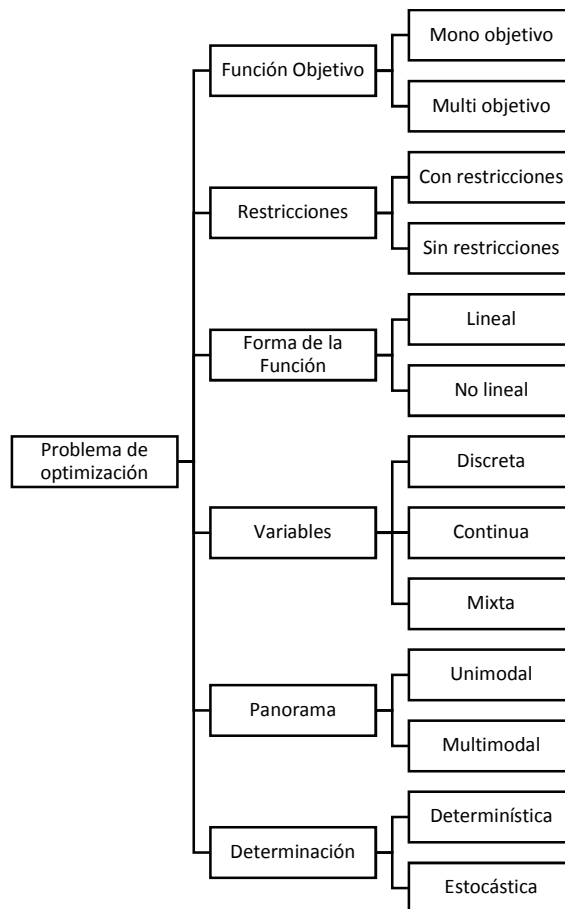


Figura 3-1: Clasificación Métodos de Optimización (Imagen propia)

3.2 Algoritmos de optimización

En general, los algoritmos de optimización pueden ser divididos en dos categorías, algoritmos determinísticos y algoritmos estocásticos, como lo muestra la Figura 3-2. Los algoritmos determinísticos siguen un riguroso procedimiento y las trayectorias, valores de las variables asignables y las funciones son repetibles; es decir, para un mismo punto de partida, el algoritmo sigue la misma trayectoria si éste se ejecuta el día de hoy, o el de mañana. Por otro lado, un algoritmo estocástico siempre posee cierta aleatoriedad, por ejemplo las cadenas o soluciones en la población generada por algoritmos será diferente cada vez que se ejecuta un programa ya que

los algoritmos estocásticos utilizan números pseudo-aleatorios, aunque los resultados finales pueden que no tengan grandes diferencias, pero la trayectoria de cada individuo de la población no es la misma. [25]

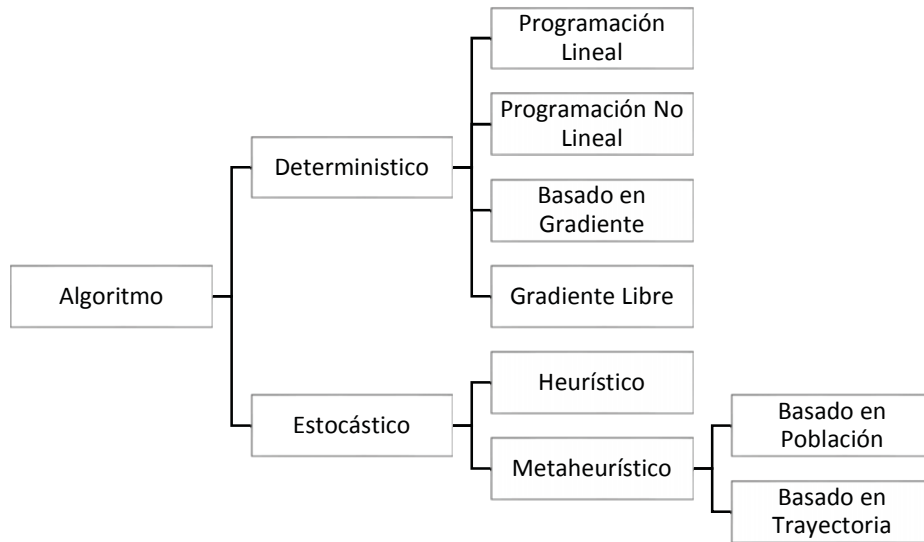


Figura 3-2: Clasificación de algoritmos (Imagen propia)

Dentro de los algoritmos estocásticos tenemos de dos tipos, los algoritmos heurísticos y los algoritmos meta-heurísticos, pero su diferencia es pequeña. Los algoritmos heurísticos significan “buscar” o “descubrir por ensayo y error”. Soluciones de calidad pueden ser encontradas en una cantidad razonable de tiempo, pero no se garantiza que estas soluciones encontradas sean las óptimas. Es esperable que estos algoritmos funcionen la mayor parte del tiempo, pero no todo el tiempo. Esto suele ser lo suficientemente aceptable cuando no queremos necesariamente las mejores soluciones, pero si se quiere obtener buenas soluciones.

El desarrollo que se encuentra por sobre los algoritmos heurísticos son los denominados algoritmos meta-heurísticos. Meta significa “más allá” o “superior”, haciendo alusión a los mejores resultados que muestran estos algoritmos, donde éstos generalmente utilizan ciertas compensaciones de la aleatorización y la búsqueda local. Cabe destacar que no existe una definición acordada en cuanto al significado de heurístico y meta-heurístico, algunos autores usan ambas definiciones de forma intercambiable. Sin embargo, las recientes tendencias tienden a nombrar todos los algoritmos con aleatoriedad y búsqueda local como algoritmos meta-heurísticos. [25]

La forma más amplia de escribir un problema de optimización no lineal es por ejemplo:

Minimizar $f_i(x)$, ($i = 1, 2, \dots, M$),

Sujeto a las restricciones

$h_j(x) = 0$, ($j = 1, 2, \dots, J$)

$g_k(x) \leq 0$, ($g = 1, 2, \dots, G$),

Donde f_i , h_j , g_k , son funciones no lineales, las variables $x = (x_1, x_2, x_3 \dots, x_d)$ pueden ser variables continuas, discretas o mixtas en un espacio de d-dimensiones. La función f_i es llamada función objetivo y cuando $M > 1$, la optimización es multi-objetivo, también es posible combinar distintos objetivos en una sola función objetivo. [26]

Según [27] y [28], se describen las siguientes características básicas que poseen las técnicas meta-heurísticas de optimización:

- Son estrategias que guían el proceso de búsqueda.
- Exploran eficientemente el espacio de búsqueda con el objetivo de encontrar soluciones próximas al óptimo global.
- Las técnicas que constituyen las meta-heurísticas varían entre métodos de búsqueda local simple a complejos métodos de aprendizaje.
- Pueden incorporar mecanismos para evitar quedar atrapados en óptimos locales del espacio de búsqueda.
- Permiten un nivel de descripción abstracto, no específico del problema.
- Pueden hacer uso del conocimiento del dominio del dominio específico de forma que las heurísticas son controladas por una estrategia de nivel superior.
- Las meta-heurísticas avanzadas utilizan la experiencia de búsqueda (haciendo uso de alguna forma de memoria) para guiar la búsqueda.

Dentro de las principales técnicas meta-heurísticas de optimización se puede encontrar el método del enfriamiento simulado (en inglés Simulated Annealing, SA) el cual se propone y explica en [29], también se encuentra la técnica búsqueda tabú (en inglés Tabú Search, TS) [30], los algoritmos genéticos (en inglés Genetic Algorithms, GA), la búsqueda dispersa (en inglés Scatter Search, SS), los algoritmos meméticos (en inglés Memetic Algorithms, MA), la búsqueda en vecindario variable (en inglés Variable Neighborhood Search, VNS), la búsqueda local guiada (en inglés Guided Local Search, GLS), los procedimientos de búsqueda basados en procedimientos adaptativos aleatorizados avaros (en inglés Greedy Randomized Adaptive Search Procedures, GRASP), la optimización mediante colonias de hormigas (en inglés Ant Colony Optimization, ACO), la búsqueda local iterada (en inglés Iterated Local Search, ILS), las redes neuronales (en inglés Neural Networks, NN), etc. Además, se pueden incluir las técnicas híbridas que combinan aspectos de diferentes meta-heurísticas, así como versiones paralelas de dichos métodos. [31]

En función de las características propias de cada meta-heurística se pueden establecer diferentes clasificaciones. A continuación se muestran algunas de las clasificaciones más aceptadas en la actualidad. [27]

- Técnicas inspiradas y no inspiradas en la naturaleza. Muchas meta-heurísticas, como por ejemplo los algoritmos genéticos, enfriamiento simulado, optimización mediante colonia de hormigas, etc. basan su funcionamiento en aspectos inspirados de la naturaleza. Otras, por ejemplo búsqueda tabú o la búsqueda local guiada, no simulan ningún aspecto de la naturaleza.
- Técnicas basadas en trayectorias y basadas en poblaciones. Un aspecto diferenciador entre meta-heurísticas radica en el número de soluciones que se utilizan en el proceso en el proceso de optimización. Meta-heurística como enfriamiento simulado, o búsqueda tabú utilizan una sola solución durante el proceso de búsqueda, por lo que se suelen denominar métodos de trayectoria, ya que la solución desde la solución de partida hasta encontrar la solución final. Por otro lado, técnicas como los algoritmos genéticos hacen uso de un conjunto de soluciones (población) que son optimizadas de forma simultánea durante la búsqueda. Normalmente los métodos poblacionales suelen conseguir soluciones de más calidad debido a la ventaja que supone explorar simultáneamente diferentes áreas del espacio de búsqueda. [28]
- Técnicas estáticas y dinámicas. Otro aspecto diferenciador entre meta-heurística radica en la función de aptitud utilizada. Mientras que en la mayoría de heurísticas utilizan la misma función objetivo durante todo el proceso de búsqueda otras, como la búsqueda local guiada, modifican dicha función en tiempo de ejecución, lo que ayuda a escapar de mínimos locales.
- Técnicas basadas en estructuras de vecindario único y vecindarios múltiples. La mayoría de los algoritmos trabajan con una estructura de vecindario simple, es decir, la topología del espacio objetivo no cambia durante la búsqueda. Sin embargo, existen meta-heurísticas como la búsqueda en vecindario variable que diversifican la búsqueda mediante el uso de diferentes espacios de soluciones.
- Meta-heurísticas con memoria y sin memoria. Uno de los criterios más utilizados para clasificar las meta-heurísticas es el uso que hacen de su historia de búsqueda, es decir, si utilizan memoria o no. Heurísticas como el enfriamiento simulado utilizan el estado actual del proceso de búsqueda a la hora de determinar la próxima forma de actuación. Otras técnicas como la búsqueda tabú utilizan información previa (memoria) del proceso de búsqueda a la hora de tomar nuevas decisiones. Existen dos formas principales de hacer uso de la memoria. Una de ellas consiste en incorporar memoria a corto plazo teniendo en cuenta las últimas decisiones tomadas (movimientos realizados, soluciones visitadas, etc.). En otros casos se hace uso de memoria a largo plazo, que considera toda o una gran parte de la búsqueda realizada.

3.2.1 Técnicas Meta-heurísticas Basadas en Trayectorias

Las llamadas meta-heurísticas basadas en trayectorias vienen caracterizadas, como su propio nombre indica, por el hecho de que se utiliza una única solución durante el proceso de búsqueda

que describe una trayectoria en el espacio objetivo durante dicho proceso. Todos estos métodos tienen en común que parten de una solución inicial que es modificada aplicando determinadas estrategias particulares. A continuación se describen brevemente algunas de las meta-heurísticas de trayectorias más conocidas. [28]

- Ascenso de Colinas (HC): El método básico de búsqueda local es el conocido como ascenso de colinas (en inglés Hill Climbing, HC). Dicho nombre, que para problemas de minimización se denomina descenso de colinas, se debe a que para admitir una determinada solución. Esta debe conllevar una mejora respecto a la anterior, es decir, no se permiten movimientos que empeoren la calidad de la solución. Por esta razón, el algoritmo de ascenso de colinas se detiene cuando se encuentra en un óptimo local, no siendo efectivo en problemas combinatorios complejos. Así por ejemplo, dada la solución s de la Figura 3-3 (b), HC solamente es capaz de alcanzar el mínimo local representado por la solución s' , y no el mínimo global (s''). Por esta razón, esta técnica ha quedado relegada por otras que permiten escapar de dichos óptimos locales.

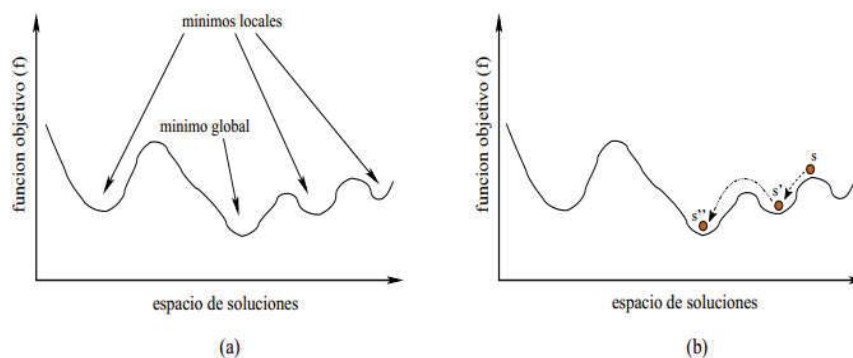


Figura 3-3: (a) Problema de optimización con varios mínimos locales y un mínimo global, (b) mejora de soluciones. [28]

- Enfriamiento Simulado (SA): El enfriamiento simulado (en inglés Simulated Annealing, SA) es una técnica de búsqueda local propuesta con el objetivo de evitar, en la medida de lo posible, quedar atrapados en óptimos locales tal y como sucede en los métodos de ascenso de colinas. El funcionamiento de SA es similar al proceso de enfriamiento al que es sometido un metal fundido. Cuando el metal se funde, sus partículas toman configuraciones aleatorias siendo propenso a deformarse. Tras la fundición, su temperatura disminuye lentamente hasta alcanzar un estado de mínima energía, proceso durante el cual dichas partículas van tomando una configuración robusta, y por tanto se dificulta su deformación. La analogía en el campo computacional radica en que la técnica de enfriamiento simulado trabaja con una solución inicial aleatoria, que se va optimizando de forma que al inicio del proceso se permiten variaciones de las soluciones que empeoren la función de aptitud con el propósito de escapar de los óptimos locales mientras que conforme al proceso avanza disminuye la probabilidad de aceptar soluciones que empeoren dicha función. Esta analogía ha sido probada con éxito en

numerosos problemas de optimización, mostrando gran habilidad para evitar quedar atrapado en óptimo locales. Este hecho, junto a la sencillez de su implementación, hizo que se popularizara a partir de la década de los ochenta.

- **Búsqueda Tabú (TS):** La búsqueda tabú (en inglés Tabú Search, TS) tiene sus orígenes en diversos trabajos publicados a principios de la década de los ochenta, aunque fue presentada formalmente unos años después por Fred Glover. Esta meta-heurística trata de encontrar el óptimo del problema a resolver, combinando la búsqueda local con una heurística para evitar quedar atrapado en óptimos locales y evitar entrar en ciclos. A tal efecto, hace uso del concepto de memoria y lo implementa mediante estructuras simples con el objetivo de dirigir la búsqueda teniendo en cuenta la historia previa. Se puede decir que se lleva a cabo un cierto aprendizaje y que la búsqueda es inteligente. El principio fundamental que rige a los procedimientos de TS se basa en que es mejor una mala decisión basada en información que una buena decisión al azar ya que, en un sistema que emplea memoria, una mala elección basada en una estrategia proporcionaría claves útiles para continuar la búsqueda de forma eficiente. Una buena elección fruto del azar no proporcionaría ninguna información para posteriores acciones. La forma de proceder de TS consiste en ir pasando de una determinada solución s a otras en el entorno de la primera, $N(s)$. Así pues, cada solución s perteneciente a S tiene asociado un conjunto de vecinos, $N(s)$ pertenecientes a S , denominado vecindad de s . Cada solución s' perteneciente a $N(s)$ puede alcanzarse directamente a partir de s mediante una operación llamada *movimiento*.
- **Búsqueda en Vecindario Variable (VNS):** La búsqueda en vecindario variable (en inglés Neighborhood Search, VNS) es una estrategia basada en modificar dinámicamente las estructuras de vecindario. Se trata de un procedimiento muy genérico, ya que se permite un alto grado de libertad en cada implementación. En el paso de inicialización se definen varias estructuras de vecindario, que se pueden escoger arbitrariamente, aunque normalmente se utilizan vecindarios con cardinalidad creciente. Se genera una solución inicial, el índice de vecindario, y el algoritmo itera hasta que se alcanza la condición de parada. El bucle principal de VNS está formado por tres fases: agitación, búsqueda local y movimiento.

La efectividad de esta estrategia de vecindario dinámico puede ser explicada con el hecho de que una mala posición en el espacio de búsqueda para un vecindario, puede ser una buena región para otro vecindario. Por otro lado, una solución que sea óptimo local en un vecindario, probablemente no lo sea para otro. Es decir, las propiedades del espacio suelen variar en otras estructuras de vecindario, por lo que las estrategias de búsqueda pueden comportarse de forma diferente en cada caso. [28]

3.2.2 Técnicas Meta-heurísticas Poblacionales

- **Algoritmos Evolutivos (EA):** Los algoritmos evolutivos (en inglés Evolutionary Algorithms, EA) se consideran como técnicas de aprendizaje no supervisado que, en general, no requieren de ningún tipo de conocimiento ya que el propio algoritmo es capaz de generar por sí mismo el conocimiento que requiere. Se consideran como técnicas meta-heurísticas de búsqueda que usan operadores probabilísticos y que funcionan como cajas

negras, pues no requieren conocimiento específico del dominio para actuar, y que son aplicables a un gran número de aplicaciones. La computación evolutiva interpreta la naturaleza como una inmensa máquina de resolver problemas, y trata de encontrar los principios en que se basa su comportamiento para utilizarlos en los procedimientos de optimización. En la naturaleza todos los seres vivos se enfrentan a problemas que deben resolver con éxito, como obtener alimento o conseguir más luz solar. El origen de esta capacidad está en la evolución producida por la selección natural que favorece la perpetuación de los individuos más adaptados a su entorno. Ejemplos de estos son el Algoritmo Genético (GA), el Micro Algoritmo Genético (μ AG), entre otros.

- Búsqueda Dispersa (SS): La búsqueda dispersa (en inglés Scatter Search, SS) [32] es un método evolutivo que ha sido aplicado en la resolución de un gran número de problemas de optimización. SS utiliza estrategias para combinar reglas de decisión, y se basa en el principio de que la información sobre la calidad o el atractivo de un conjunto de reglas, restricciones o soluciones puede ser utilizado mediante la combinación de estas. SS lleva a cabo el proceso de búsqueda mediante el uso de un conjunto de soluciones (P), denominadas agentes, que, al igual que los algoritmos genéticos, son optimizadas simultáneamente. Sin embargo, mientras que en el proceso de selección en los algoritmos genéticos suelen intervenir un porcentaje muy elevado de la población o toda ella, SS está fundamentada en las elecciones sistemáticas y estratégicas sobre un conjunto relativamente pequeño de soluciones, denominado conjunto de referencia (PR). Este conjunto contiene aquellas soluciones previamente obtenidas que cumplen ciertos criterios de calidad y diversidad.
- Colonia de Hormigas (ACO): La optimización mediante colonias de hormigas (en inglés Ant Colony Optimization, ACO) se fundamenta en el comportamiento real de las hormigas. Este comportamiento se puede resumir en que las hormigas son capaces de encontrar la ruta más corta entre el lugar donde se encuentra el alimento y su escondite subterráneo. Cuando las hormigas recorren el camino en busca de comida, depositan en el suelo una sustancia química inodora, conocida como feromona. A la hora de seleccionar el lugar hacia dónde ir, eligen con mayor probabilidad aquellas rutas cuya concentración de feromona es mayor. Este proceso cooperativo permite que la búsqueda se dirija hacia las rutas más cortas. Las soluciones se van construyendo de forma incremental mediante la agregación de componentes a soluciones parciales. Cuando se trata un determinado problema de optimización combinatoria, las restricciones del problema son construidas mediante un procedimiento constructivo de hormigas, de forma que en cada paso el proceso constructivo solamente puede añadir componentes factibles a la solución parcial actual. [28]
- Colonia de abejas artificial (ABC): El algoritmo de colonia de abejas artificial (en inglés Artificial Bee Colony) [33] está basado en el comportamiento que poseen las colonias de abejas en el proceso de la búsqueda del néctar para hacer la miel. La población de abejas se divide en tres grupos: empleados, espectadores y exploradores. Los empleados son los encargados de llevar el néctar desde la fuente de alimento; los espectadores realizan la evaluación de la calidad del alimento, así poder re-destinar a los empleados a las mejores

fuentes y los exploradores, son el grupo encargado de buscar nuevas fuentes de alimento aleatoriamente.

- **Búsqueda Cuckoo (CS):** La búsqueda Cuckoo (en inglés Cuckoo Search) se inspira en el comportamiento que poseen las aves cucos, las cuales al momento de poner sus huevos, lo realizan en nidos de otras aves. La técnica se basa principalmente en que cada ave coloque solo un huevo y lo deje en un nido aleatoriamente. Luego, el algoritmo lo traerá al mejor nido con huevos de mejor calidad que el anterior (soluciones). El ave dueña del nido, puede descubrir el huevo extraño entre los suyos con una determinada probabilidad, en este caso, el ave dueña del nido puede abandonar su propio nido y construir uno nuevo o tirar los huevos desde su nido. El algoritmo utiliza la búsqueda para el nido con mejores características para depositar los huevos. [34]
- **Optimización de Enjambre de Partículas (PSO):** La optimización mediante el enjambre de partículas (en inglés Particle Swarm Optimization) es un método de optimización basado en los comportamientos sociales de aves o de peces cuando se encuentran en búsqueda de alimento. Los individuos del grupo (o partículas) son guiadas por las que posee mejores condiciones hasta el momento y que la hace de líder de la bandada. Cada partícula evoluciona teniendo en cuenta la mejor solución encontrada en su recorrido y la del líder. Existen métodos probabilísticos para evitar los entrampamientos en mínimos o máximos locales. Una serie de variaciones básicas se han desarrollado debido a la mejora de la velocidad de convergencia y la calidad de la solución encontrada por el PSO. [35]

3.3 Estado del Arte: Métodos de Optimización aplicados a la Localización de Reguladores de Tensión

Dentro del desarrollo de la búsqueda de soluciones para el problema de localización de reguladores de tensión, los métodos han ido evolucionando desde sistemas basados en el conocimiento humano y conjuntos de expertos dedicados a esta tarea, hacia soluciones encontradas mediante métodos basados en algoritmos computacionales, los cuales pueden carecer de efectividad si se tiene falta de información respecto al problema, manejo de información inconsistente, diagramas eléctricos mal modelados, entre otros.

La revisión bibliográfica con respecto a la localización de los reguladores de tensión en redes de distribución eléctrica consiste en el análisis de documentos publicados en distintas revistas científicas, durante periodos comprendidos entre el año 2005 y el año 2016. En [36] se presenta la localización de reguladores de tensión, a través de la utilización de algoritmo genético (GA), donde el trabajo se basa en minimizar tanto las pérdidas de potencia activa, como las desviaciones de tensión que se producen en la red, a través de optimización mono-objetivo. En los siguientes años, se publica [37], donde nuevamente se trata las desviaciones de tensión producidas dentro del sistema de distribución, así como también las pérdidas activas del sistema, pero esta vez, es abordado el problema mediante una optimización multi-objetivo donde se utiliza Micro Algoritmo Genético (μ AG) en búsqueda de las soluciones óptimas de Pareto.

Por otra parte en [38] se presenta un enfoque para la mejor determinación de la ubicación de los reguladores de tensión de teniendo en cuenta las variaciones horarias de la demanda. Una función objetiva única es definida considerando las pérdidas y los índices de caída de tensión a través del método de los coeficientes de ponderación y luego optimizado mediante algoritmos genéticos. La evaluación de la función objetivo se realiza a través de un flujo de carga de Newton Raphson, lo que permite la determinación óptima de la posición de las derivaciones. Para considerar la variabilidad de demanda, se aplican múltiples procesos de optimización por hora considerando el perfil de carga diaria de cada nodo.

En [39] se presenta la selección de ubicaciones y tamaños óptimos de reguladores de tensión en un sistema de distribución radial usando Algoritmo de Simulación de Crecimiento de Planta (PGSA). El problema se desarrolla en dos sub-problemas, el de la colocación óptima y la elección óptima del ajuste de tap. El método propuesto ocupa la selección inicial de los buses del regulador de tensión mediante el uso de índices de pérdida de potencia (PLI). La técnica de identificación del nodo candidato y el algoritmo de simulación de crecimiento de la planta (PGSA) se usan para la ubicación y el número óptimos, junto con el ajuste de los reguladores de voltaje que mantengan un perfil de voltaje uniforme en toda la red. El objetivo en este documento es obtener un control de voltaje óptimo con reguladores de tensión y luego disminuir el coste total y las pérdidas, para obtener el máximo ahorro neto. En [40] se presenta el modelado de un sistema de localización de reguladores de tensión, a través de transformadores cambiador de tap con carga (OLTC). La localización de los reguladores de voltaje se hace con la ayuda de dos algoritmos diferentes. Estos Algoritmos ayudan a encontrar la ubicación y el número de reguladores requeridos para los sistemas. Finalmente, se realiza una comparación de los dos algoritmos para seleccionar el mejor método para la ubicación de los elementos. El perfil de tensión de los sistemas son mejorados y las pérdidas de potencia activa son menores. El primer algoritmo dio buenos resultados con respecto a reducción de pérdidas y aspectos económicos. Por otra parte, en [41] y [42] se presentan trabajos donde el método de optimización utilizado corresponde a Particle Swarm Optimization (PSO). Por un lado, en [41] para la localización de los reguladores de tensión se utiliza el algoritmo basados en el barrido directo/inverso (forward/backward sweep-based), donde se utilizan los índices de pérdidas de potencia activa que hay en cada barra, siendo la barra que posea el mayor índice de perdidas activas la mejor ubicación para el regulador de tensión. Para obtener la posición del tap del regulador, es utilizado el algoritmo PSO, minimizando una función objetivo que consiste en las pérdidas de potencia. En [42] se propone la forma óptima de la ubicación y coordinación de la Generación Distribuida junto con el Regulador de Tensión. Es un problema abordado directamente con una variación del algoritmo PSO, donde se apunta a mejorar el perfil de voltaje del sistema, minimizar las pérdidas de potencia activa, la mejora de la regulación del voltaje y el número mínimo de operaciones del tap del regulador de tensión. La función objetivo en este documento es evaluada utilizando un método de flujo de potencia basado en el Jacobiano.

En [43] y [44] se presenta uno de los pocos documentos que aborda la localización de los Reguladores de Tensión considerando la Generación Distribuida (GD), donde es abordado mediante un modificado algoritmo genético (AG) procurando resolver los límites superiores e inferiores de voltaje en cada nodo del sistema, así como también la capacidad de las líneas de

distribución. Se tiene en cuenta también la variabilidad tanto de la demanda como también de la producción por parte de la GD, presentándose estos problemas como desafíos a mejorar.

En [45] se proponen dos métodos para la selección del número óptimo, ajuste de tap y localización de los Reguladores de Tensión dentro de las redes de distribución eléctrica. El primer método planteado es a través del algoritmo Back Tracking y el segundo método se basa en la lógica difusa (fuzzy logic). EL objetivo de los dos métodos propuesto consiste en mantener el voltaje dentro de los límites establecidos y reducir las pérdidas totales en la red de distribución, maximizando la función objetivo, que representa el ahorro neto sobre la inversión del capital en reguladores de voltaje y los costos de pérdida de energía.

En [46] se propone la ubicación óptima de los reguladores de tensión con la implementación del algoritmo Cuckoo Search (CS), en donde la ubicación optima del regulador de voltaje se ha logrado utilizando los valores de índice de estabilidad de tensión que hay en cada nodo del sistema y las pérdidas de potencia activa. En [47] nuevamente se realiza un trabajo donde se propone una metodología basada en la implementación de un algoritmo y lógica difusa. En este documento se propone la localización de los reguladores de tensión que mantenga el perfil de tensión dentro de los límites deseados y se disminuyan las pérdidas del sistema, a su vez, maximizando el ahorro neto para el sistema de distribución. Se propone la localización mediante el algoritmo Back Tracking y luego se propone el sistema Fuzzy Expert (FES).

Finalmente en [48] se explica que debido a que cuando los sistemas fotovoltaicos de gran capacidad se encuentran interconectados, los límites de tensión en el sistema de distribución son excedidos, explicando también que no existe ni una guía de cómo ubicar los reguladores de tensión cuando esto sucede, por lo que la disposición y combinación de reguladores de tensión se verifican por análisis de simulaciones, de las cuales exponen sus resultados.

Tabla 3-1: Utilización de distintas F.O.

Función Objetivo	Veces utilizadas
Mín. desviaciones de tensión	8
Mín. de pérdidas totales	5
Max. ahorro neto de inversión	4
Mín. Operación de taps	1
Max. estabilidad de potencia	1
Mín. Desviaciones de tensión de GD	2

Es importante aclarar que mucha de las funciones objetivos son mono-objetivos, formadas por más de una función, por lo que las pérdidas totales y las desviaciones de tensión son ponderadas

por factores de peso, generalmente dando un mayor énfasis a la reducción de pérdidas totales del sistema de distribución, así como también el mejoramiento del perfil de tensión del sistema.

De los 12 documentos analizados, mayormente se abordó el problema de forma mono-objetivo, a pesar de que se trataba con más de una función, como se explicó anteriormente combinadas por una sola función objetivo. Esto se ilustra en la siguiente tabla:

Tabla 3-2: Utilización de otros elementos

Otros Factores	Veces utilizados
Métodos Mono-objetivos	10
Métodos Multi-objetivos	2
Considerando Generación Distribuida	2
Variación de la demanda	1
Con localización de Generación Distribuida	1

En cuanto a los métodos de optimización, es importante destacar una clara tendencia a realizarlo mediante técnicas heurísticas poblacionales, sobre todo por el algoritmo PSO y algoritmo genético AG. En la siguiente tabla, se visualizan los métodos de optimización utilizados en la localización de reguladores de tensión.

Tabla 3-3: Utilización de metodologías de optimización

Métodos de Optimización	Veces Utilizado
Algoritmo Genético AG	4
Particle Swarm Optimization PSO	2
Back Tracking Algorithm BTA	2
Plant Growth Simulation Algorithm PGSA	1
Micro Algoritmo Genético μ AG	1
Fuzzy Logic	1
Fuzzy Expert	1
Modified Cuckoo Search MCSA	1

Por otro lado, en [49] se aborda el cómo afecta la Generación Distribuida en los Reguladores de tensión de los sistemas eléctricos y como se regula ante esta situación. En [50] se enfrenta el problema de coordinar los reguladores de tensión con la generación distribuida del sistema. Para esto, el autor señala que se trabaja en base al método LDC (Line Drop Compensation). En este documento se modifica el LDC convencional, a través de la expansión de las ecuaciones que relacionan la I bus, el V bus y la Y bus del sistema, llegando a una nueva forma de calcular el voltaje predictivo del LDC.

En [51] se proponen técnicas de coordinación de control, así utilizar la inyección de la generación distribuida para la regulación de tensión y así mismo, minimizar la interacción con otros dispositivos como lo son los reguladores de tensión y los autotransformadores. La técnica se desarrolló sobre el concepto del control de zona, compensación de caída de línea (LDC), así como elección de parámetros en los controladores realizando la simulación en un sistema eléctrico australiano. En [52] se propone un método de control de tensión en los sistemas eléctricos, coordinando con los distintos dispositivos, como reguladores de tensión con compensación de caída de línea y autotransformadores, la generación distribuida. La técnica utilizada es realizar el control de tensión del sistema a través de la inyección de potencia activa y potencia reactiva por parte de la generación distribuida. Esto es verificado a través de simulaciones realizadas por el autor.

Por último, para considerar correctamente la generación distribuida, se propone un método para determinar los parámetros de la compensación de caída de línea LDC basado en la corriente estimada del regulador de tensión. El punto de regulación de voltaje se desplaza a lo largo de la línea, para encontrar el punto apropiado para la regulación de tensión. De este modo, se reducen considerablemente las violaciones de tensión producidas por el incorrecto funcionamiento de los reguladores de tensión, cuando se encuentra en presencia de generación distribuida.

4 Planteamiento del problema

Es común que las empresas destinen importantes recursos para el mejoramiento de operación de sus redes eléctricas, con el fin de que éste, opere bajo las mejores condiciones posibles. La utilización de reguladores de tensión, ayudan a mantener una buena calidad de servicio y reducir costos asociados a multas y pérdidas. Una característica de estos equipos es la dependencia entre beneficio y la localización de estos. La importante variación de las pérdidas y valores de tensión, dependiendo de las configuraciones de los sistemas, lleva a los ingenieros a resolver los complejos problemas de localización de los distintos dispositivos eléctricos en las redes de distribución, en la búsqueda constante del mayor beneficio a un menor costo.

4.1 Función Objetivo y Restricciones

1. Desviación de Tensión y Pérdidas

Son relevantes en una empresa, los perfiles de tensión con los que operan el sistema eléctrico y las pérdidas que presente el mismo. La calidad de suministro otorgado por la empresa no solo se mide mediante los índices de frecuencia de interrupción de clientes, si no también, es importante mantener los niveles de tensión adecuados, los cuales, están definidos por el ente regulador. La CNE indica en su artículo 243° del DS 327, que el valor medido de la tensión debe encontrarse dentro del rango -6,0% a +6,0%.

Por otro lado, las pérdidas son de vital importancia para las empresas de distribución eléctricas, ya que estas corresponden a energía no suministrada a clientes finales, lo que se transforma en un costo. Ya que en los sistemas de distribución, el cambiar las secciones de los conductores para minimizar pérdidas en todo el sistema no se ve como una opción, es de vital importancia la ubicación de los reguladores de tensión y es por esto, que también se considera dentro de la función objetivo, con el fin de minimizar las pérdidas del sistema como también la desviación de la tensión.

Se consideran las pérdidas y la desviación de tensión como:

$$Ls = \sum_{j=1}^{NL} i_j^2 * R_j \quad (4-1)$$

$$Vd = \sqrt{\sum_{k=1}^{NB} (Vk - 1)^2} \quad (4-2)$$

2. Lógica Difusa

Uno de los métodos aplicados para la formulación de la función objetivo, es la lógica difusa. La lógica difusa se considera uno de los métodos más exitosos para desarrollar controles complejos de sistema. La lógica difusa es una metodología de diseño que se basa en el uso de información aproximada, asemejando las decisiones a la decisión humana.

La lógica difusa nos permite, a través de funciones de membresía, determinar el grado de membresía que poseen ciertos valores. Los valores de pérdidas y desviación de tensión son evaluados en dichas funciones, con el fin de normalizar estos valores y determinar su grado, el cual dependerá de si estos valores se encuentran muy cerca del límite permitido y o exigidos por el usuario.

En la Figura 4-1, se muestra la función de membresía que corresponde a la función de la desviación de tensión. Se establece su límite para que cuando la desviación sea cercana al +-6% tenga un alto grado de membresía. Sin embargo, se le otorga cierta holgura a la función de membresía, de hasta un 6,4%, siendo este valor el caso limite cuando el grado de membresía corresponde a 1.

La función queda descrita por un código MATLAB, el cual está definido para el uso de funciones de membresía:

```
y=trapmf(x,[0 0.064 0.3 0.3]);
```

En la Figura 4-2, se muestra la función de membresía correspondiente a las pérdidas del sistema. Debido a que en la actualidad, las empresas de distribución de energía trabajan con pérdidas de aproximadamente el 10%, es que a este valor se le ha querido dar una alta prioridad, otorgándole un grado de holgura de hasta un 11,4% de pérdidas en el sistema. La función de membresía queda descrita por la función:

```
y=trapmf(x,[0 0.114 0.3 0.3]);
```

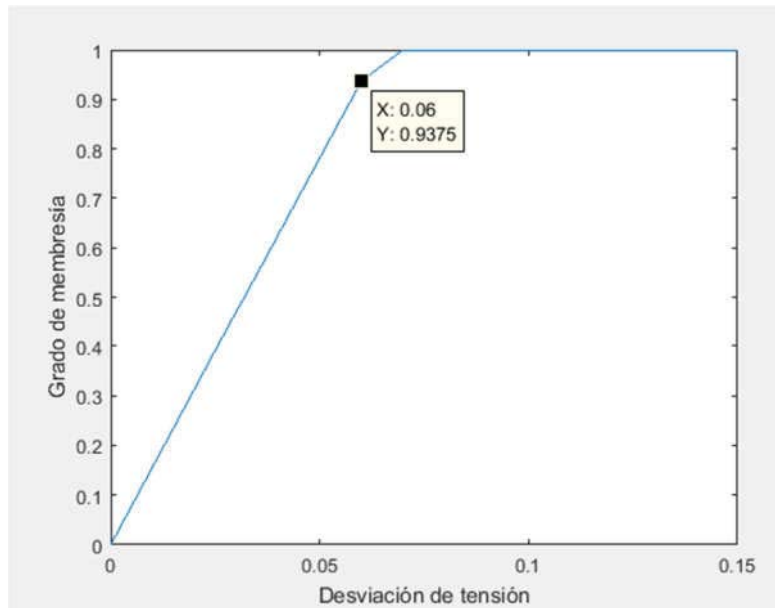


Figura 4-1: Función de membresía para la desviación de tensión. (Imagen propia)

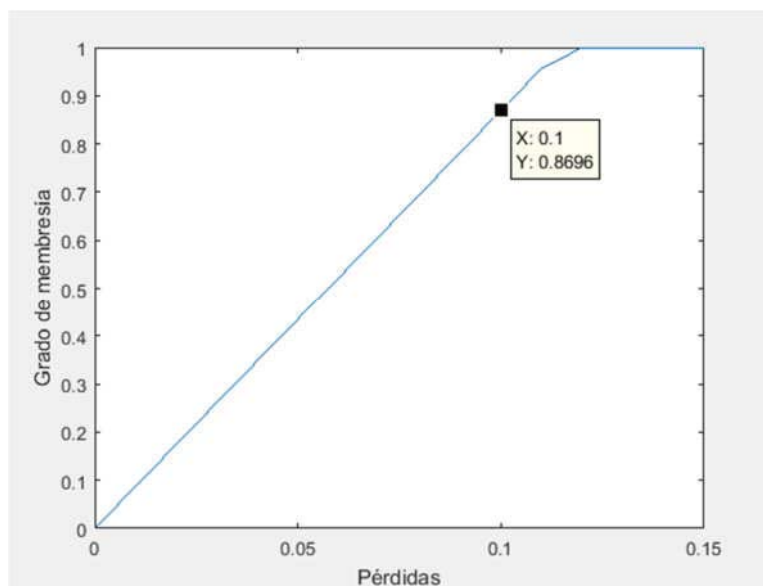


Figura 4-2: Función de membresía para la desviación de tensión. (Imagen propia)

En las funciones de membresía, son evaluados los parámetros de pérdidas y desviación de tensión, obteniendo valores normalizados, que integran la función objetivo, con el fin de minimizar estos valores obtenidos, donde:

$$[f1, f2] = \text{Funcionmembreía}(Vd, Ls) \tag{4-3}$$

Por lo tanto:

$$\text{Minimizar } F.O = f1 + f2 \quad (4-4)$$

Las restricciones a considerar en el problema de localización, son:

$$V_{min}^j \leq \Delta V_{regulador}^j \leq V_{max}^j \quad (4-5)$$

$$I_{VRj} \leq I_{maxVRj} \quad (4-6)$$

La primera ecuación, corresponde a cumplir los límites establecidos de mínima y máxima tensión en las barras. La segunda y tercera ecuación corresponde a los valores mínimos de voltaje para cada regulador, así como la corriente de operación máxima para cada regulador de tensión localizado en el sistema.

4.2 Algoritmo Genético

El Algoritmo Genético (AG) es una técnica estocástica de optimización cuyo método de búsqueda se basa en los fenómenos naturales de herencia genética y la lucha por la supervivencia.

Al igual que el resto de las técnicas evolutivas ya mencionadas, los AG están compuestos por un conjunto de representaciones codificadas de soluciones del problema a resolver. Este conjunto es denominado como población, mientras que las posibles soluciones se les denominan como individuos. Cada individuo es evaluado en términos de la o las funciones objetivos del problema y según esta medida, los mejores individuos son seleccionados para ser padres de la población de la siguiente generación.

La principal diferencia de los AG con respecto a otras técnicas evolutivas se encuentra en la forma en que se codifican las soluciones y en la relevancia del operador de cruce por sobre el operador de mutación. El operador de cruce obtiene nuevos individuos o hijos mediante la combinación de dos individuos de la población actual, denominados padres. En cambio, el operador de mutación obtiene un nuevo individuo alterando aleatoriamente la estructura del individuo original. [53]

Los pasos básicos del Algoritmo Genético son los siguientes:

- Generar aleatoriamente una población inicial de individuos.
- Calcular la aptitud de cada individuo.
- Seleccionar probabilísticamente en base a la aptitud.
- Aplicar operadores genéticos de cruce y mutación.
- Repetir el proceso hasta que se satisfaga cierta condición.

A diferencia del resto de las técnicas de optimización, los AG hacen uso, principalmente de la información de la función objetivo para guiar la búsqueda, en lugar de sus primeras y/o segundas derivadas, o cualquier otra información auxiliar. Para realizar la búsqueda, los AG codifican las variables que sirven para calcular la función objetivo, en lugar de hacer uso de las propias

variables. Además los AG analizan simultáneamente muchos puntos en el espacio de búsqueda, no centrándose en un único punto. Finalmente los AG utilizan reglas probabilísticas para pasar de un conjunto de soluciones o población a la siguiente.

En la Figura 4-3, se aprecia un diagrama de flujo de un AG universal que comienza con la inicialización y carga de datos según el problema a optimizar. Previo a la generación de la población inicial es necesario codificar las posibles soluciones debido a que deben ser manipuladas durante el proceso evolutivo.

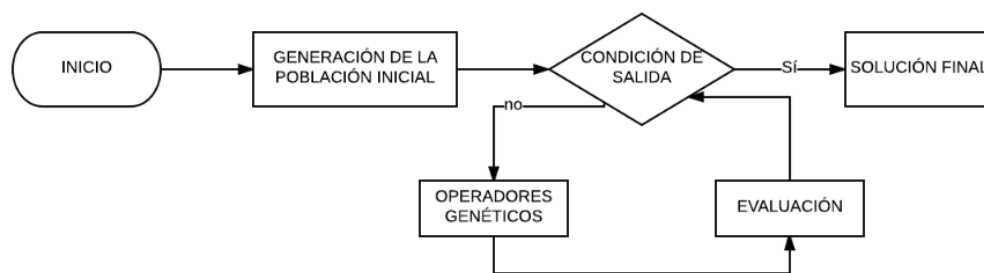


Figura 4-3: Diagrama de flujo de un AG típico

Entre las codificaciones más utilizadas destaca la codificación binaria, aunque también se emplean con frecuencia la codificación por medio de números reales y enteros. La codificación binaria consiste en convertir cada variable que interviene en el problema en su equivalente binario. La codificación mediante números reales o enteros ha surgido posteriormente debido a que la mayoría de los problemas de ingeniería a los que se han aplicado los algoritmos genéticos cuentan con variables de este tipo. [53]

La creación de la población inicial se consigue generando una distribución aleatoria de individuos uniformemente repartida en el rango de búsqueda de las variables. Existen otros procedimientos donde se producen inicializaciones aleatorias para cada individuo y se escogen aquellos con mejor rendimiento de la población inicial e incluso se proponen individuos que se saben están cerca de la solución óptima. Esta aproximación es solamente aplicable si se conoce de antemano la naturaleza del problema.

El paso siguiente es la condición de término del algoritmo que se establece mediante un número máximo de generaciones, si esta condición se cumple, el algoritmo entrega la mejor solución encontrada hasta el momento. Para proporcionar una medida del comportamiento de los individuos en el dominio del problema, se utiliza una función objetivo que es la encargada de cuantificar las aptitudes de cada solución en torno al problema dado.

Si la condición de término no es satisfecha se pasa a la aplicación de operadores genéticos comenzando con un proceso de recombinación o cruza, y de esta forma, producir la descendencia que se insertará en la siguiente generación. Debido a su importancia para la transición entre generaciones, se suelen trabajar con tasas de cruza que bordean el 90%.

4.3 Control de Regulador de Tensión ante Generación Distribuida

Como se ha estudiado, los reguladores de tensión nos permiten controlar la tensión a través de los flujos de potencia real y reactiva del sistema. Ahora, se desarrollan las ecuaciones de admitancias de barra, que permitan incluir a los reguladores de tensión en el flujo de potencia.

En la Figura 4-4 se ve una representación del regulador de tensión, donde Y en por unidad es el inverso de la impedancia en por unidad del regulador que tiene la relación de transformación $1:t$, como se muestra. La admitancia Y se encuentra sobre el lado del regulador secundario, es decir el lado donde se encuentra el nodo J . Esto es importante, ya que para la consideración de los flujos inversos de potencias, se debe considerar el cambio de derivación en el lado primario del regulador, es decir, el correspondiente al nodo I .

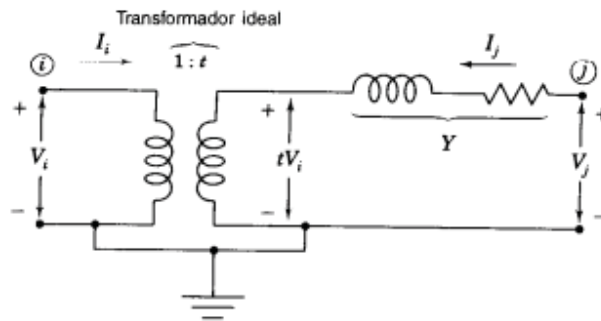


Figura 4-4: Imagen simplificada de Regulador de Tensión [2]

Originalmente, para un regulador como el que se tiene en la figura, se plantean las siguientes ecuaciones.

Primero las expresiones complejas de potencia dentro del regulador ideal son respectivamente,

$$S_i = V_i * I_i^* \quad S_j = tV_i * I_j^* \quad (4-7)$$

Como se tiene un regulador ideal sin pérdidas, la potencia S_i , dentro del regulador ideal desde la barra i debe ser igual a la potencia $-S_j$ que sale del regulador. Por lo que se obtiene,

$$I_i = -t^* I_j \quad (4-8)$$

La corriente I_j se expresa a través de,

$$I_j = (V_j - tV_i) * Y = -tYV_i + YV_j \quad (4-9)$$

Al multiplicar por $-t^*$ y al sustituir I_i por $-t^*I_j$, se obtiene

$$I_i = tt^*YV_i - t^*YV_j \quad (4-10)$$

Al hacer $tt^*=t^2$ y al reorganizar las ecuaciones 4-10 y 4-11 en la forma de Y_{barra} se tiene

$$\begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |t|^2 Y & -t^* Y \\ -t Y & Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} \quad (4-11)$$

Ahora supongamos que para el caso de flujo inverso, el cambio de derivaciones del regulador se encuentra en el lado del nodo i (primario), con una relación de transformación de $t:1$. Los elementos que conforman nuestra Y_{barra} quedaran determinado de igual forma que para el caso anterior.

Las ecuaciones de potencia del regulador de tensión queda defino por

$$S_i = V_i I_i^* \quad S_j = \frac{1}{t} V_j I_j^* \quad (4-12)$$

Igual que el caso anterior, al no considerar pérdidas se tiene $S_i = -S_j$, entonces

$$I_i = \frac{-1}{t^*} I_j \quad (4-13)$$

La corriente I_j queda expresado por

$$I_j = \left(V_j - \frac{V_i}{t} \right) Y = -\frac{Y}{t} V_i + YV_j \quad (4-14)$$

Y también se obtiene, de igual forma que para el caso anterior

$$I_i = -\frac{Y}{tt^*} V_i + \frac{Y}{t^*} V_j \quad (4-15)$$

Obteniendo de forma matricial

$$\begin{bmatrix} Y_{ii} & Y_{ij} \\ Y_{ji} & Y_{jj} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{|t|^2} Y & -\frac{Y}{t^*} \\ -\frac{Y}{t} & Y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} \quad (4-16)$$

De esta forma, el regulador estará encargado de regular en el lado del nodo i , ante la presencia de flujos inversos de potencia. Por otro lado, para determinar la posición óptima del tap, el modelo no toma ninguna decisión antes de realizar el proceso de optimización para favorecer una solución en particular. Es por esta razón, que se utiliza un flujo de carga Newton Raphson para evaluar la función objetivo, considerando de esta manera la posición del tap, como variable de estado que se ajusta automáticamente durante el proceso iterativo.

En la Figura 4-5, se muestra el diagrama de flujo que ejemplifica los procesos que se llevan a cabo para la localización de los reguladores de tensión.

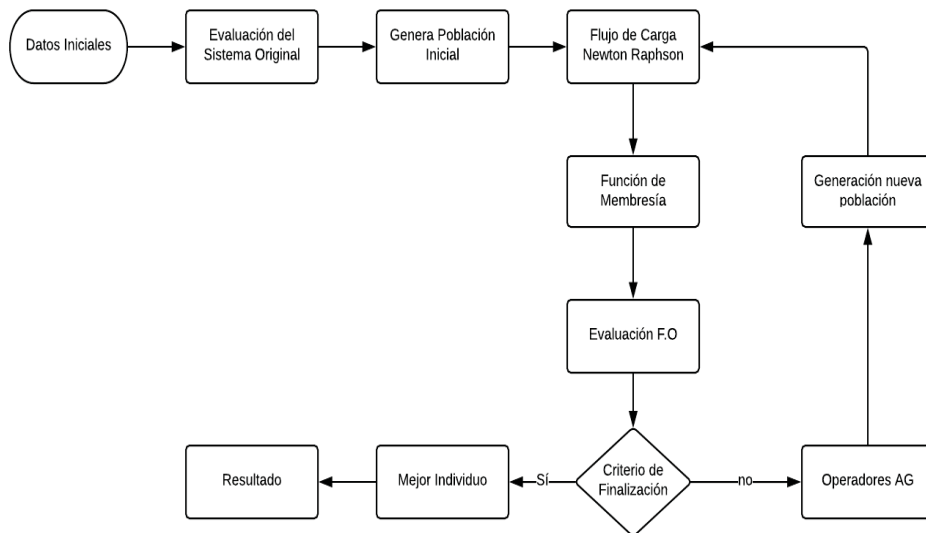


Figura 4-5: Diagrama de flujo de localización óptima. (Imagen propia)

5 Simulaciones y Resultados

5.1 Introducción

Luego de haber realizado el planteamiento del problema, los objetivos y las herramientas empleadas en el proceso de optimización establecido, es posible realizar distintas pruebas que mostraran en detalle los resultados de la localización óptima de los reguladores de tensión, en sistemas que se les incorpora generación distribuida.

Para el análisis de los sistemas se realizaron las siguientes consideraciones:

- Las cargas residenciales, industriales, comerciales y alumbrado público, fueron modeladas como se ilustra en el Apéndice A.2.
- La generación distribuida fue modelada para cada sistema como muestra en los respectivos análisis.
- El costo de los equipos reguladores de tensión es de USD 15.000
- El costo del kWh asociado a pérdidas de energía es de USD 0.15

5.2 Sistema de prueba de 17 nodos Civanlar

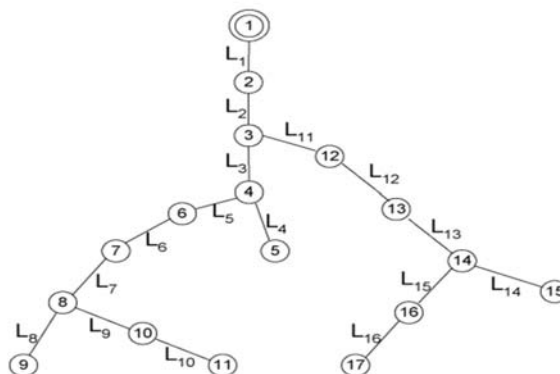


Figura 5-1: Sistema de diecisiete nodos.[4]

5.2.1 Información del sistema

El sistema original posee la siguiente información:

Tabla 5-1: Información sistema 17 nodos

Bus1	Bus2	R(p.u)	X(p.u)	Tipo de carga	MW	Mvar
1	2	0.05	0.05	Residencial	0.80	0.6
2	3	0.11	0.11	Industrial	1.60	1.08
3	4	0.15	0.11	Industrial	2.00	0.72
4	5	0.08	0.11	Industrial	1.80	0.80
5	6	0.11	0.11	Alumbrado Público	0.24	-0.20
6	7	0.04	0.04	Residencial	1.20	0.16
7	8	0.8	0.11	Comercial	0.80	0.64
8	9	0.075	0.10	Residencial	0.80	0.60
9	10	0.09	0.18	Residencial	0.80	0.16
10	11	0.04	0.04	Comercial	0.60	0.48
11	12	0.11	0.11	Alumbrado Público	0.40	0.36
12	13	0.04	0.04	Residencial	0.40	-0.44
13	14	0.09	0.12	Alumbrado Público	0.40	0.36
14	15	0.11	0.11	Residencial	0.80	0.60
15	16	0.08	0.11	Residencial	0.40	0.36
16	17	0.04	0.04	Residencial	0.84	-0.32

5.2.2 Generación Distribuida

Cabe destacar que el sistema original no posee generación distribuida, por lo que se ha modelado y se le ha integrado generación distribuida en dos de sus nodos.

La generación distribuida se modela a través de datos reales obtenidos mediante la plataforma del Coordinador Eléctrico Nacional, de donde se extrajo la información de la variación de la GD en cada hora.

Para este caso, se modela, por un lado, una GD solar, basada en los datos que se encuentran en la plataforma del Coordinador Eléctrico Nacional de la central Andes Solar. En la Figura 5-2, se muestra la variación de la generación distribuida para cada hora del día.

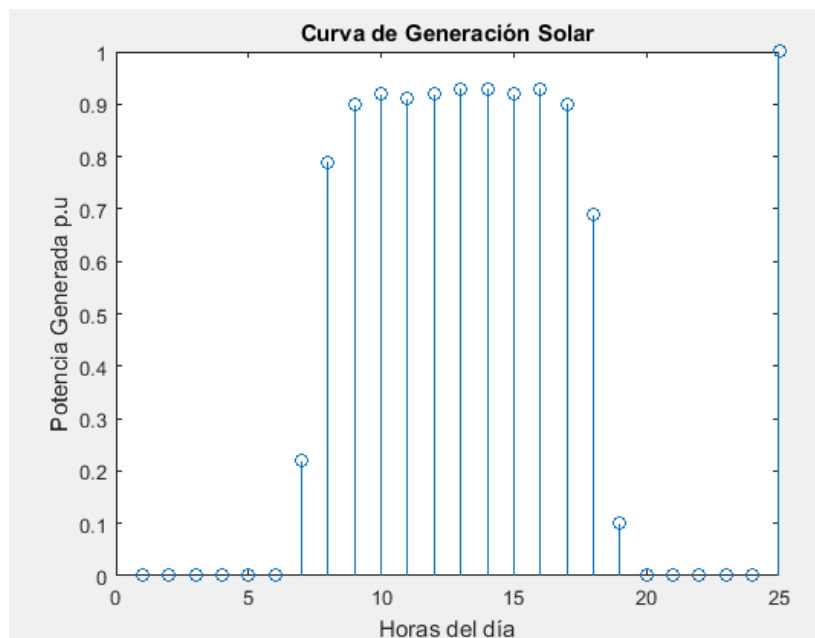


Figura 5-2: Curva de GD Solar. (Imagen propia)

Por otra parte, se modela una GD eólica, basado en datos reales que otorga el parque eólico Sierra Gorda Este. En la siguiente figura, se muestra lo que corresponde a la curva de generación eólica modelada.

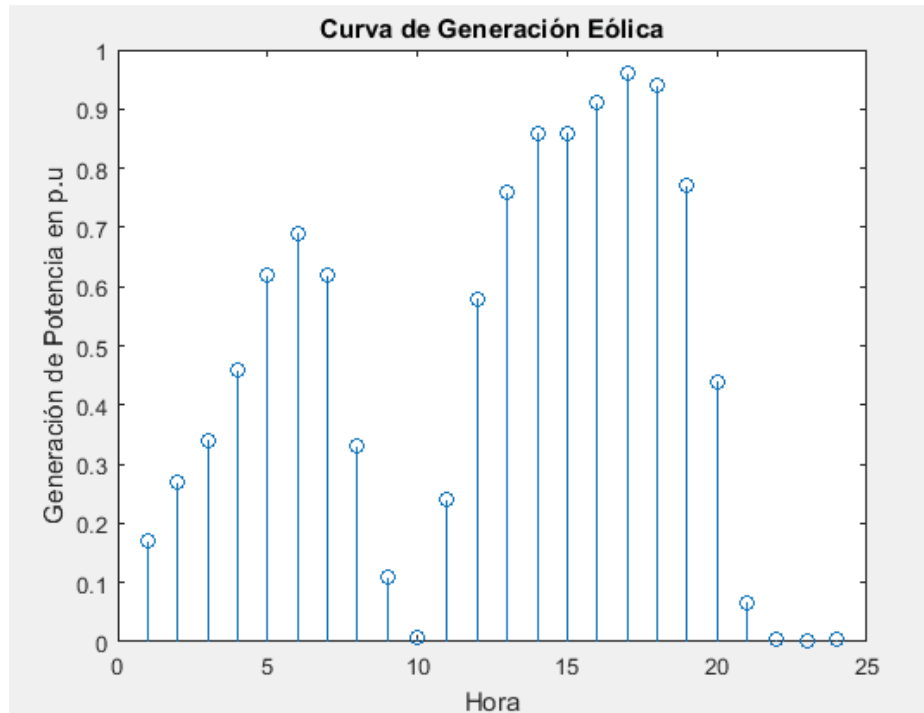


Figura 5-3: Curva de generación eólica. (Imagen propia)

La generación distribuida se ha incorporado al sistema original Civanlar de diecisiete nodos. La GD solar cuenta con una potencia instalada de 3.6 MW y se ubica en el nodo 5. Por otra parte la GD eólica posee una potencia instalada de 2 MW y se ubica al final del alimentador, en el nodo 17. Por lo que el sistema analizado corresponde a la Figura 5-4.

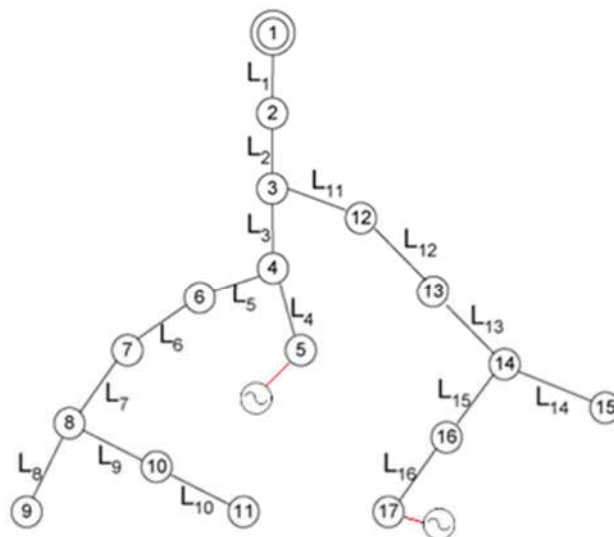


Figura 5-4: Sistema de diecisiete nodos considerando GD. (Imagen propia)

5.2.3 Localización de un Regulador de Tensión

En primer lugar, se realiza la optimización del sistema de 17 nodos sin considerar la Generación Distribuida, para poder observar como es la localización óptima de un regulador de tensión previamente a la aplicación del modelo propuesto.

En la siguiente figura, se observa la localización del regulador de tensión:

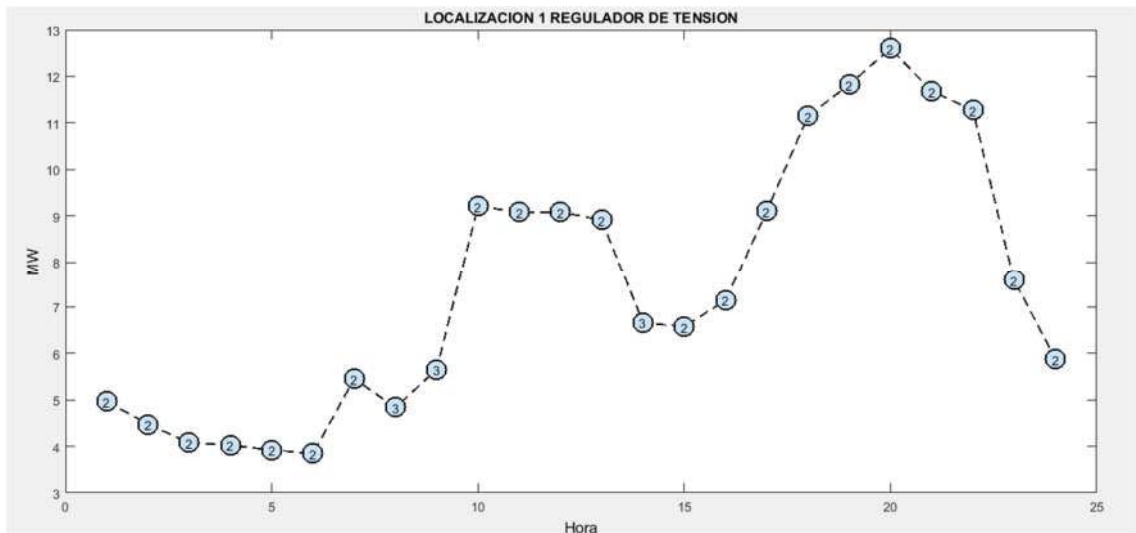


Figura 5-5: Localización 1 regulador de tensión sin considerar GD. (Imagen propia)

Luego de realizar la optimización del sistema de prueba de diecisiete nodos con el método propuesto, se obtienen los resultados, los cuales se pueden visualizar en la Figura 5-6.

Cabe destacar la variación de la demanda de energía del sistema que integra GD y el sistema original que no posee GD. En la Figura 5-5, se expone la demanda que posee el sistema original de diecisiete nodos. Se puede notar la clara diferencia que existe en la demanda del sistema original, comparado con el sistema que integra generación distribuida, sobre todo, en las horas en que la generación solar junto con la eólica, se encuentran en sus mayores niveles de generación. Esto corresponde entre las 07:00 hrs y 09:00 hrs, donde la generación solar alcanza un peak de potencia de 0.9 p.u, mientras que la generación eólica alcanza los 0.62 p.u. Otro rango en el que afecta significativamente a la demanda del sistema es entre las 13:00 hrs y las 18:00 hrs, donde la generación solar se encuentra cerca de los 0.9 p.u constante, mientras que la eólica opera durante sus mejores horas de generación.

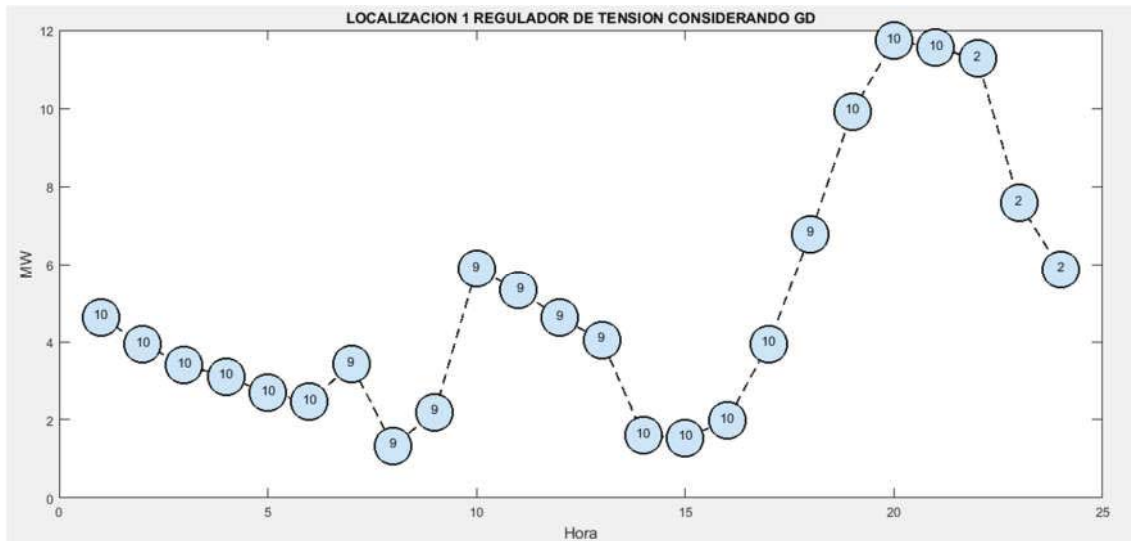


Figura 5-6: Localización óptima de un regulador de tensión. (Imagen propia)

Los resultados nos enseñan que la localización óptima del regulador, depende de la hora del día en que analicemos el sistema, siendo soluciones óptimas consideradas ubicarlo en la Barra 9 y Barra 10.

Por otro lado, se puede observar como los flujos a través de las ramas que componen al sistema, van variando de acuerdo a las horas del día. En los siguientes gráficos se aprecian las corrientes que circulan por los nodos cercanos a la GD, en este caso, el nodo 4 y el nodo 13.

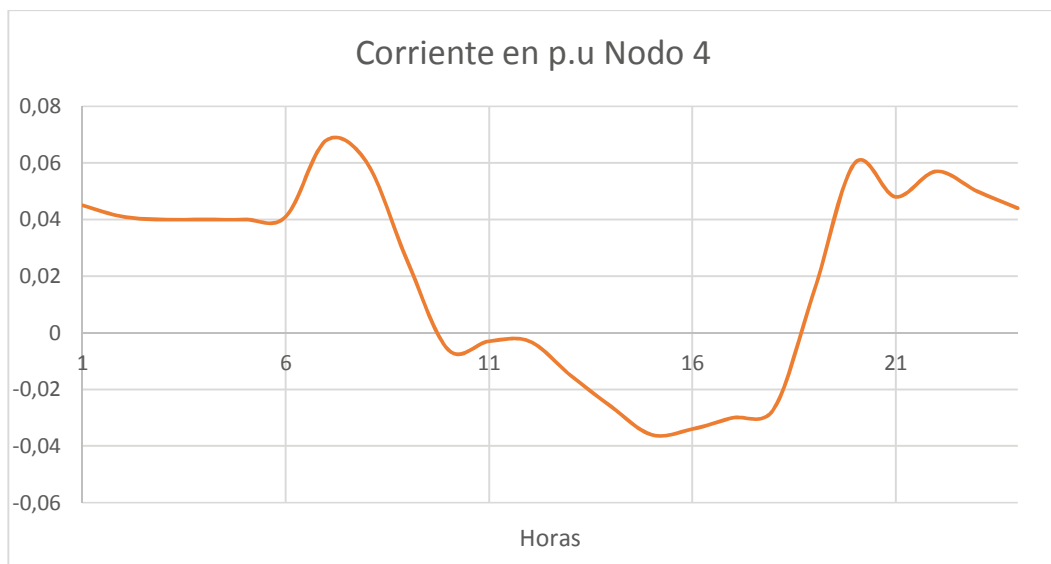


Figura 5-7: Flujo presentado en Nodo 4. (Imagen propia)

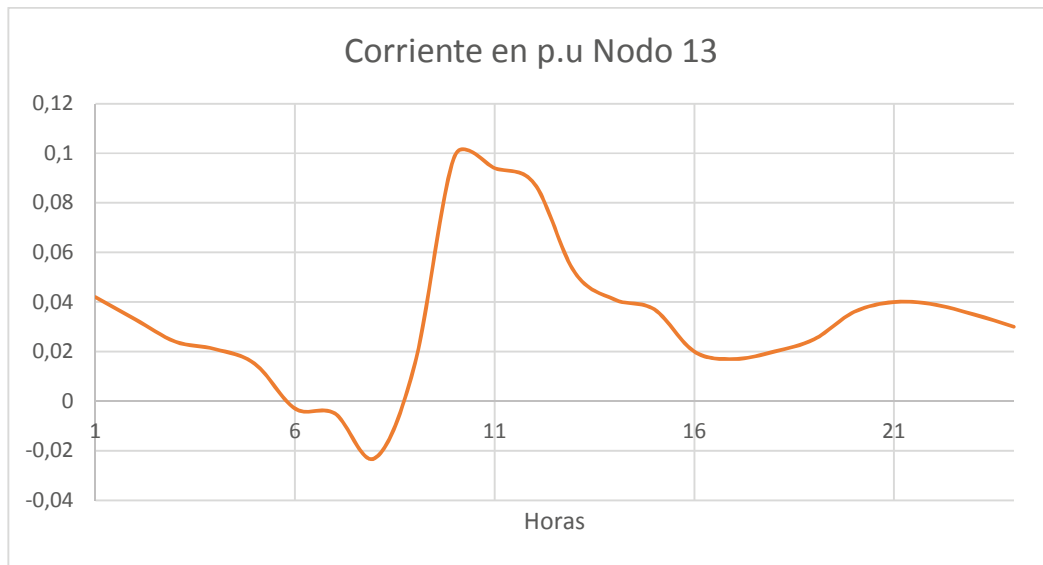


Figura 5-8: Flujo presentado en Nudo 13. (Imagen propia)

Es claro como la GD produce en ciertas ocasiones, flujos inversos en aquellos nodos. En la Figura 5-7 el flujo inverso se produce en horas de la madrugada, debido a que se encuentra generación eólica y baja demanda en aquellas horas. En las horas posteriores, se encuentran generando ambas centrales, tanto eólica como solar, y a la vez el sistema comienza a tomar mayor carga. Se puede apreciar un alza del valor de la corriente a las 10 hrs, debido a que la generación eólica se encuentra en 0, mientras que en todos los otros bloques se encuentra generando. Por otro lado el nodo 4 se ve enfrentado a los flujos de una GD Solar, presentando flujo inverso por algunas horas en las que GD se encuentra a su máxima generación.

El realizar cambios en la ubicación del regulador de tensión, dependiendo de la hora del día, no es una posibilidad, ya que estos dispositivos robustos cuentan con una compleja instalación, lo cual una vez ubicados en un punto del sistema, opera desde ese lugar las 24 hrs del día.

Es necesario determinar un criterio para definir en qué barra del sistema se localizara el regulador de tensión.

5.2.4 Selección de localización

El criterio a utilizar para localizar el regulador de tensión, consta de localizar el regulador de tensión, en las distintas soluciones posibles, durante las 24 hrs del día, es decir, 24 hrs localizado en la Barra 9, luego 24 hrs localizado en la Barra 10, así completar las soluciones óptimas. Luego de esto, se obtendrán las pérdidas que presenta el sistema durante el día, con cada posición del regulador de tensión.

Los resultados obtenidos en cuanto a las pérdidas obtenidas por cada localización del regulador, se encuentran en el Apéndice A.3. El siguiente gráfico muestra los resultados obtenidos en éste análisis.

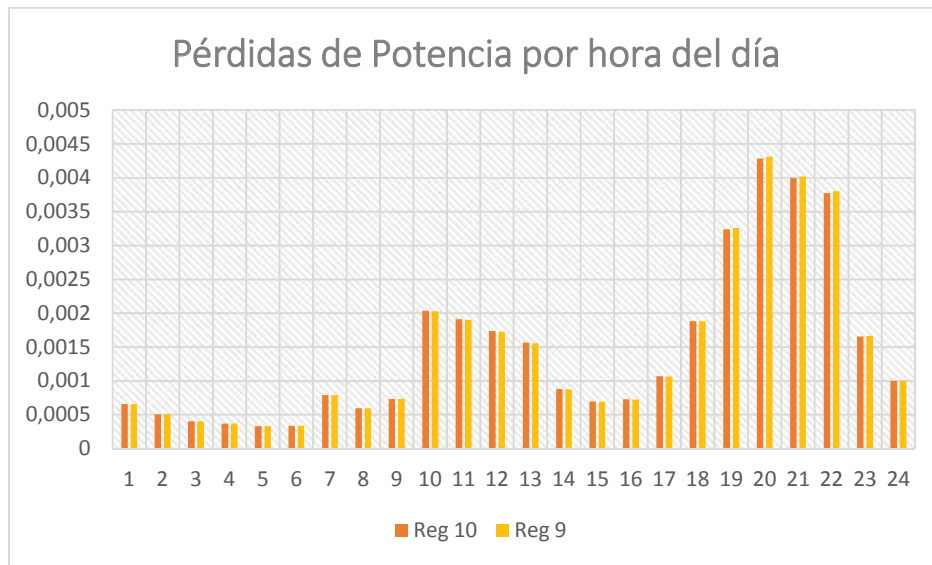


Figura 5-9: Pérdidas dependiendo de localización de regulador de tensión. (Imagen propia)

En este sistema, es claro que las variaciones de pérdidas dentro de las soluciones óptimas son similares, debido a que corresponde a un sistema pequeño. En la Tabla 5-2 se muestran los datos obtenidos en esta simulación.

Tabla 5-2: Alternativas de localización de 1 regulador de tensión

Barra de localización	Pérdidas totales de energía 24 (kWh)	Costo asociado a pérdidas de energía (USD/kWh)	Total USD	
10	3517,89	0,15	527,68	Solución propuesta
9	3526,67	0,15	529	

Como se observa en la tabla, si bien las pérdidas que se presentan en el sistema al ubicar en las distintas soluciones óptimas son similares, existe diferencia en el costo de oportunidad que estas incurrirán, lo cual se convierte en un costo significativo debido a que es un sistema que opera permanentemente. Es por esta razón que la solución propuesta, es localizar el regulador de tensión en la Barra 10, que es donde se presentan las menores pérdidas del sistema.

5.2.5 Localización de dos Reguladores de Tensión

Es común que los sistemas eléctricos posean más de un regulador de tensión, pero esto no significa que las empresas pueden disponer de ellos libremente, ya que poseen un elevado precio, por lo cual, siempre se debe analizar qué tan necesario es la incorporación de un nuevo dispositivo, evaluando bajo ciertos criterios que consideren el beneficio y costo de la instalación.

Como primera observación se presenta el sistema de 17 nodos, con el modelo de localización de reguladores de tensión cuando no se encuentra considerando la generación distribuida en la siguiente figura.

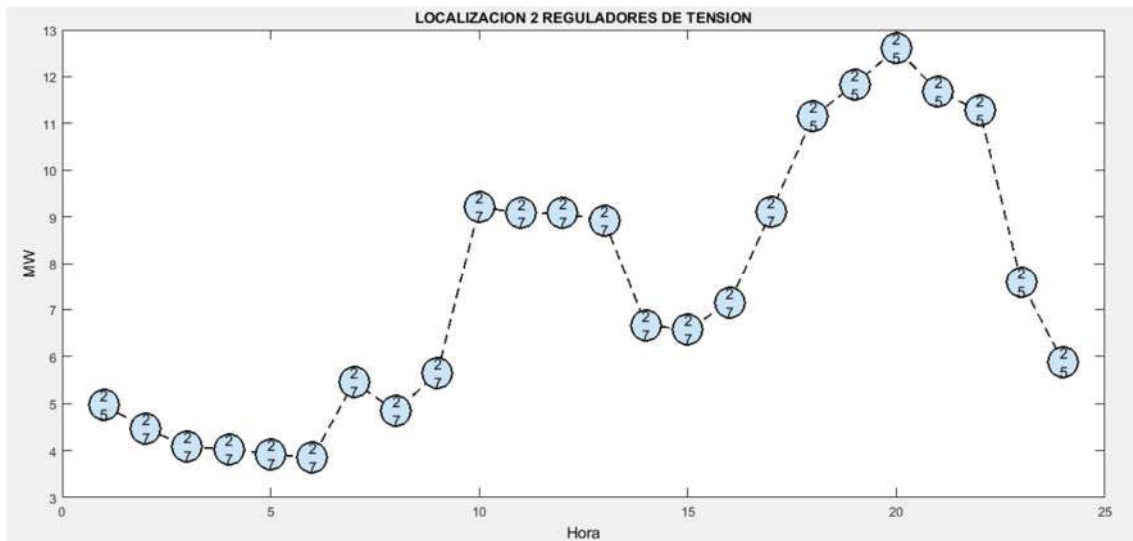


Figura 5-10: Localización 2 reguladores sin considerar GD

El sistema analizado por el modelo propuesto corresponde al sistema de diecisiete nodos, integrado por la misma generación distribuida anterior, que contaba con una potencia instalada de 3,6 MW y 2 MW respectivamente. Tras realizar el análisis de localización, se presentan los siguientes resultados.

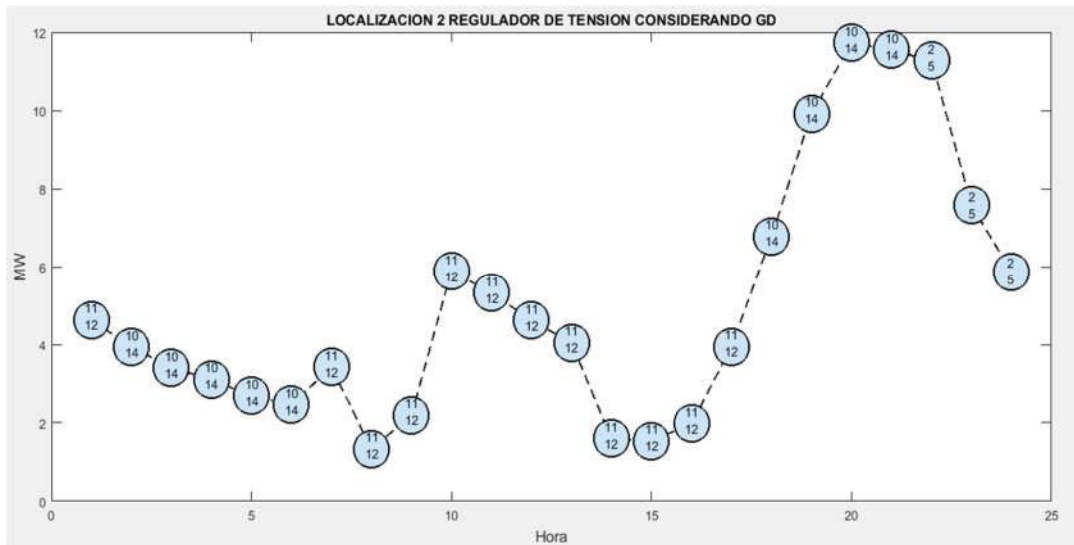


Figura 5-11: Localización de 2 reguladores de tensión. (Imagen propia)

Estos resultados muestran una clara tendencia a ubicar los reguladores de tensión en el sistema en principalmente dos configuraciones. Las configuraciones más claras corresponden a las Barras 11-12 y la segunda configuración a las Barras 10-14. Es claro que existe una mayor tendencia a pensar que la localización se realizará en la solución óptima que se muestra mayor cantidad de veces, pero hay que realizar el análisis ya que no siempre es el caso. En el Apéndice A.3.1 se muestran las distintas pérdidas que presenta el sistema, y las desviaciones de tensión correspondientes. Se aprecia que todas las desviaciones de tensión se encuentran dentro del rango establecido. Es por esto que para la elección de la solución óptima se consideran las pérdidas presentes en el sistema.

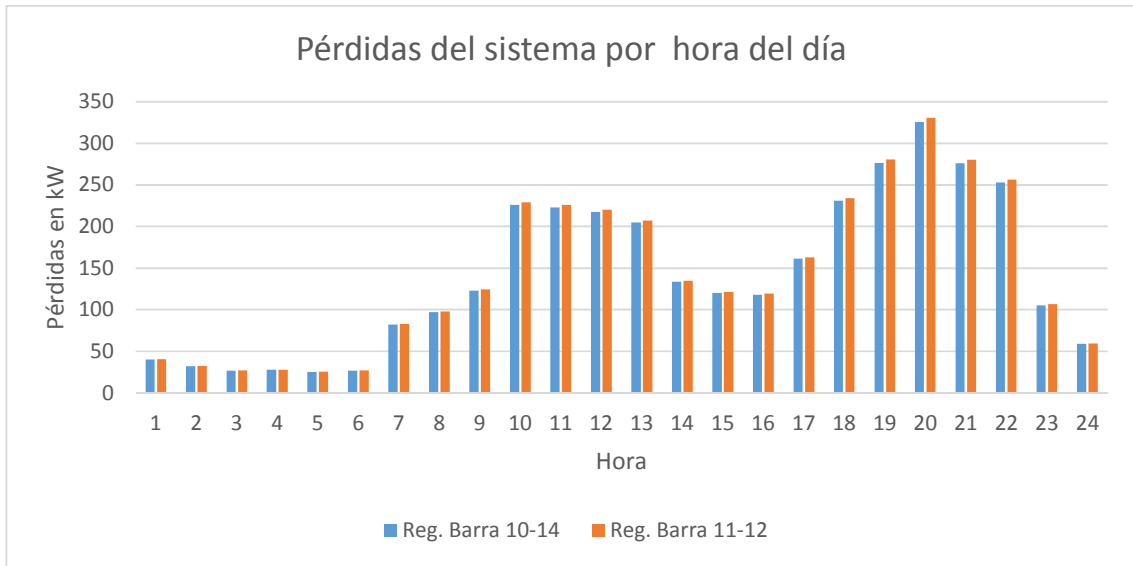


Figura 5-12: Pérdidas del sistema para cada tipo de configuración. (Imagen propia)

Tabla 5-3: Localización de reguladores de tensión

Barra de localización	Pérdidas totales de energía (kWh)	Costo asociado a pérdidas de energía USD	Total USD	
Barra 11-12	3410,433	0,15	511,56	Solución propuesta
Barra 10-14	3454,44	0,15	518,16	

La solución propuesta es localizar los reguladores de tensión en las barras 11-12. Claramente es la mejor solución ya que es donde se presentan las menores pérdidas de potencia y los niveles de tensión se mantienen dentro de los márgenes. Pero es necesario analizar qué tan conveniente es integrar dos reguladores de tensión al sistema.

Se tiene que:

$$\Delta \text{Pérdidas} = \text{Pérdidas 1 Reg} - \text{Pérdidas 2 Reg} \tag{5-1}$$

$$\Delta \text{Pérdidas} = 39,96 \text{ kWh/día} \tag{5-2}$$

El ahorro diario que se produce corresponde a:

$$\text{Ahorro diario} = 39,96 \frac{\text{kWh}}{\text{día}} * 0,15 \frac{\text{USD}}{\text{kWh}} = 5,99 \frac{\text{USD}}{\text{día}} \tag{5-3}$$

La inversión correspondiente a integrar un nuevo regulador de tensión se considera de aproximadamente USD 15.000.

Anualmente se ahorra aproximadamente USD 2000 y la inversión inicial es de USD15.000, por lo que se concluye que en este sistema de diecisiete nodos no es conveniente la integración de dos reguladores de tensión, ya que el retorno de la inversión correspondería aproximadamente a 7 años.

5.3 Análisis Red Real de 59 Nodos

La siguiente red a analizar corresponde a una red eléctrica de 59 Nodos. Esta red corresponde a un alimentador rural de 70 km de extensión y posee una potencia instalada de 11 MVA. En la siguiente figura se aprecia el diagrama unilineal del sistema de 59 nodos. [38]

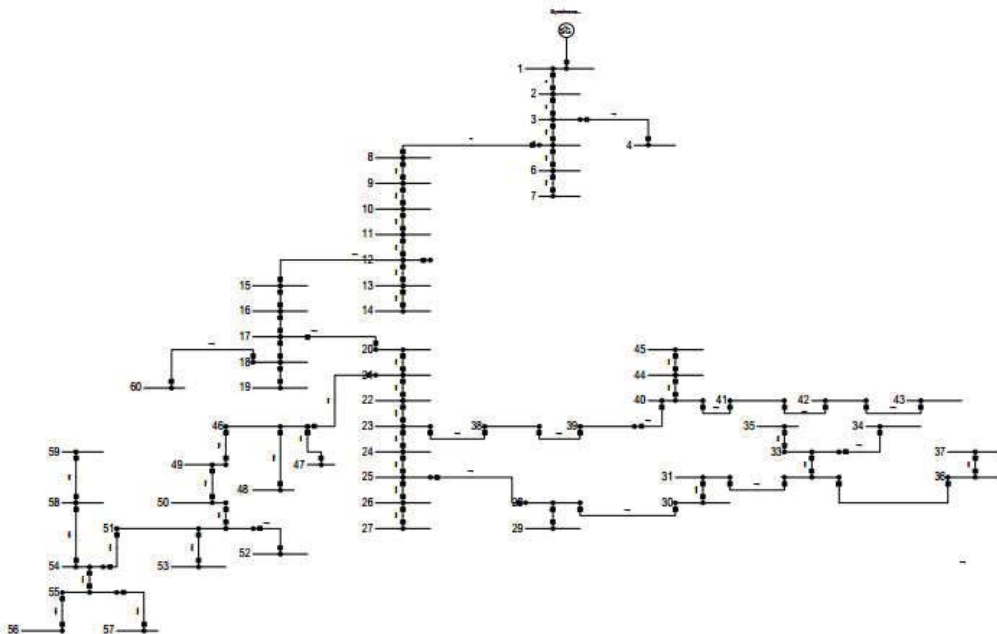


Figura 5-13: Sistema eléctrico de 59 nodos.(Imagen propia)

Esta red cuenta con cargas del tipo residencial, alumbrado público, cargas comerciales, cargas constantes, pero principalmente una gran cantidad de carga que corresponde al tipo industrial, que en su conjunto corresponden a 4,6 MVA instalados en el sistema. Posee dos cargas de gran potencia, la mayor de estas corresponde a una carga del tipo industrial, ubicada en la Barra número 3, que consta de 2,4 MVA de potencia instalada, por otro lado, la segunda carga de gran potencia, corresponde igualmente a una carga de tipo industrial, ubicada en la Barra número 2, la cual tiene una potencia instalada de 1,34 MVA.

Además, para finalizar el sistema posee originalmente un Regulador de Tensión en la Barra 15. En la Figura 5-11 se aprecia el sistema donde se especifica la ubicación de las cargas más importantes de la red, así como la ubicación en el diagrama del regulador de tensión original.

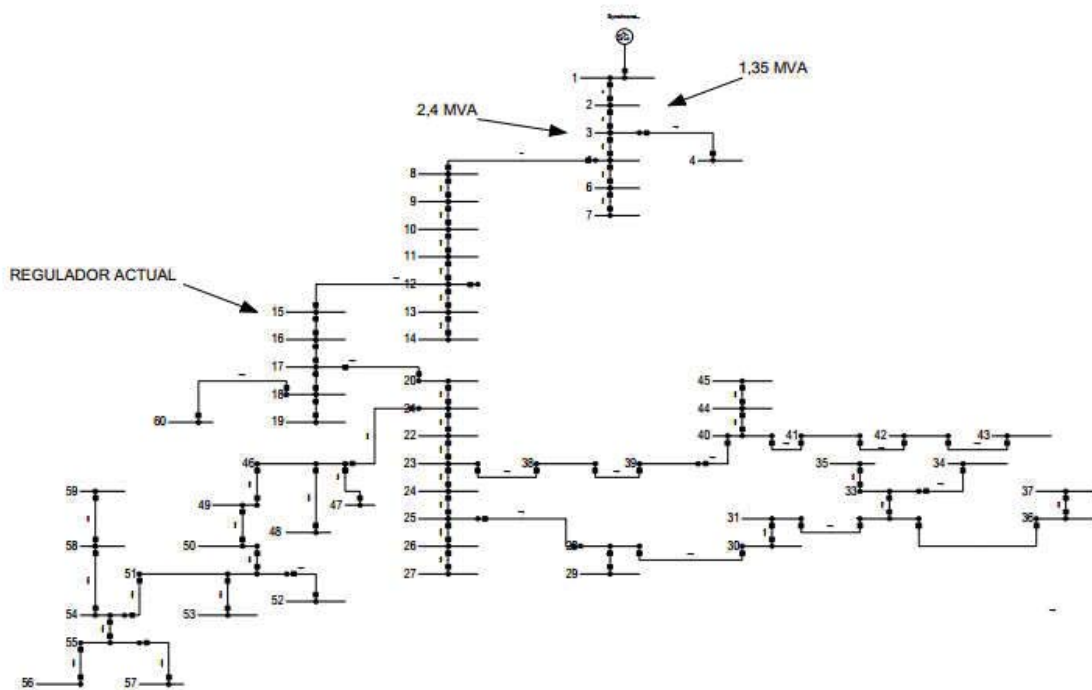


Figura 5-14: Visualización de cargas críticas y posición del regulador de tensión actual. (Imagen propia)

Para la incorporación de la GD, se utiliza el mismo comportamiento de la generación solar, como la generación eólica anterior, así como también el modelamiento de las cargas industriales, comerciales, residenciales, etc.

5.3.1 Localización de 1 y 2 Reguladores de Tensión sistema 59 Nodos.

La simulación se realizó, al igual que en el caso anterior, en ambiente Matlab, con flujo de potencia Newton Raphson modificado para la incorporación de la generación distribuida. Los resultados obtenidos, son los que se muestran en la Figura 5-15.

Es claro, que en comparación al resultado obtenido en el sistema de prueba de 17 nodos, se realizan muchos más cambios de posición del regulador de tensión, dependiendo de la hora en el que se encuentre el sistema. Esto sucede debido a que la penetración de la GD, varía constantemente a través del tiempo.

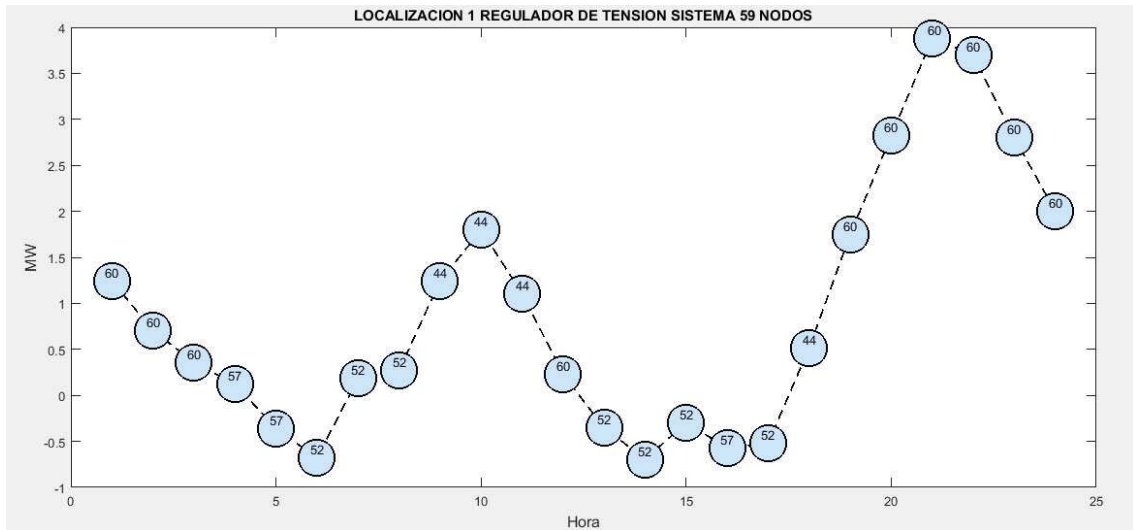


Figura 5-15: Resultados Obtenidos. (Imagen propia)

En el caso anterior se analizó las pérdidas que presentaba el sistema, si es que el regulador se ubicaba durante las 24 hrs en cada solución óptima obtenida. Las soluciones óptimas en este caso son mucho más diversas, lo cual lo ilustra la Figura 5-12.

Como se ha mencionado, en el caso anterior se ha elegido a través de las pérdidas del sistema la localización del regulador de tensión, y como se ha demostrado las diversas localizaciones que puede tener el regulador, es que se ha optado por otra forma de elección del resultado, esto, debido a que los tiempos de simulación en alimentadores de más nodos, lleva un tiempo considerable.

Es por esto que se define un índice que decidirá la localización del regulador de tensión. Primero definimos la posición óptima OP, del regulador de tensión, que corresponderá a la suma ponderada de las distintas posiciones del regulador de tensión en cada hora, definida por Ph (posición actual), mientras que H tomará el valor de 24, correspondiente a las 24 horas del día.

$$OP = \frac{\sum_{k=1}^H Ph(k)}{H} \tag{5-4}$$

El índice OP, permitirá saber la posición ideal del regulador de tensión y saber la desviación producida respecto al valor ideal, considerando la posición actual Pa, a través de la ecuación:

$$Desv = \frac{|Pa - OP|}{OP} \times 100\% \tag{5-5}$$

Los resultados obtenidos lo muestra la Tabla

Tabla 5-4: Solución propuesta 1 regulador de tensión en sistema de 59 Nodos

Localización Barra Óptima del Regulador	Localización Propuesta	Desviación	
54,7	60	9,68%	
54,7	57	4,20%	Solución Propuesta
54,7	52	4,93%	
54,7	44	19,56%	

Como se puede observar, la solución propuesta corresponde a ubicar el regulador de tensión en la barra 54, como lo muestra la Figura 5-13. Cabe destacar que no siempre el nodo que más se repita, dentro de las soluciones óptimas, será la mejor elección, todo dependerá del análisis y estudio que se realice. En este caso, la localización del regulador de tensión en el nodo 57 sólo se obtuvo en las 5 hrs y 16 hrs.

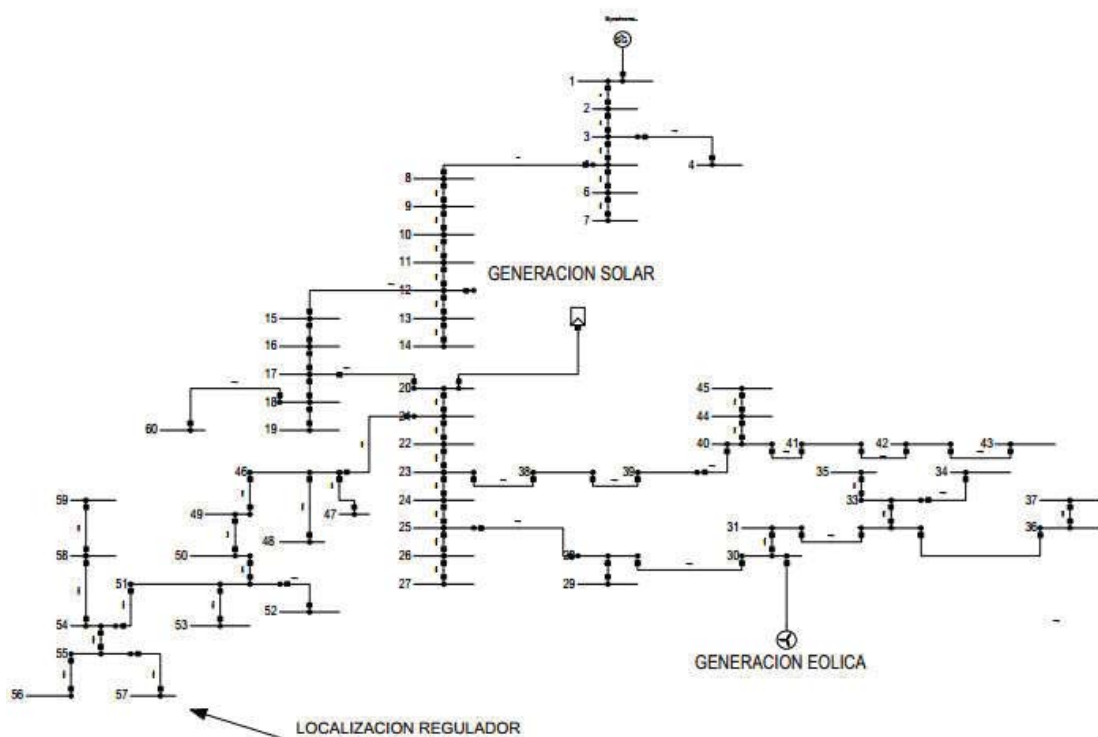


Figura 5-16: Localización de regulador de tensión. (Imagen propia)

Posteriormente, se realiza el mismo procedimiento, ahora para saber la localización de dos reguladores de tensión en el mismo sistema, de esta forma poder realizar comparaciones en cuanto a la ubicación de estos dispositivos dentro del sistema.

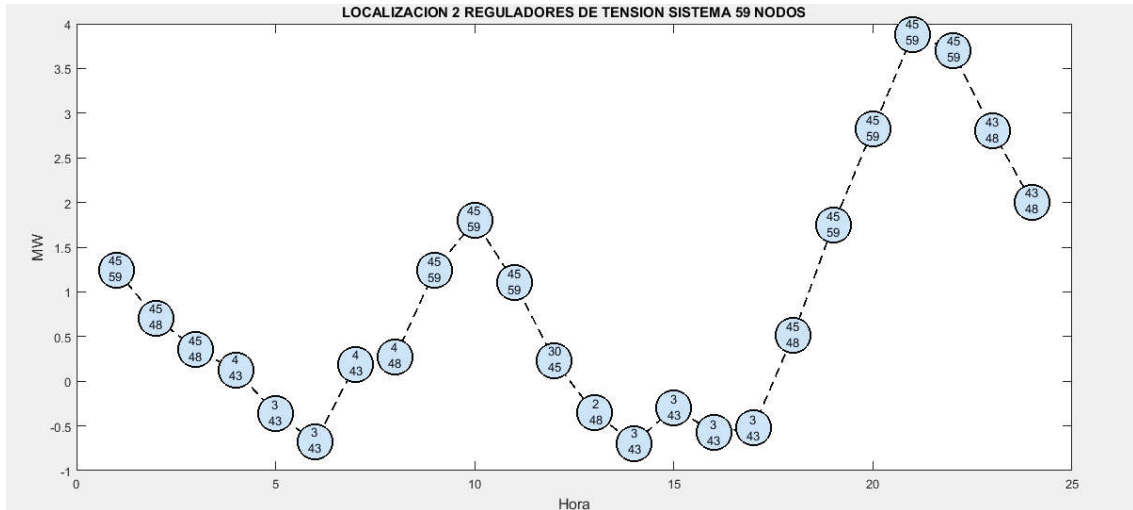


Figura 5-17: Localización de 2 reguladores de tensión en sistema de 59 Nodos. (Imagen propia)

Al igual que en el caso anterior, y como es de esperarse, sobre todo por la variación constante de demanda, también se produce la variación constante de la posición de los reguladores de tensión.

Cabe destacar y resaltar, que en comparación al caso anterior, un segundo regulador se integra al comienzo del alimentador. Esto se produce en las horas de flujo inverso total en el sistema, donde la subestación se comporta como una carga, por lo que el flujo de potencia sigue una trayectoria aguas arriba, así como también las caídas de tensión del sistema.

Para poder determinar la posición final del regulador, al igual que en el caso anterior, se utilizara el índice de la posición óptima del regulador.

Tabla 5-5: Localización de 2 Reguladores de Tensión en sistema de 59 Nodos

Localización Barra Optima del Regulador	Localización Propuesta	Desviación	
36,6-49,87	45-59	22,9-15,47	
36,6-49,87	45-48	22,9-3,7	
36,6-49,87	4-43	89-13,77	
36,6-49,87	3-43	91,8-13,77	
36,6-49,87	4-48	89-3,7	
36,6-49,87	30-45	18,03-9,76	
36,6-49,87	43-48	13,77-3,7	Solución Propuesta

La solución escogida corresponde a localizar en las barras 43-48, lo cual coincide con la localización óptima de bastantes horas del día. En comparación a los resultados obtenidos para la localización de 1 solo regulador, se puede concluir que el segundo regulador comienza a cambiar de posición reiteradamente, dependiendo de la penetración de GD, así como de las cargas presentes que se tengan en ese tiempo, pudiendo regular en una hora en un extremo del alimentador, y para la otra hora, cuando entra la GD, regular en una zona distinta del alimentador.

En la Figura se puede visualizar, en qué posición quedaría localizado los reguladores de tensión, considerando la Generación Distribuida incorporada.

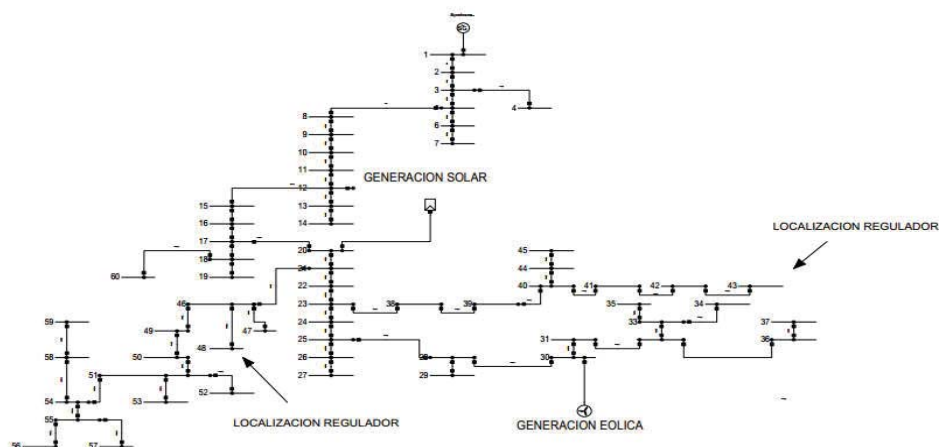


Figura 5-18: Localización de 2 reguladores de tensión en sistema de 59 Nodos. (Imagen propia)

Discusión y conclusiones

Las redes de distribución eléctrica como son conocidas tradicionalmente, se encuentran en un proceso de transformación a sistemas que trabajan de forma más eficiente e inteligente, incorporando tecnologías y metodologías científicas para la planificación, diseño y operación de sus sistemas. Así como también es claro el aporte a la generación eléctrica que realizan las GD, tanto a niveles técnicos como económicos, descentralizando el mercado, ya que la generación no provendrá exclusivamente de las grandes generadoras y aportando con diversos beneficios a las redes eléctricas. Es necesario el análisis de los elementos tradicionales que componen los sistemas de distribución bajo operación y en presencia de generación distribuida, con el objetivo de realizar estudios y estrategias prácticas en cuanto a la mejora en el diseño y planificación del sistema.

Los dispositivos regulantes de tensión, actualmente se ven enfrentado a distintos problemas de funcionamiento y una de las causas de este problema son los flujos inversos de potencia. Como se demostró en este trabajo, si bien los reguladores poseen funciones para actuar bajo flujos inversos de potencia, no poseen la posibilidad de regular el lado contrario al punto de regulación, es decir, en el primario del regulador. Si bien este funcionamiento es posible en los reguladores reales, no se logra con un ajuste del funcionamiento, si no que se requiere una modificación física del aparato, incorporando sensores, TP,TC, entre otros ajustes.

Por otro lado la optimización en las redes de distribución eléctrica es esencial, debido a los altos costos de inversión que se tienen en ésta área, se hace necesario la optimización al máximo de los recursos, donde, las herramientas computacionales desarrolladas cumplen un rol fundamental. Además, es imperante la utilización sistemas computacionales dedicados a la optimización de redes eléctricas, ya que los software comerciales de ingeniería eléctrica desarrollados, se ven un tanto limitado y enfocado al análisis de estudio de proyectos, por lo que es necesario un mayor trabajo para la optimización a través de ellos.

Estos últimos años, ha ido creciendo la discusión de cómo los aparatos eléctricos se deben enfrentar a la incorporación de la generación distribuida y las investigaciones respecto a esta problemática son cada vez más. El estudio específico de los reguladores de tensión ya ha sido un tema de estudio amplio, donde distintos autores proponen la mejor forma de enfrentar este crecimiento de GD. Si bien, los distintos autores poseen su propia perspectiva del problema, muchos convergen en que el funcionamiento y propiedad esencial del regulador de tensión

corresponde a lo que se le denomina compensación de caída de línea LDC. Con la incorporación de esta función el regulador de tensión tiene la propiedad de recorrer la línea, regulando distintos puntos, dependiendo de los parámetros seleccionados por el usuario y corresponde a la herramienta fundamental para controlar los flujos inversos de potencia que produce la GD.

En cuanto a la generación distribuida en sí, se realizó un modelamiento lo más fiel a lo que son datos reales. Esto con ayuda de plataformas que entregan los datos de generación programados y en tiempo real de los distintos sistemas eléctricos que se encuentran en operación.

Los resultados obtenidos dejan en claro que frente flujo inverso de potencia, la localización del dispositivo será en lugares donde la tensión se vea disminuida sin embargo, regulará desde el secundario aguas arriba, ubicándose en los extremos de los alimentadores.

Es claro, que la generación distribuida posee muchas ventajas y esto ha queda demostrado en el presente trabajo. Gracias a la GD es posible disminuir las pérdidas de los sistemas, disminuir las desviaciones de tensión que se producen, siempre y cuando la incorporación de la generación distribuida sea controlado, es decir, que se realicen los estudios pertinentes antes de entrar en operación, ya que se debe asegurar la calidad de servicio en los usuarios y evitar los efectos adversos que puede provocar la generación distribuida. Sin embargo, es claro que realizando las consideraciones respectivas y la mejor localización de la GD, junto con los reguladores de tensión, convierte a un sistema con altos estándares de calidad de servicio.

Bibliografía

- [1] J. Juárez, *Sistemas de distribución de energía eléctrica*, México, 1995.
- [2] T. A. Short, *Electric Power Distribution*, 2004.
- [3] CNE, *Comision Nacional de Energía*, Santiago, Chile, 2013.
- [4] C. A. C. C. Jorge E. Mendoza, «Multiobjective Location of Automatic Voltage Regulators in a Radial Distribution Network Using a Micro Genetic Algorithm,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 22, 2007.
- [5] C. P. Series, *Voltage Regulator Catalog Data*, 2015.
- [6] R. W. Schlie, «Single-Step Voltage Regulator Application,» *AIEE*, 1951.
- [7] C. P. S. Eaton, *How Step-Voltage Regulators Operate*, Pittsburgh, 2005.
- [8] J. D. D. H. G. Peppersman, «Distributed Generation: definition, benefits and issues,» *Energy Policy*, vol. 33, pp. 787-798, 2005.
- [9] D. B. Peter Dondi, «Network integration of distributed power generation,» *Journal of Power Sources*, 2002.
- [10] T. Ackermann, «Distributed generation: a definition,» *Electric Power System Research*, 2001.
- [11] R. B. Ernesto Ávila, *Energías sustentables para Chile*, Santiago de Chile, 2010.
- [12] C. N. d. Energía, «CNE,» [En línea]. Available: www.cne.cl.
- [13] P. Chiradeja, «An Approach to Quantify the Technical Benefits of Distributed Generation,» *IEEE*, 2004.

- [14] R. A. N. Jenkins, *Embedded Generation*, The Institution of Electrical Engineers, 2000.
- [15] C. V. Ríos, *Comparativa en métodos probabilísticos en la búsqueda de la localización y tamaño óptimo de la generación distribuida en redes de media tensión*, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2015.
- [16] CNE, *Decreto Supremo 327*, Santiago, Chile año 2008.
- [17] CNE, *Decreto Supremo 244*, Santiago, Chile año 2015.
- [18] IEEE, *Standard for Distributed Resources Interconnected with Electric Power Systems*, 2002.
- [19] C. P. S. Ljubomir Kojovic, «Impact Of DG and Voltage Regulator Interaction on Distribution System,» *17^a International Conference on Electricity Distribution*, U.S.A. 2003.
- [20] D. Ranamuka, «Examining the interaction between DG units and Voltage Regulating Devices for Effective Voltage Control in Distribution System,» *IEEE*, 2015.
- [21] C. P. S. Eaton, *CL-7 series control installation, operation, and maintenance instructions*, 2016.
- [22] P. R. M. Pardalos, *Handbook of Applied Optimization*, Oxford University Press, 2000.
- [23] J. R. G. Puchinger, *Combining Metaheuristics and Exact Algorithms in Combinatorial Optimization: A Survey Classification*, SpringerVerlag Lecture Notes in Computer Science 3562, 2005 pp. 41-53.
- [24] A. Ramos, *Modelos Matemáticos de Optimización*, Madrid: Universidad Pontificia Comillas, 2010.
- [25] X.-S. Yang, *Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Application*, Wiley, 2010.
- [26] S. D. Xin-She Yang, «Cuckoo search: recent advances and applications,» *Neutral Comput and Applic*, 2013.
- [27] R. A. Blum C., «Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison,» *ACM Computing Surveys* , 2003.
- [28] R. B. Navarro, *Meta-heurísticas Híbridadas para Optimización*, Almería, 2006.
- [29] S. G. C. V. M. Kirkpatrick, «Optimization by Simulated Annealing,» *Science* 220, 1983.
- [30] F. L. M. D. K. Glover, *Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems*, Londres: C.R. Reeves, 1993.

- [31] S. M. N. T. E.-G. Cahon, «Paradiseo: a Framework for the Flexible Design of Parallel and Distributed Hybrid Metaheuristics,» *Journal of Heuristics* 10(3), 2004.
- [32] R. L. M. G. F. Marti, «Principles of Scatter Search, European Journal of Operations Research,» 2006.
- [33] X.-S. Yang, Engineering Optimization, An Introduction with Metaheuristic Applications, New Jersey: Wiley-BlackWell, 2010.
- [34] X.-S. Y. a. S. Deb, «Multiobjective Cuckoo Search for Design Optimization,» *Computers & Operations Research*, vol. vol. 40, 2013.
- [35] D. P. Rini, «Particle Swarm Optimization: Technique, System and Challenges,» *International Journal of Computer Applications (0975 – 8887)*, vol. vol. 14, 2011.
- [36] D. M. R. L. M. L. E. L. a. J. C. V. J. Mendoza, «Optimal location of voltage regulators in radial distribution networks using genetic algorithms,» de *15th Power Systems Computation Conf.*, Bélgica, 2005.
- [37] «Multiobjective Location of Automatic Voltage Regulators in a Radial Distribution Network Using a Micro Genetic Algorithm,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, vol. VOL. 22, nº 1, 2007.
- [38] H. E. P. Jorge E. Mendoza, «Automatic voltage regulators siting in distribution systems considering hourly demand,» *ELSEVIER*, 2010.
- [39] S. S. R. P.V.V. Rama Rao, «Voltage regulator placement in radial distribution system using plant growth simulation algorithm,» *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. Vol. 2, nº 6, 2010.
- [40] S. H. Jangamshetti y S. A. Dolli, «Modeling and Optimal Placement of Voltage Regulator for a Radial System,» de *2012 International Conference on Power, Signals, Controls and Computation*, Thrissur, Kerala, India, 2012.
- [41] P. U. Reddy, M. L. Reddy y S. Sivanagaraju, «Optimal location of voltage regulators in unbalanced radial distribution system for loss minimization using particle swarm optimization,» de *International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET)*, Mylavaram, Andhra Pradesh, India, 2012.
- [42] S. P. Ghanegaonkar y V. N. Pande, «Coordinated optimal placement of distributed generation and voltage regulator by multi-objective efficient PSO algorithm,» de *IEEE Workshop on Computational Intelligence: Theories, Applications and Future Directions (WCI)*, Kanpur, India, 2015.

- [43] T. A. H. Kobayashi, «SVR optimal placement problem in distribution network with Distributed Generators,» de *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, California, USA, 2012.
- [44] T. Shiino y H. Aoki, «Optimal placement of SVRs considering multiple loads,» de *2012 Wiley Periodicals, Inc. Electr Eng*, Japan, 2012.
- [45] N. Visali, D. Srinivasan y N. Sreenivasulu, «Loss Reduction in Radial Distribution Systems by Optimal Voltage Regulator Placement Using Fuzzy Logic,» de *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*, San Francisco, USA, 2016.
- [46] M.S.Giridhar y S.Sivanagaraju, «Optimal Placement of AVR in RDS Using Modified Cuckoo Search Algorithm,» *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, vol. 11, 2016.
- [47] S. R. Salkuti y Y. H. Lho, «Optimum Location of Voltage Regulators in the Radial Distribution Systems,» *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 17, 2016.
- [48] Y. Miyazaki y S. Naoi, «A study on the placement and model selection of voltage regulators in distribution network,» de *CIREN Workshop*, Helsinki, Finland, 2016.
- [49] J. B. A.L.M. Mufaris, «Determination of dynamic line drop compensation parameters of voltage regulators for voltage rise mitigation,» *International Conference on Clean Electrical Power (ICCEP), Taormina, Italia*, 2015.
- [50] A. D. T. L. Kashem M. Muttaqi, «A novel tuning method for advanced line drop compensator and its application to response coordination of distributed generation with voltage regulating devices,» *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52, nº 2, 2016.
- [51] A. D. T. L. Kashem M. Muttaqi, «A coordinated Voltage Control Approach for Coordination of OLTC, Voltage Regulator, and DG to regulate voltage in a distribution feeder,» : *IEEE Transactions on Industry Applications* , vol. 51, nº 2, 2015.
- [52] J. E. K. T. E. Kim, «Voltage regulation coordination of distributed generation system in distribution system,» de *Power Engineering Society Summer Meeting*, Vancouver, BC, Canada, 2001.
- [53] H. P. Díaz, Restauracion de servicio en redes de media tension considerando la operacion en isla de la geeneracion distribuida mediante la utilizacion de algoritmos geneticos, Valparaiso, Chile: Pontificia Universidad Católica de Valparaiso-Escuela de Ingeniería Eléctrica, Septiembre 2014.
- [54] I. FisterJr. y X.-S. Yang, «Cuckoo Search: A Brief Literature Review,» de *Studies in Computational Intelligence*, vol. 516, 2014, pp. 49-62.

- [55] J. Vilches, *Diseño e implementacion del algoritmo cuckoo search para ajuste de funciones de seleccion*, Valparaíso, Chile: Pontificia Universidad Católica de Valparaiso, 2015.
- [56] X.-S. Yang y S. Deb, «Cuckoo Search via Levy Flights,» de *World Congress on Nature \& Biologically Inspired Computing*, India, 2009.
- [57] A. D. T. L. K. M. Muttaqi, «An algebraic approach for determination of DG parameters to support voltage profiles in radial distribution networks,» *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, n° 2, 2014.

A Apéndice

A.1 Tabla Resumen de Revisión Bibliográfica

En este apéndice se presenta la tabla que corresponde a la revisión bibliográfica desarrollada.

Se muestran principalmente detalles de algunos de los documentos analizados, como lo es la función objetivo, las restricciones formuladas y los métodos de optimización utilizados en el desarrollo del problema.

Función Objetivo											
Max. ahorro neto				X					X	X	X
Desviaciones de Tensión	X	X	X		X		X	X	X		X
Reducción Pérdidas totales	X	X	X			X			X		
Desviaciones de corriente y voltaje de GD							X	X			X
Estabilidad de potencia									X		
Operación de taps									X		

Restricciones												
Límites de Tensión	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Límites de corriente	X	X	X				X	X				
Restricción de cambios de tap							X	X	X			X
Método												
PGSA				X								
Algoritmo propuesto					X							
Algoritmo Genético	X		X				X	X				
Micro A.G.		X										
PSO						X			X			
Back Tracking										X		X
Fuzzy Logic										X		X
MCSA											X	
Mono-Objetivo	X		X	X	X	X	X	X	X	X		X
Multi-Objetivo		X									X	
Referencias												
Año	2005 [36]	2007 [37]	2010 [38]	2010 [39]	2012 [40]	2012 [41]	2012 [43]	2012 [44]	2015 [42]	2016 [45]	2016 [46]	2016 [47]

A.2 Modelamiento de cargas sistema diecisiete nodos

A continuación se muestran los modelamientos de cargas para el sistema de diecisiete nodos.

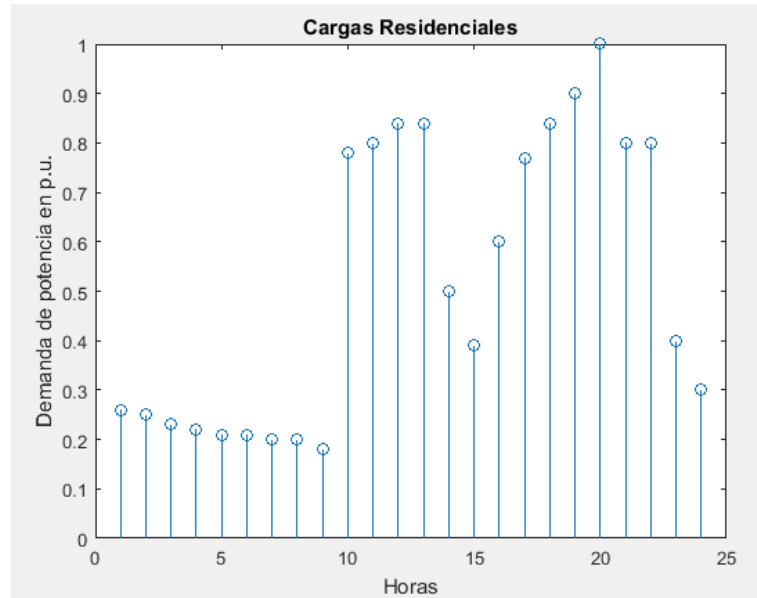


Figura A- 1: Cargas residenciales. (Imagen propia)

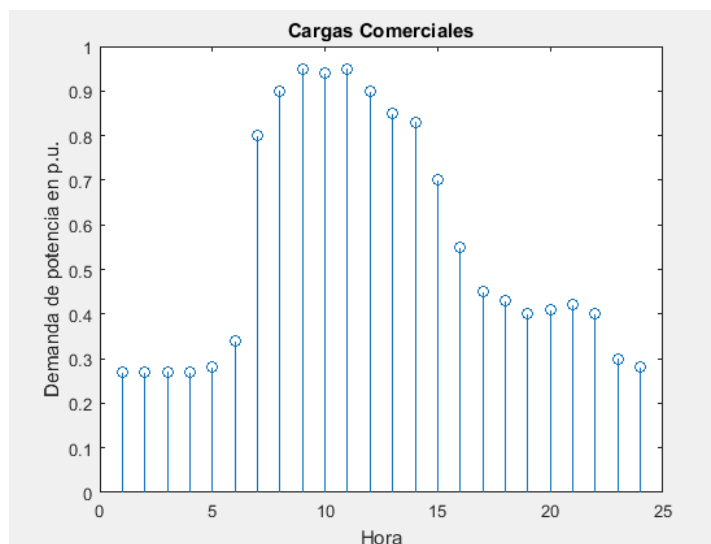


Figura A- 2: Cargas comerciales. (Imagen propia)

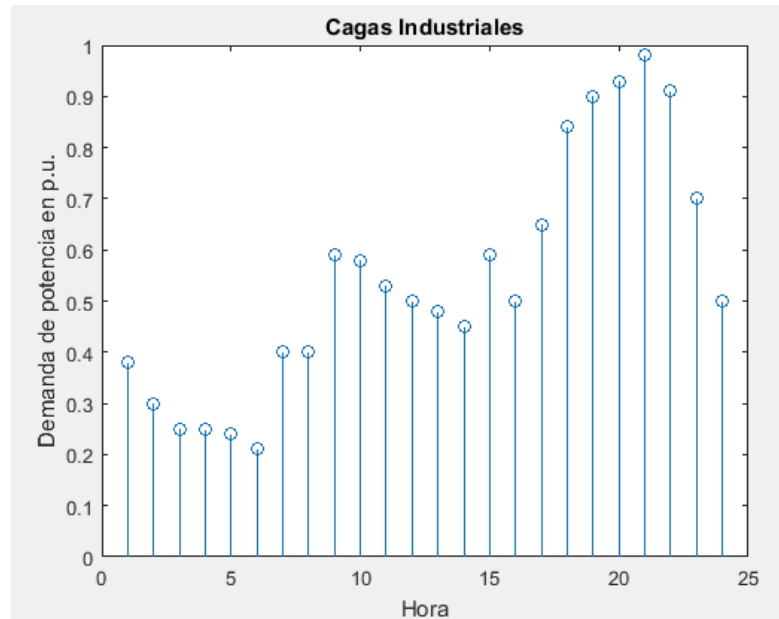


Figura A- 3: Cargas Industriales. (Imagen propia)

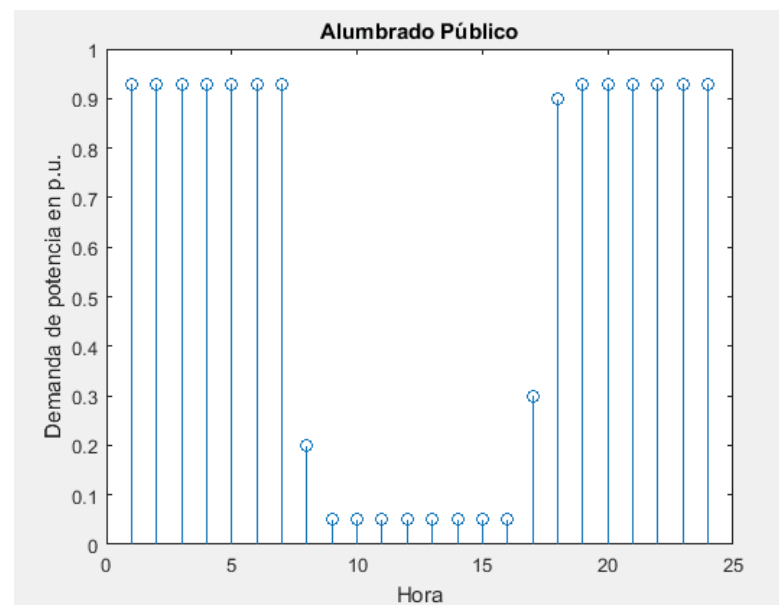


Figura A- 4: Alumbrado público. (Imagen propia)

A.3 Resultados de localizacion de un regulador en sistema Civanlar

Tabla A- 1: Localización de regulador en Barra 10

Reg.	hora	Pérdidas en p.u.
10	1	0,0006568
10	2	0,00050544
10	3	0,000404
10	4	0,0003681
10	5	0,000332
10	6	0,0003376
10	7	0,0007916
10	8	0,0005988
10	9	0,0007383
10	10	0,002035
10	11	0,00191
10	12	0,001735
10	13	0,001564
10	14	0,0008773
10	15	0,000693
10	16	0,000731
10	17	0,001072
10	18	0,001882
10	19	0,003241
10	20	0,004286
10	21	0,003994
10	22	0,003775
10	23	0,001659
10	24	0,001

Tabla A- 2: Localización de regulador en Barra 9

Reg.	hora	Pérdidas en p.u.
9	1	0,000658364
9	2	0,000506312
9	3	0,000405272
9	4	0,000368643
9	5	0,000332652
9	6	0,000338078
9	7	0,000790685
9	8	0,000596933
9	9	0,000735852
9	10	0,00202729
9	11	0,00190082
9	12	0,001725021
9	13	0,001554949
9	14	0,000873837
9	15	0,000691132
9	16	0,000728999
9	17	0,00106913
9	18	0,00188182
9	19	0,00325807
9	20	0,00431391
9	21	0,00402342
9	22	0,00380194
9	23	0,00166749
9	24	0,0010035

Tabla A- 3: Localización de regulador en Barra 14

Reg.	hora	Pérdidas en p.u.
14	1	0,000658308
14	2	0,000506316
14	3	0,000405287
14	4	0,000368635
14	5	0,000332621
14	6	0,000338026
14	7	0,000789992
14	8	0,000596558
14	9	0,000735746
14	10	0,00202827
14	11	0,001901213
14	12	0,0017251
14	13	0,001554942
14	14	0,000873396
14	15	0,000691291
14	16	0,000729539
14	17	0,001070756
14	18	0,0018835
14	19	0,00325785
14	20	0,00431471
14	21	0,0040227
14	22	0,00380181
14	23	0,0016669
14	24	0,0010033

A.3.1 Resultados localización de dos Reguladores de Tensión sistema Civanlar

Tabla A- 4: Localización de regulador de tensión en Barras 11-12

Barra Reg.	Hora	Pérdidas en kW
11-12	1	40,083
11-12	2	32
11-12	3	26,74
11-12	4	27,67
11-12	5	25,33
11-12	6	26,74
11-12	7	82,02
11-12	8	97,09
11-12	9	122,9
11-12	10	225,94
11-12	11	222,93
11-12	12	217,55
11-12	13	204,58
11-12	14	133,36
11-12	15	120,09
11-12	16	117,83
11-12	17	161
11-12	18	230,83
11-12	19	276,74
11-12	20	325,86
11-12	21	276,26
11-12	22	253,02
11-12	23	105,14
11-12	24	58,73

Tabla A- 5: Localización de Reguladores de tensión en Barras 10-14

Barras Reg.	Hora	Pérdidas en kW
10-14	1	220,46
10-14	2	207,24
10-14	3	134,91
10-14	4	121,59
10-14	5	119,21
10-14	6	163,11
10-14	7	234,29
10-14	8	106,3
10-14	9	40,44
10-14	10	32,28
10-14	11	26,96
10-14	12	27,9
10-14	13	25,54
10-14	14	26,95
10-14	15	82,85
10-14	16	98,02
10-14	17	59,31
10-14	18	124,39
10-14	19	229,1
10-14	20	226
10-14	21	280,2
10-14	22	256,47
10-14	23	106,3
10-14	24	280,55

A.4 Sistema de Prueba de 59 Nodos

A continuación se muestra el diagrama el comportamiento de las cargas considerado para el análisis

Tabla A- 6: Información del sistema eléctrico de 59 Nodos

Barra i	Barra j	Resistencia [Ohm]	Reactancia [Ohm]	Potencia Activa [MW]	Potencia Reactiva [MVar]
1	2	45,681	23,549	1,1425	0,6713
2	3	12,666	6,529	2,2895	0,7525
3	4	68,523	19,056	0,038	0,0125
3	5	10,949	5,644	0,852	0,639
5	6	90,435	25,149	0,2	0,15
6	7	50,255	13,976	0,036	0,027
5	8	15,077	7,772	0,56	0,42
8	9	14,383	7,414	0,048	0,036
9	10	22,89	11,8	0,3039	0,228
10	11	20,372	10,502	0,1546	0,1159
11	12	19,655	10,132	0,0152	0,0114
12	13	64,351	17,896	0,052	0,039
13	14	28,825	8,016	0,016	0,012
12	15	19,879	5,528	0,024	-0,282
15	16	85,089	23,662	0,1468	0,1101
16	17	19,322	5,373	0	0
17	18	78,161	21,736	0,044	0,033
18	19	66,189	18,406	0,0344	0,0258
17	20	75,646	21,037	0,116	0,087
20	21	97,242	27,042	0,9152	0,6864
21	22	26,919	13,877	0,0504	0,0378
22	23	28,269	14,573	0,0212	0,016
23	24	27,293	14,07	0,036	0,027
24	25	29,986	15,458	0,0424	0,0318
25	26	21,536	5,989	0,032	0,024
26	27	47,032	13,079	0,0172	0,0129
25	28	26,064	13,437	0,02	0,015
28	29	47,454	13,197	0,032	0,024
28	30	15,191	7,831	0,0466	0,035
30	31	22,348	11,521	0,0632	0,0474
31	32	26,189	7,283	0,008	0,006
32	33	21,22	5,901	0,004	0,003
33	34	77,83	21,644	0,04	0,03

33	35	24,518	6,818	0,0555	0,0416
32	36	19,653	5,465	0,032	0,024
36	37	28,569	7,945	0,0224	0,0168
23	38	45,707	12,711	0,0928	0,0696
38	39	53,297	14,821	0,0554	0,0416
39	40	23,659	6,579	0,06	0,045
40	41	37,078	10,311	0,0144	0,0108
41	42	335,01	93,163	0,1688	0,1266
42	43	74,261	20,651	0,152	0,114
40	44	39,502	10,985	0,0896	0,0672
44	45	61,821	17,192	0,1752	0,1314
21	46	37,593	19,38	0,0108	0,0081
46	47	41,792	11,622	0,0488	0,0366
46	48	40,316	11,211	0,024	0,018
46	49	43,628	22,491	0,114	0,0855
49	50	60,948	16,949	0,044	0,033
50	51	22,47	6,249	0,024	0,018
51	52	183,039	50,902	0,0384	0,0288
51	53	30,903	8,594	0,0296	0,022
51	54	29,141	8,104	0,0464	0,0348
54	55	29,216	8,125	0,0352	0,0264
55	56	57,394	15,961	0,0528	0,0396
55	57	58,629	16,304	0,0588	0,0441
50	58	119,471	33,224	0,1012	0,0759
58	59	132,272	36,784	0,0344	0,0258
18	60	67,303	18,716	0,1412	0,1059