



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA DE
VALPARAÍSO



Leonidas Muñoz Reyes

Algoritmo HBB-BC para Reconfiguración de Alimentadores Considerando Generación Eólica y Fotovoltaica

Informe Proyecto de Título de Ingeniero Civil Eléctrico



**Escuela de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Ingeniería**

Valparaíso, 27 de febrero de 2018



Algoritmo HBB-BC para Reconfiguración de Alimentadores Considerando Generación Eólica y Fotovoltaica

Leonidas Muñoz Reyes

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

Sr. Jorge Mendoza Baeza
Profesor Guía

Sr. Miguel López González
Segundo Revisor

Sr. Sebastian Fingerhuth Massmann
Secretario Académico

Valparaíso, 27 de febrero de 2018

Gracias a esas personas que siempre estuvieron presentes en esta importante etapa de mi vida, que a pesar de la distancia, siempre sentí su enorme apoyo y amor incondicional. Muchas gracias a mis padres, hermanas y amigos.

Agradecimientos

Agradezco a la hermosa familia que poseo, quienes han sido de gran importancia en cada paso que he realizado en mi vida. Agradezco que me brindaran un espíritu de humildad y esfuerzo, que sin ellos no habría podido superar las etapas de flaqueza que la vida pone en nuestros caminos. Agradezco a mi padre Leonidas y a mi madre Laura, que siempre mantuvieron las puertas abiertas a todos mis sueños, entregándome todo lo que fuera necesario para lograrlos. Agradezco a mis hermanas por hacer los días de mi vida distintos, por enseñarme que la vida es más que obtener un trabajo y por ser unas amigas incondicionales siempre.

A mis profesores Jorge Mendoza y Miguel López, quienes brindaron su apoyo y dedicación en el desarrollo del proyecto, enseñándome todo lo necesario para superar esta importante etapa y por sobre todo, entregarme la vocación de ser un profesional.

Agradezco a la familia de amigos que conocí en la universidad, gracias por la compañía en esos momentos de alegría y pena. Siempre los llevare en mis recuerdos.

Valparaíso, 27 de febrero de 2018

L.M.R

Resumen

La reconfiguración es una técnica que se desarrolla en la red de distribución de media tensión; esta consiste en modificar la estructura de la red utilizando los elementos de apertura, cierre y/o seccionadores propios de la misma, con el objetivo de mejorar importantes indicadores del sistema. Las empresas distribuidoras necesitan optimizar este proceso, porque se pueden identificar miles de posibles estructuras dentro de una red y es necesario encontrar una que aspire a ser óptima. Para tal fin, se realizará la optimización utilizando un método híbrido basado en la teoría de la creación del universo, llamado Big Bang – Big Crunch (HBB-BC).

En el presente proyecto, el problema de reconfiguración es abordado considerando la presencia de generadores distribuidos (GD) que pertenezcan al grupo de las energías renovables no convencionales (ERNC). El objetivo de este enfoque, es realizar el estudio considerando la variabilidad horaria de los aportes energéticos que tienen los generadores eólicos y fotovoltaicos dentro de la red de distribución. Para ello, fue necesario modelar el comportamiento de la red seccionando los alimentadores en sectores urbanos, residenciales e industriales; para así saber con certeza cuál es la demanda y generación en todo momento. Por lo tanto, la finalidad del proyecto es solucionar el problema de reconfiguración, considerando el particular funcionamiento de los medios de generación eólico y fotovoltaico.

Para la formulación del problema de optimización, se considera como objetivos minimizar las pérdidas activas y la desviación de tensión en los nodos, siendo la variable de decisión, el estado de los elementos de maniobra, protección y/o seccionamiento presentes en la red. Con esta formulación se desarrollará un algoritmo que utiliza el método HBB-BC para solucionar el problema de reconfiguración. Las simulaciones se realizarán en un sistema prueba llamado “Baran” y en una red real de 163 nodos, donde los resultados obtenidos permitirán contrastar el aportes que se obtiene los de los GD al momento de realizar al reconfiguración. Finalmente, para verificar que tan certeros son los resultados obtenidos por el algoritmo HBB-BC, se realizará una comparación con un trabajo anterior que busca el mismo fin.

Palabras claves: Redes de distribución, reconfiguración, optimización, HBB-BC, Generación distribuida (GD), fotovoltaica, eólico.

Abstract

The reconfiguration is a technique that develops in the structure of the medium tension, this consists of modifying the structure of the red one that uses the opening, closing and / or disconnecting elements of the same, with the aim of improving important indicators of the system. The distribution companies must optimize this process, because thousands of possible structures can be identified within a network and it is necessary to find one that is ideally optimal. For this purpose, optimization will be carried out using a hybrid method based on the creation theory of the universe, called Big Bang - Big Crunch (HBB-BC).

In this project, the problem was addressed considering the presence of distributed generators (DG) that belonged to the group of non-conventional renewable energies (NCRE). The objective of this approach is to carry out the study considering the hourly variability of the energy contributions that the wind and photovoltaic generators have within the distribution network. For this, it was necessary to model the behavior of the network by sectioning the feeders in urban, residential and industrial sectors; to know with certainty what is the demand and generation at all times. Therefore, in the present project the problem of reconfiguration will be solved, considering the particular operation of the wind and photovoltaic generation means.

For the formulation of the optimization problem, it is considered as objectives to minimize the active losses and the voltage deviation in the nodes, the decision variable being the state of the maneuver elements, protection and / or sectioning present in the network. With this formulation, an algorithm will be developed that uses the HBB-BC method to solve the problem of reconfiguration. The simulations will be carried out in a test system called "Baran" and in a real network of 163 nodes, where the results obtained will allow contrasting the contributions obtained from the GDs when making the reconfiguration. Finally, to verify how accurate the results obtained by the HBB-BC algorithm are, a comparison will be made with a previous work that seeks the same end.

Key words: Distribution network, reconfiguration, optimization, HBB-BC, distributed generation (DG), photovoltaic, wind.

Índice general

Introducción.....	1
Objetivos generales.....	4
Objetivos específicos	4
1 Redes de Distribución	5
1.1 Introducción del Capítulo	5
1.2 Generalidades.....	5
1.3 Clasificación de Cargas.....	6
1.4 Estructura de los sistemas de Distribución	7
1.5 Marco Regulatorio	8
1.5.1 Regulación de Tensión.....	8
1.6 Conclusión del Capítulo.....	8
2 Generación Distribuida.....	9
2.1 Introducción del Capítulo	9
2.2 Generalidades.....	9
2.3 Clasificación de Generadores Distribuidos	10
2.3.1 Por Capacidad.....	10
2.3.2 Por su forma de Generación	11
2.4 Ventajas de la Generación Distribuida	12
2.5 Desventajas de la Generación Distribuida	12
2.6 Marco Regulatorio de la Generación Distribuida	13
2.6.1 Normas de Operación	13
2.6.2 Normas de Transporte	13
2.7 Conclusión del Capítulo.....	14
3 Planteamiento del Problema de Reconfiguración	16
3.1 Introducción del Capítulo	16
3.2 Reconfiguración	16
3.3 Objetivos de la Reconfiguración.....	17
3.3.1 Pérdidas de Potencia Activa en Redes de Distribución.....	17
3.3.2 Desviación de tensión.....	18

3.4 Problemas Operacionales	19
3.5 Conclusión del Capítulo	19
4 Estado del Arte	20
4.1 Introducción del Capítulo	20
4.2 Métodos de Optimización Aplicados a Reconfiguración	20
4.3 Primeras Aplicaciones para Reconfiguración	21
4.4 Últimas Aplicaciones para Reconfiguración	23
4.5 Últimas Aplicaciones para Reconfiguración Considerando GD	25
4.6 Algoritmo Big Bang – Big Crunch	27
4.7 Conclusión del Capítulo	29
5 Método de Solución Propuesto	30
5.1 Introducción del Capítulo	30
5.2 Big Bang – Big Crunch (BB-BC)	30
5.3 Híbrido Big Bang – Big Crunch (HBB-BC)	31
5.4 Conclusión del Capítulo	32
6 Formulación del Problema de Reconfiguración	33
6.1 Introducción del Capítulo	33
6.2 Función Objetivo	34
6.3 Conclusión del Capítulo	36
7 Aspectos Preliminares a las Simulaciones	37
7.1 Introducción al capítulo	37
7.2 Variable de Decisión	37
7.3 Algoritmo Empleado para Realizar la Reconfiguración	38
7.4 Sistemas propuestos para Realizar Simulaciones	41
7.4.1 Asignación de Áreas de Distribución	43
7.4.2 Modelo de Curvas Diarias para Usuarios Típicos	44
7.5 Generadores Propuestos	47
7.5.1 Características y Ubicación de los GD	47
7.5.2 Modelo de Curvas Diarias para GD	48
7.6 Hipótesis	50
7.7 Software y Hardware de Simulación	50
7.8 Conclusión del capítulo	51
8 Simulaciones y Resultados	52
8.1 Introducción del Capítulo	52
8.2 Sistema de Prueba Baran	52
8.2.1 Simulaciones de Sistema de Prueba Baran	53
8.3 Sistema de Prueba Real Colo Colo	57
8.3.1 Simulaciones en Sistema de Prueba Colo Colo	58
8.4 Conclusiones del Capítulo	62

Discusión y conclusiones.....	63
Bibliografía	67
A Resumen Estado del Arte.....	74
A.1 Últimas Aplicaciones para Reconfiguración	74
A.2 Últimas Aplicaciones para Reconfiguración Considerando GD.....	75
B Datos Sistemas de Prueba	76
B.1 Sistema Baran.....	76
B.1.1 Datos de Línea.....	76
B.1.2 Datos de Carga	77
B.2 Sistema Real Colo Colo.....	78
B.2.1 Datos de Línea.....	78
B.2.2 Datos de Carga	83
C Resultados de las Simulaciones	88
C.1 Sistema Baran.....	88
C.2 Sistema Colo Colo.....	89

Introducción

Dentro de los últimos años, la energía eléctrica ha tomado un papel muy importante en la sociedad, y saber aprovecharla, es una tarea muy importante para todos. Esta energía que utilizamos, es obtenida mediante centrales de generación convencional y/o renovable, luego es trasladada a grandes distancias a través del sistema troncal, hasta finalmente ser recibida por las empresas distribuidoras de cada ciudad. Esta última etapa es la más complicada e importante de todas, porque es donde se realiza la mayor cantidad de inversiones en trabajos de ingeniería, diseño, construcción y operación; producto de las constantes modificaciones que se realizan dentro.

Las empresas de distribución, son las entidades que se encargan de administrar estos recursos energéticos y distribuirlos de manera eficiente en redes que contienen usuarios con cargas de diversas magnitudes. Por otro lado, son responsables de que el suministro eléctrico permanezca dentro de los estándares establecidos por la norma, evitando poner en riesgo la integridad de la red y la seguridad de terceros. Actualmente, debido al aumento de la demanda y la escasez de los recursos, se hace cada vez más difícil este trabajo y las empresas necesitan emplear planes de acción para continuar con sus labores correctamente.

Un suministro adecuado de la energía debe realizarse en una estructura de funcionamiento radial, abarcar todos los usuarios de una red, aprovechar eficientemente los recursos energéticos, utilizar adecuadamente los activos presentes en la red, tener en cuenta las restricciones operacionales, reducir los costos totales durante este suministro, entre otros. Estos son algunos de los factores que las empresas distribuidoras buscan constantemente debido a la dinámica del sistema, y son fuente de inspiración en numerosos estudios nombrados en la bibliografía. En esta ocasión, se propone una técnica muy popular debido a que mejora importantes indicadores del sistema sin tener que evaluar elevados costos para las empresas, porque solamente utiliza los activos que se encuentran dentro de la red. Esta Técnica se llama reconfiguración.

La reconfiguración se realiza en los alimentadores primarios de la red de distribución de media tensión. Esta técnica consiste en modificar la estructura de la red, utilizando los elementos de maniobra, seccionamiento y/o protección presentes en la red, hasta obtener finalmente una estructura de funcionamiento radial. Se ha demostrado que modificar la estructura de la red, mejora varios indicadores de la misma y solamente requiere de costos adicionales al momento de realizar la modificación. El problema que surge al momento de modificar la estructura de la red

son las miles de posibles estructuras que se pueden identificar dentro de la misma, lo que convierte la técnica de reconfiguración en un problema de carácter combinatorial. Por otro lado, es no lineal debido a las ecuaciones matemáticas del flujo de carga. Existe la opción de realizar una búsqueda exhaustiva de todas las posibilidades, pero requiere de grandes esfuerzos computacionales. Es por esta razón, que es necesario emplear algoritmo de optimización para facilitar la búsqueda de una estructura de red que sea idealmente óptima.

Los algoritmos de optimización empleados para realizar la reconfiguración se clasifican en dos grupos, determinístico y no determinístico. Se dice que un algoritmo es determinístico, si en un conjunto de problemas, todos los resultados llevan al mismo valor final. Y un algoritmo es no determinístico, si se introducen términos aleatorios en el proceso de búsqueda, por lo tanto, los resultados no necesariamente tienen que coincidir. Dentro de los algoritmos no determinísticos, se encuentran los heurísticos y los metaheurísticos. Un algoritmo heurístico, es aquel que se acerca a la solución de manera intuitiva o mediante ensayo y error. Y los metaheurísticos, realizan la búsqueda mediante algoritmo inteligentes que imitan el comportamiento de procesos físicos o biológicos de la naturaleza. Algunos ejemplos que se pueden identificar dentro del estado del arte son: utilizar un método determinístico luego de linealizar las ecuaciones y el modelo matemático, utilizar técnicas heurísticas como lo son las modificaciones indicadas por la experiencia de expertos en el tema o utilizar métodos de optimización metaheurísticos como el algoritmo genético (AG). Estas son algunas de las posibles soluciones que se han utilizado para solucionar el problema de reconfiguración.

En el presente proyecto, se solucionará el problema de reconfiguración utilizando un algoritmo de optimización metaheurístico que fue inspirado en la teoría de la creación del universo, este es llamado Big Bang – Big Brunch (BB-BC) [1]. Su principal ventaja es su bajo tiempo de convergencia y su fácil implementación. Este algoritmo se puede describir en 2 etapas fundamentales: el Big Bang, proceso donde las soluciones candidatas son distribuidas aleatoriamente dentro del espacio de búsqueda, haciendo referencia a la dispersión de energía. Y el Big Crunch, es la etapa donde las soluciones candidatas se concentran en un centro de masa o la solución de menos costo, haciendo referencia a la concentración de energía para un próximo Big Bang. Luego de un tiempo de ser publicado este método, muchos autores advierten que existía la posibilidad de caer en soluciones locales, es por esta razón que en trabajos realizados por [2], utiliza la capacidad del algoritmo cúmulo de partículas (PSO) y el operador de mutación del algoritmo genético (AG), para solucionar este problema. Estos operadores son utilizados al momento de dibujar los nuevos candidatos alrededor del centro de masa, y convierten al algoritmo Big Bang – Big Crunch (BB-BC), en un nuevo y mejorado híbrido Big Bang – Big Crunch (HBB-BC), y es el que será utilizado para realizar las simulaciones del presente proyecto.

El algoritmo HBB-BC fue seleccionado como método para solucionar el problema de reconfiguración, porque no necesita de una formulación rigurosa para poder realizar la búsqueda, por lo tanto, puede aplicarse con facilidad al problema de reconfiguración. Esta cualidad es propia de los métodos metaheurísticos, pero tiene la desventaja de no saber con certeza cuál es el comportamiento del algoritmo en cada iteración y por lo tanto, no necesariamente se puede obtener la misma solución en cada simulación. En los últimos años, la

mayoría de los trabajos que se han identificado solucionando el problema de reconfiguración, utilizan métodos de optimización metaheurísticos y consideran la presencia de elementos adicionales en la red, como por ejemplo: condensadores, generadores distribuidos (GD), vehículos eléctricos (VE), entre otros. En esta ocasión, se pretende utilizar generadores distribuidos (GD) que pertenezcan al grupo de las energías renovables no convencionales (ERNC), como un elemento adicional al momento de solucionar el problema de reconfiguración.

Los generadores distribuidos (GD) se encuentran ubicados cerca del consumo, con el objetivo de ampliar el alcance de la red y para mantener un suministro eficiente y seguro. Estudios han demostrado que utilizar GD dentro de la red de distribución, mejoran el perfil de tensión en usuarios alejados a la subestación y minimizan las pérdidas activas, pero se advierte que si son mal ubicados y/o dimensionados, podrían perjudicar el estado de la red. El objetivo de utilizar generadores renovables, es para realizar un estudio que considere la variabilidad horario de los aportes energéticos que tienen los generadores eólicos y fotovoltaicos al momento de solucionar el problema de reconfiguración. Para adaptarse a la situación, se modeló el comportamiento de la generación y la demanda, mediante curvas indicadas por trabajos anteriores, para así saber con certeza cuál es la demanda y generación en todo momento.

Para la formulación del problema de optimización, se considera como objetivos minimizar las pérdidas activas y la desviación de tensión en los nodos, siendo la variable de decisión, el estado de los elementos de maniobra, protección y/o seccionamiento presentes en la red. Para realizar esta búsqueda, se debe tener presente que el algoritmo HBB-BC fue diseñado para realizar búsquedas mono objetivos, pero se realiza una suma mediante factores de peso sobre los 2 objetivos antes nombrados y se modifica el problema de multiobjetivo a uno mono objetivo. La formulación matemática del problema es nuevamente modificada, porque se debe considerar que la demanda y generación es variable durante el día. En esta ocasión, se agrega una sumatoria adicional a esta suma ponderada, con el objetivo de evaluar cada instante del día. Con esta formulación del problema, se puede construir un algoritmo que utilice el método HBB-BC para optimizar el proceso de reconfiguración de la red de distribución.

Para poner a prueba el algoritmo HBB-BC, las simulaciones se realizaron en un sistema llamado “baran” y en una real con 163 nodos. Los resultados obtenidos permitirán contrastar los aportes que se obtiene los de los GD al momento de realizar al reconfiguración. Finalmente, para verificar que tan certeros son los resultados obtenidos por el algoritmo HBB-BC, se realizará una comparación con un trabajo anterior que busca el mismo fin.

El esquema de presentación del informe está compuesto por 8 capítulos que muestran claramente todos los puntos que se comentaron en la introducción. El capítulo 1, está destinado para que el lector tenga claridad del ambiente donde se desarrolla el problema de reconfiguración, y el capítulo 2, está enfocado en la particularidad que se le quiere dar al presente proyecto, donde se habla de los generadores distribuidos y cuáles son las características que se deben considerar para poder ser implementados dentro del proyecto. El capítulo 3, habla de los problemas que se hacen presente al momento de realizar la reconfiguración y cuáles son las características que se deben considerar para buscar un método para optimizar este proceso.

Según lo anterior, se construyó un capítulo que fue destinado para mostrar los métodos que históricamente han sido utilizados para solucionar el problema de reconfiguración, detallando cuales son las formas y enfoques que se han identificado hasta la fecha, y también se realizó una revisión de los trabajos que han utilizado el algoritmo BB-BC. El capítulo 5, fue destinado para explicar las características y el funcionamiento del algoritmo, y cuáles son las modificaciones que lo convierten en una versión híbrida del mismo. En el capítulo 6, se realiza la formulación del problema, detallando cuales son las modificaciones que ajustan los objetivos para poder utilizar el algoritmo HBB-BC, y para considerar la variabilidad del enfoque propuesto para este proyecto. En el capítulo 7, se mostraran todos los preparativos antes de realizar las simulaciones, como por ejemplo: alimentadores a utilizar, parámetros del algoritmo HBB-BC, parámetros de los generadores, algoritmo de optimización, entre otros. Y para finalizar, el capítulo 8 está destinado para mostrar en términos de números, cuales son los resultados obtenidos luego de solucionar el problema de reconfiguración, considerando la presencia de los generadores eólicos y fotovoltaicos. Además se realizara una breve demostración de cuáles son los aportes que se obtienen al momento de considerar los generadores, junto con una comparación de un trabajo anterior que valida que tan certeros son los resultados obtenidos por el algoritmo HBB-BC.

Objetivos generales

- Proponer un método de optimización para solucionar el problema de reconfiguración de la red de distribución de media tensión, considerando la presencia de medios de generación renovables, con el objetivo de minimizar las pérdidas activas y la desviación de tensión en los nodos.

Objetivos específicos

- Explicar en qué consiste el problema de reconfiguración y cuál son las ventajas que se obtienen al momento de realizar este proceso.
- Realizar una revisión histórica de los métodos que han sido utilizados para optimizar procesos e indicar cual fue seleccionado para este proyecto.
- Detallar como se implementa el método propuesto, indicando cuales son las modificaciones y modelos que se deben realizar para considerar el comportamiento horario de la generación renovable.
- Mostrar los resultados finales luego de realizar la optimización y demostrar cuales son los aportes que se obtiene sobre los objetivos de la optimización al momento de considerar la generación renovable durante el proceso de reconfiguración.
- Verificar que el método de solución propuesto se desempeña bien solucionando el problema de reconfiguración.

1 Redes de Distribución

1.1 Introducción del Capítulo

La energía eléctrica es un recurso muy importante y escaso para la sociedad que conocemos actualmente. Tanta es la importancia, que existen empresas que se encargan de administrar estos recursos de la manera más eficiente posible. Estas empresas se llaman distribuidoras y son los encargados de llevar la energía hasta nuestros hogares.

A continuación se mostraran generalidades sobre las redes de distribución, como por elementos: tipos de cargas, estructuras, normativas, entre otros. Estos aspectos muestran el importante rol que cumplen las empresas distribuidoras dentro de una sociedad dependiente de energía eléctrica, y el importante trabajo que deben realizar para entregar un suministro continuo, seguro y de calidad. El objetivo de este capítulo es introducir al lector en el área donde se desarrollará el presente proyecto y muestras las bases del problema de reconfiguración.

1.2 Generalidades

Se le llama sistema eléctrico de potencia (SEP) al conjunto de centrales generadoras, al sistema troncal y el sistema de distribución. El proceso de obtención de energía se realiza a partir de bloques concentrados de plantas generadoras de gran capacidad, luego es trasladado a grandes distancias mediante el sistema troncal, hasta que es recibida y gestionada por las empresas distribuidoras. El ultimo es el más complicado e importante dentro de los sistemas eléctricos de potencia, por lo que se ven obligados a realizar grandes inversiones mediante aplicaciones de ingeniería, diseño, construcción y una operación de alta calidad.

Para mostrar en detalle la estructura y funcionamiento de los sistemas eléctricos de potencia, el autor [3], divide los sistemas desde un punto de vista ingenieril, partiendo desde los patios de despacho de cada central, hasta los respectivos usuarios. Las divisiones incluyen lo siguiente:

1. Subestación principal de potencia: esta sección recibe la energía de las centrales de generación y transforma la tensión al nivel de los sistemas de transmisión. Los voltajes de

transmisión pueden ser: 110, 154, 220, 500 [kV]. Las potencias de la subestación principal está en los cientos de Mega Watts.

2. Sistemas de subtransmisión: son las líneas que salen de las subestaciones (SE) principales y llegan hasta las SE de distribución. Se trabaja en un nivel de tensión entre los 23 a los 110 [kV].
3. Subestación de distribución: recibe la energía del sistema de subtransmisión y se encarga de transformar el nivel de tensión para los alimentadores primarios.
4. Alimentadores primarios: corresponde a las líneas que salen de la SE y llevan el flujo de carga hasta los transformadores de distribución. Los niveles de tensión son de 12 a 23 [kV].
5. Transformadores de distribución: se encargan de reducir el nivel de tensión para cada tipo de usuario.
6. Secundarios y servicios: disminuye finalmente la energía a los usuarios o servicios. Los niveles de tensión son de 220 a 380 [V].

La reconfiguración se realiza en los alimentadores primarios de la red de distribución. Esto quiere decir, que todas las simulaciones se realizarán en redes de distribución balanceadas y no será necesario modelar los sistemas en su totalidad.

1.3 Clasificación de Cargas.

Las cargas corresponden a la cantidad que caracteriza el consumo de potencia por parte de receptores o consumidores de energía eléctrica. Esta característica viene dada por la ubicación y/o tipo de carga.

Un tipo de ubicación de alimentadores de distribución son las redes urbanas. Estas son cargas muy concentradas, son de fácil acceso y poseen cargas monofásicas, bifásicas y trifásicas. También se encuentran las rurales, donde los usuarios son muy dispersos y de muy difícil acceso, normalmente son cargas monofásicas. Estos tipos de alimentadores son los que presentan un mayor desafío para las empresas distribuidoras, porque tienen un difícil acceso al momento de ser construidas.

La clasificación y el tipo de consumo de los usuarios en una red de distribución son los siguientes:

- a. Redes de distribución para cargas residenciales: este tipo de cargas contempla usuarios como condominios, edificios, etc. Estas cargas se caracterizan por ser variables de acuerdo a ciertas horas del día.
- b. Redes de distribución para cargas comerciales: estas cargas se ubican en lugares céntricos de las ciudades, que es donde se realiza la actividad y su consumo se centra a lo largo del día. Estas cargas pueden ser supermercados, bancos, hospitales, etc.
- c. Redes de distribución para cargas industriales: son cargas que poseen un comportamiento constante a lo largo del día, trabajando a un nivel de tensión alto. Este tipo de clientes son industrias de acero, petróleo, gas, etc.

Los tipos de cargas son un aspecto muy importante al momento de diseñar una red de distribución, porque la estructura encontrada, debe satisfacer la demanda en todo momento y mantener los márgenes de seguridad que la normativa vigente exige.

1.4 Estructura de los sistemas de Distribución

En las redes de distribución se pueden distinguir estructuras con forma de mallas, radial, anillos, entre otras. Para el presente proyecto, la reconfiguración se realiza partiendo de una red en forma de mallas, y se liberan líneas hasta obtener finalmente una estructura de funcionamiento radial. Las características de estas estructuras se muestran a continuación:

1. Estructura radial: es aquella que presenta un solo camino desde la subestación hasta las respectivas cargas. Las ventajas de trabajar con esta estructura son: el control se realiza desde un solo punto que es la subestación, su flujo es unidireccional, se simplifican los esquemas de protección y su construcción no requiere de grandes costos.
2. Estructura en mallas: posee la ventaja de tener más de un camino para el flujo de potencia, pero su construcción requiere de mayores costos para las empresas distribuidoras.

La selección de las estructuras del sistema de distribución, depende principalmente de la continuidad del servicio, la regulación de tensión y los costos que conlleva. Además las estructuras de una red consideran la ubicación geográfica donde se desea construir.

Para mayor detalle, la Figura 1-1, muestra la estructura de una red con forma de mallas y radial.

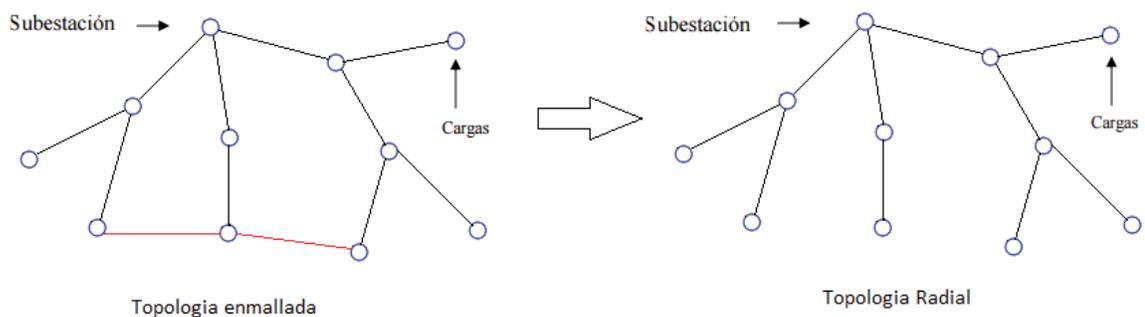


Figura 1-1: Estructuras de los Sistemas de Distribución.

Normalmente las redes de distribución están construidas en forma de mallas, pero su funcionamiento se realiza de forma radial. Para obtener una estructura radial, es necesario realizar la operación de los elementos de maniobra, seccionamiento y/o protección presentes dentro de la red; hasta obtener finalmente una estructura radial. La búsqueda de una estructura que mejora ciertos indicadores requeridos por las empresas, es un problema combinatorial, y puede ser de gran dificultad en redes de gran tamaño.

1.5 Marco Regulatorio

Para que las empresas de distribución realicen sus procesos de manera adecuada, existen entidades que sancionan prácticas que pueden ser perjudiciales para los usuarios. Las penalizaciones son para los siguientes aspectos de calidad del servicio eléctrico:

1. Calidad de suministro eléctrico por el distribuidor.
 - a. Regulación de tensión.
 - b. Desbalance de tensión en servicios trifásicos.
 - c. Distorsión Armónica.
2. Estándares para equipos e instalaciones pertenecientes a usuarios conectados a la red de distribución.
3. Calidad de servicio técnico.
 - a. Estándares para interrupciones de suministro a usuarios.
 - b. Índices de continuidad de servicio a empresas de distribución.
4. Calidad del servicio comercial.

1.5.1 Regulación de Tensión

La regulación de tensión es un punto importante para la simulación del presente proyecto, porque es necesario que la estructura encontrada tenga los niveles de tensión permitidos por la norma. Además, forma parte de las restricciones de la formulación del problema.

El Artículo 243 del reglamento de la ley general de suministros eléctricos [4], indica que para tensiones nominales en frecuencias de 50 [Hz], el valor estadístico de la tensión medido de acuerdo a la norma técnica correspondiente, deberá estar dentro del rango de -6% a +6% durante el 95 % del tiempo de cualquier semana del año o siete días consecutivos de medición y registro, salvo en periodos con interrupciones de suministro.

1.6 Conclusión del Capítulo

Administrar la energía eléctrica es una labor muy importante y compleja para las empresas de distribución, porque debe considerar el comportamiento dinámico que sufre una red de distribución, y respetar los límites técnicos que hay dentro de la misma. Una administración eficiente de los recursos energéticos, debe considerarse como base, una estructura de funcionamiento idealmente óptima.

En este capítulo se indicó todo lo necesario para poder identificar qué tipo de red se utiliza al momento de tener usuarios y ubicaciones distintas. Además, se explicó cuáles son las ventajas y desventajas de tener una red de distribución con estructuras en forma de mallas o ramas y se mostraron las normas que se exigen durante el funcionamiento de una red de distribución. Estos factores dan pistas del problema que deben considerar los operadores de una red, al momento de realizar la búsqueda de una estructura.

2 Generación Distribuida

2.1 Introducción del Capítulo

La generación distribuida (GD), es una nueva área de estudio que se implementó para mejorar la calidad del suministro eléctrico en situaciones desfavorables para las empresas distribuidoras. Este capítulo se encarga de mostrar que son los GD, indicando tipos, tamaños, normas, ventajas y desventajas; detallando cual es el comportamiento que se debe considerar para su implementación en el presente proyecto.

2.2 Generalidades

Actualmente, la GD se considera como la producción de energía a través de pequeñas centrales que se conectan a la red de distribución en puntos cercanos al consumo. El estudio e implementación de este tipo de generación no es nuevo, las primeras redes eléctricas operaban con corriente continua y utilizaban dispositivos de almacenamiento de energía, como baterías que mantenían el equilibrio entre demanda y generación. Luego con el descubrimiento de la corriente alterna, las distancias de transporte de energía aumentaron considerablemente y mejoró la seguridad de la red mediante el intercambio de centrales. La incorporación de nuevas centrales da origen a un sistema interconectado, haciendo posible una economía a gran escala en la generación de energía eléctrica.

En los últimos 70 años, la crisis del petróleo, el impacto climático, el incremento de los costos de transporte y distribución y el crecimiento de la demanda; provocan la necesidad y el interés de implementar nuevas alternativas de suministro eléctrico, prevaleciendo el uso de recursos naturales.

La agencia internacional de energía (IEA) [5], propone factores que contribuyen a la evolución de la GD:

- a. Crecimiento de la demanda energética.
- b. La reducción de las pérdidas activas para el sistema de distribución.
- c. Prestaciones de apoyo a las redes o servicios auxiliares.

- d. Elimina la posibilidad de incorporar nuevas líneas de transporte.
- e. En cierto rango, quedan exentos de costos por transporte.
- f. Cambio climático.

En la literatura relacionada con GD, nombran definiciones que emplean terminologías distintas al referirse a la generación, por ejemplo: generación dispersa, generación descentralizada, etc. Además, la GD es definida según criterios estrictos al nivel de potencia correspondiente al país de la entidad.

La IEEE la define como “la producción de electricidad en instalaciones que son suficientemente pequeñas en relación a las grandes centrales, de forma que se pueden conectar casi en cualquier punto de un sistema eléctrico”.

El consejo internacional sobre grandes sistema eléctricos (CIGRE) [6], define a la GD como todos los generadores con una capacidad máxima entre 50 a 100 [MW], conectados al sistema eléctrico de distribución y no están diseñados ni despachados de forma centralizada.

La DPCA (Distribution Power Coalition of America), la define como cualquier tecnología de generación a pequeña escala que proporciona electricidad en puntos cercanos al consumidor y se puede conectar directamente a la red de transporte o distribución.

Hay varias entidades que definen a lo que es generación distribuida de acuerdo a sus beneficios o su capacidad y apoyan a la implementación de esta tecnología.

2.3 Clasificación de Generadores Distribuidos

Últimamente existen diversos tipos de GD, estos se diferencian en su capacidad y forma de generar la energía eléctrica.

2.3.1 Por Capacidad

Los medios de generación que están conectados y sincronizados en un sistema eléctrico, se clasifican de acuerdo a su nivel de potencia y la ubicación dentro del sistema.

1. Pequeños Medios de Generación Distribuidos (PMGD): son medios de generación con una capacidad máxima de potencia no superior a los 9 [MW]. Presentan una gran flexibilidad dentro de la red, porque pueden ser conectados directamente a la red de distribución y ser destinados para usos públicos.
2. Pequeños Medios de Generación (PMG): al igual que el caso anterior de los PMGD, la capacidad máxima de potencia no es superior a los 9 [MW], pero este tipo de generación se conecta al sistema troncal.
3. Medios de Generación No Convencionales (MGNC): son medios de generación cuya fuente de generación no es convencional y tienen una capacidad máxima no superior a los 20 [MW].

Para el presente proyecto, se propone incorporar 2 PMGD con tecnología fotovoltaica y eólica, que serán ubicados dentro de los alimentadores propuestos. El propósito de utilizar estos medios de generación, es para realizar el estudio considerando la variabilidad horaria de los aportes energéticos que tienen hacia la red de distribución.

2.3.2 Por su forma de Generación

Los estudios realizados en la implementación de nuevos medios de generación a la red de distribución, dan a conocer 2 grupos:

Tecnologías Tradicionales

1. Turbinas a gas: son máquinas térmicas que proporcionan energía mediante la expansión de un gas. La capacidad de las turbinas esta entre los 1 a 2 [MW] y su eficiencia es del 40% operando a ciclo abierto y en rangos de 40 a 60% trabajando a ciclo combinado.
2. Micro-Turbinas: son pequeños generadores eléctricos que queman combustible (líquido o gas), para lograr una alta velocidad en el rotor del generador eléctrico. La eficiencia de esta tecnología depende de varios factores, pero típicamente es del 30% y con una vida útil estimada de 60.000 horas. La potencia de las micro-turbinas esta entre los 30 a 350 [kW].

Tecnologías no Tradicionales

1. Eólica: corresponde a la generación de energía mediante el movimiento originado por la diferencia de presión provocado por el calentamiento de la superficie terrestre producto del sol. El mecanismo de generación es similar a los casos anteriores utilizando la energía cinética para luego ser transformada en energía eléctrica. La capacidad de este tipo de generación esta entre 1 [kW] a unos pocos [MW]. La desventaja de este tipo de generación es la ubicación, ya que esta debe ser tal que el flujo de viento sea ideal y constante durante todo el año.
2. Mini-hidráulicas: básicamente utilizan la energía potencial del agua almacenada en embalses o ríos, transformándose en energía cinética y finalmente en energía eléctrica. La capacidad máxima no supera los 10 [MW] y depende de factores como el nivel del agua y el caudal de este.
3. Solar térmica: este tipo de generación consiste en concentrar la energía procedente de la radiación solar y transferirla a un fluido para aprovechar las propiedades térmicas. La capacidad de este tipo de generación son superiores a los 10 [MW]. Su principal desventaja es que no están situados cerca de los puntos cercanos al consumo.
4. Solar fotovoltaica: generación que aprovecha la radiación solar para producir energía eléctrica. Básicamente, consiste en absorber la radiación del sol mediante un material semiconductor llamado celdas fotovoltaicas, provocando movimiento de cargas en su interior y generando la energía en forma continua. La capacidad de este tipo de

generación esta entre los 50 y 100 [W], dependiendo del número de celdas que se esté utilizando.

La agencia internacional de energía (IEA) [5], expone las principales características que posee la GD y son de gran utilidad al momento de tomar la iniciativa de incorporar nuevos medios de generación. Estas características se muestran en la Tabla 2-1 y pueden ser usadas de manera directa.

Tabla 2-1: Características Técnicas para Tipos de Generadores Distribuidos.

Tecnología	Capacidad de generación [MW]	Eficiencia de conversión de energía [%]	Combustible	Costos de generación [USD/kW]
Turbina a gas	1 - 20	21 – 41	Diésel y/o gas	300 – 600
Micro turbinas	25 - 1	25 – 30	Gas natural	500 – 750
Eólica	200 - 3	No aplica	Aire	No aplica
Solar fotovoltaica	1 - 2	No aplica	Sol	No aplica

Tabla construida con información consultada en IEA [5].

2.4 Ventajas de la Generación Distribuida

Los beneficios de utilizar GD en la red de distribución se muestran a continuación:

1. La GD reduce las pérdidas de energía activa en los alimentadores de una red de distribución y mejora el perfil de voltaje en los nodos. Esta ventaja permite utilizar de mejor forma los recursos energéticos y disminuir el uso de medios de generación convencionales.
2. La GD sirve de respaldo al momento de gestionar la demanda en horarios punta, mejorando la calidad del suministro.
3. El uso de GD renovables, reduce las emisiones contaminantes en la atmosfera y genera más conciencia por el medio ambiente.
4. La ubicación de la GD tiene un cierto grado de flexibilidad dentro del sistema de distribución.
5. La GD tiene múltiples beneficios económicos, por ejemplo: costos de operación, mantenimientos, transporte, distribución y combustible.
6. La GD ayuda a aumentar la fiabilidad y seguridad de la red de distribución, beneficio relacionado con reducir la posibilidad de fallas y el aumento en la calidad de onda eléctrica en la red.

2.5 Desventajas de la Generación Distribuida

Para sacar el mayor provecho a la GD, se necesita de estudios, planificación y una gestión adecuada, considerando las características del tipo de generación. Una mala ubicación o dimensionamiento, puede traer numerosos problemas para la red, como por ejemplo:

1. La mala ubicación de la GD puede afectar la continuidad del suministro, engrandeciendo los costos de las empresas distribuidoras. Aspecto muy importante al momento de realizar ampliaciones dentro de la red.
2. El sobre dimensionamiento de la GD, puede hasta aumentar las pérdidas del sistema por el exceso de generación.
3. La incorporación de GD entorpece el monitoreo de la red, ya que una estructura radial trabaja con un flujo de potencia unidireccional, pero con la GD el flujo es bidireccional y dificulta el trabajo de los operadores.
4. La propagación de armónicos, sobre tensión, lagunas de tensión, son algunos de los problemas que pueden traer una mala planificación de la GD.

2.6 Marco Regulatorio de la Generación Distribuida

La creciente demanda energética en Chile y el impacto ambiental, levantan un gran interés en masificar la generación distribuida. Para regular la participación de la GD sobre la red, se implementaron reglamentos en su operación y transporte.

2.6.1 Normas de Operación

El artículo 4-12 de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS) [7], indica que para condiciones de operación normal y estacionario, la GD con capacidad instalada superior a 30 [kVA] deberá operar a partir de inyecciones superiores a 20% de P_{Emax} , con un factor de desplazamiento ($\cos\theta$) entre 0.9 inductivo hasta 0.9 capacitivo, según las indicaciones de las empresas distribuidoras. Si la empresa distribuidora indica que la GD deberá inyectar un factor de potencia distinto de 1, el cliente quedará liberado de una posible multa por mal factor de potencia.

Por otro lado, bajo condiciones de operación normal y estacionario, la GD con capacidad instalada inferior a 30 [kVA], que sean capaces de ajustar su $\cos(\theta)$, deberá operarse a partir de inyecciones del 20% de P_{Emax} , con un $\cos(\theta)$ entre los 0.95 capacitivo según indicaciones de la empresa distribuidora.

Además, la conexión de un generador solo puede ocurrir si se establece que la tensión y frecuencia de la red estén dentro de un rango de tolerancia de 0.85 V_n a 1.1 V_n y 47.5 [Hz] hasta 50.2 [Hz] respectivamente.

2.6.2 Normas de Transporte

La Comisión Nacional de Energía (CNE) [8], efectuó modificaciones en los reglamentos para mejorar las condiciones de utilizar energía renovable en el país. Estas modificaciones contribuyen al desarrollo de nuevas inversiones para fuentes de generación no convencional.

Las normas que se aplican a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC), son la Ley General de Servicios Eléctricos (LGSE), en especial la ley 19.940 (ley corta I) [9] y 20.018 (ley corta II) [10].

Las modificaciones que se introdujeron a la Ley 19.940 son las siguientes:

1. En el artículo 71-7 define claramente que las fuentes de generación no convencionales conectadas al sistema eléctrico son las siguientes: geotérmicas, eólicas, solares, biomasa, mareomotriz, pequeñas centrales hidroeléctricas, cogeneración y otras similares determinadas por la comisión.
2. El acceso de las ERNC al sistema eléctrico está establecido por el artículo 91 de la LGSE. Este artículo permite a los propietarios vender energía al sistema a un costo marginal instantáneo.
3. Establece condiciones para el desarrollo de ERNC, realizando excepciones en el pago total o parcial en el peaje por el sistema troncal y el derecho de evacuar su energía a través de los sistemas de distribución.
4. Los peajes a pagar están determinados por un factor proporcional entre un nivel de potencia superior a 9 [MW] y 11 [MW]. Las centrales cuya potencia sea inferior a los 9 [MW], quedaran exentos de pagos por peaje.
5. El artículo 91 de la LGSE facilita la incorporación de ERNC a los sistemas de distribución, ya que las empresas distribuidoras deberán permitir la conexión de ERNC con una capacidad no superior a los 9 [MW] a la red de distribución. De esta forma se elimina una posible barrera para la generación renovable.

Las modificaciones que se introdujeron en la ley 20.018 son las siguientes:

1. Con el fin de aumentar la participación de las ERNC, el artículo 1-4 establece que los propietarios de generación de energía renovable no convencionales, tendrán derecho a suministrar a las empresas de distribución, hasta un 5% del total de demanda destinada a clientes regulados a precio promedio de las licitaciones. De esta forma la ley 20.018 asegura que las ERNC no serán discriminadas en el mercado eléctrico, al imponer precios competitivos de esta.

La implementación de GD dentro del presente proyecto, resulta ser una gran oportunidad para incentivar el uso de recursos renovables dentro de las redes de distribución. Los aspectos nombrados en este capítulo, dan a conocer el funcionamiento y las restricciones de la GD.

2.7 Conclusión del Capítulo

La generación distribuida (GD) es una tecnología que es utilizada en muchas ciudades para mejorar la calidad del suministro eléctrico. Uno de los principales beneficios de utilizar esta tecnología es el de mejorar el perfil de tensión en usuarios alejados a la subestación y minimizar las pérdidas activas. Para lograr estos beneficios por parte de la GD, es necesario detallar su funcionamiento e implementación dentro de la red de distribución. El uso indebido de esta tecnología podría ser un importante problema para la red de distribución.

En este capítulo, se realizó una definición de que es generación distribuida (GD) y fue clasificada por tipo y capacidad. Esta clasificación es importante al momento guiar al lector dentro del informe, porque detalla cual es el generador que se está utilizando y como es modelado dentro de

las simulaciones del presente proyecto. Finalmente, las normativas que controlan el funcionamiento de la GD son de suma importancia al momento de realizar la formulación del problema.

3 Planteamiento del Problema de Reconfiguración

3.1 Introducción del Capítulo

En el diseño, rediseño o expansión de una red de distribución, el operador debe ser capaz de encontrar una estructura que considere todas las restricciones que la normativa exige, aspirando a ser la óptima. Estas son pistas que se deben tener presente al momento de buscar un método de optimización que sea capaz encontrar una estructura aceptable, considerando las características que tiene el problema de reconfiguración.

Este capítulo muestra los objetivos que las empresas de distribución buscan en una estructura de red y cuáles son los problemas que los operadores de la red se deben enfrentar al momento de realizar esta búsqueda.

3.2 Reconfiguración

La reconfiguración se realiza en los alimentadores primarios de una red de distribución de media tensión. Esta consiste en utilizar los elementos de maniobra, seccionamiento y/o protección presentes dentro de la red, hasta obtener finalmente una estructura de funcionamiento radial. Esta técnica es muy útil si se quieren mejorar indicadores dentro de una red de distribución a un bajo costo.

Se utilizan 2 tipos de estructuras de red para realizar la reconfiguración, mallas y radial. La logia es partir de una red en forma de mallas y mediante la operación de los elementos presentes en la red, se libran líneas hasta obtener finalmente una estructura de funcionamiento radial. La ventaja de trabajar con una red con este tipo de estructura, es su flexibilidad al momento de buscar nuevas rutas de suministro.

Observando la Figura 3-1, la red que se muestra a la izquierda posee una estructura en forma de mallas y se desea que su funcionamiento sea de forma radial. Aplicando la logia anterior, se liberan las líneas indicadas con color rojas y se obtiene finalmente una estructura en forma de ramas de árbol o radial. Esta es la estructura que se debe obtener luego de realizar modificaciones

dentro de una red de distribución y no esta demás decir, que esta estructura debe respetar los límites operacionales de la red.

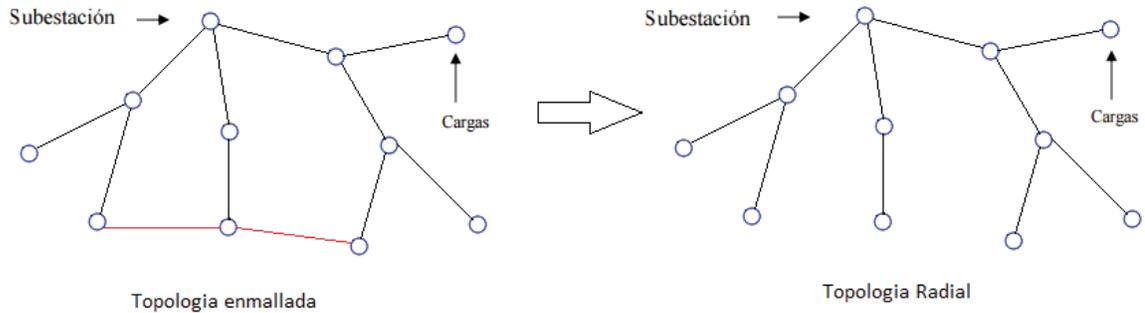


Figura 3-1: Esquema para la Construcción de una Red de Distribución Radial.

La búsqueda de una estructura de red debe considerar los siguientes puntos:

1. Abarcar todos los usuarios presentes dentro de la red de distribución.
2. Mantener una estructura radial luego de realizar las modificaciones.
3. Aumentar la calidad y confiabilidad del servicio.
4. Suministro seguro y dentro de los límites establecidos por la norma.
5. Entre otros.

Dada la realidad que ocurre dentro de una red de distribución, encontrar una estructura con estos factores requiere de grandes esfuerzos computacionales y aplicaciones de ingeniería.

3.3 Objetivos de la Reconfiguración

Históricamente se han realizado muchas publicaciones mostrando distintas formas de optimizar el problema de reconfiguración. Estos estudios buscan objetivos como: minimizar las pérdidas activas disipadas en los alimentadores, minimizar la desviación de tensión en nodos, mejorar la confiabilidad de la red, reducir costos para las empresas de distribución, entre otros. Para el presente proyecto, se busca minimizar las pérdidas activas y minimizar la desviación de tensión en los nodos del sistema.

3.3.1 Pérdidas de Potencia Activa en Redes de Distribución

El creciente aumento de la demanda en las redes de distribución, provoca pérdidas de energía producto del constante incremento de los equipos presentes en la red. Estas pérdidas son producidas por:

1. Pérdidas óhmicas: son producidas por el flujo normal de las líneas de los circuitos. La magnitud de esta pérdida depende de las características de la red y de la demanda que se requiere.

2. Pérdidas en el vacío: se produce por la corriente de magnetización que circula por el núcleo de hierro de los transformadores. Este tipo de pérdidas contempla fenómenos como corrientes parasitas y efectos corono en los conductores.

La Electric Power Research Institute (EPRI) [11], entre los años 2008 y 2011 realizó estudios en alimentadores de diferentes empresas en Estados Unidos. Dichos resultados se muestran en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Porcentaje de Pérdidas en Redes de Distribución.

Pérdidas	Porcentaje
Pérdidas en hierro en transformadores de subestaciones.	6,60%
Pérdidas óhmicas en transformadores de subestaciones.	5,10%
Servicios auxiliares en subestaciones.	1,30%
Pérdidas óhmicas en alimentadores.	35,50%
Pérdidas en el hierro en transformadores de distribución.	24,60%
Pérdidas óhmicas en transformadores de distribución.	7,30%
Pérdidas en redes de baja tensión.	15,40%

Tabla construida con información consultada en EPRI [11].

Este estudio muestra el alto porcentaje de pérdidas que se producen en los alimentadores y en el vacío de los transformadores. Como solución, las empresas de distribución proponen incorporar los siguientes métodos y/o tecnologías.

1. Reducción controlada de tensión: este método disminuye la tensión en los nodos de acuerdo a la demanda de los usuarios. Como consecuencia se tiene una disminución de la potencia activa y reactiva de ellos.
2. Cambio de conductores en alimentadores: método que consiste en dar prioridad a los conductores con menos resistencia.
3. Mejorar la eficiencia de transformadores.
4. Reconfiguración: modificar la estructura de la red según las necesidades del sistema.

Las simulaciones se realizarán en los alimentadores primarios de una red de distribución, por lo que las simulaciones serán sobre redes balanceadas y no será necesario modelar el sistema en su totalidad. Por esta razón, el objetivo de minimizar las pérdidas solamente es para las disipadas en las líneas del sistema.

3.3.2 Desviación de tensión

Los niveles de tensión es un tema muy importante si se quiere hablar de seguridad dentro de una red de distribución. En Chile, los niveles de tensión establecidos para sectores urbanos son de 220 [V] a una frecuencia de 50 [Hz], y cualquier violación de estos límites, pondrá en riesgo la integridad de los equipos eléctricos, afectando la seguridad de los usuarios.

La regulación de tensión es un punto importante para la simulación del proyecto, porque es necesario que la estructura encontrada después de realizar la reconfiguración, tenga los niveles

de tensión permitidos por la norma. Además, forma parte de las restricciones de la formulación matemática del problema.

El Artículo 243 del reglamento de la ley general de suministros eléctricos [4], indica que para tensiones nominales en frecuencias de 50 [Hz], el valor estadístico de la tensión medido de acuerdo a la norma técnica correspondiente, deberá estar dentro del rango de -6% a +6% durante el 95 % del tiempo de cualquier semana del año o siete días consecutivos de medición y registro, salvo en periodos con interrupciones de suministro.

Es importante realizar este análisis dentro del presente proyecto, porque la GD tiene la ventaja de mejorar el perfil de tensión en los nodos, pero si su uso es indebido, esta ventaja puede verse afectada.

3.4 Problemas Operacionales

Realizar las simulaciones dentro de una red de distribución, es una labor sumamente delicada para las empresas y requiere de un arduo trabajo por parte de ingeniería. La lógica operacional en el rediseño de una red, es realizar flujos de carga sobre las distintas posibles estructuras que puede haber y en ocasiones, resulta tedioso si no se realiza de forma adecuada. Existe la posibilidad de realizar una búsqueda exhaustiva sobre todas las posibles estructuras de la red, pero resulta agotador para los mismos operadores de la red.

Las características del problema de reconfiguración son las siguientes: las ecuaciones matemáticas para realizar el flujo de cargas son no lineales, por lo tanto, la formulación del problema es no lineal. La variable de decisión puede estar construida en forma de forma entera o binaria. Con estas características, se debe buscar un método de optimización que se adecue a esta situación y que entregue soluciones aceptables para las empresas distribuidoras.

3.5 Conclusión del Capítulo

Los estudios que se han realizado para solucionar el problema de reconfiguración, indican que es un buen método para mejorar indicadores técnicos y/o económicos, sin conllevar grandes costos para las empresas distribuidoras. El problema que ocurre al momento de modificar en la red, son los miles de factores que se deben considerar para un buen suministro.

En este capítulo se indicaron cuáles fueron los problemas que las empresas de distribución deben considerar para realizar la reconfiguración de la red. Se indicaron los objetivos y restricciones que las empresas deben considerar para realizar un suministro eléctrico. La finalidad del presente capítulo, fue para exponer las bases del problema de configuración y entregar pista de cuáles son los factores que se deben considerar para optimizar este proceso. El próximo capítulo, clasifica los métodos que se han utilizado para solucionar este problema y se mostrarán otros trabajos buscando el mismo fin.

4 Estado del Arte

4.1 Introducción del Capítulo

Dentro del estado del arte se muestra la evolución de los estudios realizados solucionando el problema de reconfiguración. Se pretende indagar la tendencia de los autores, en especial, a los que utilizan GD en sus simulaciones. Dentro del mismo capítulo, se realiza un seguimiento de los trabajos donde se ha utilizado el algoritmo Big Bang – Big Crunch (BB-BC), con la finalidad de mostrar la eficiencia del método propuesto para este proyecto. Realizar un estado del arte, es importante al momento de investigar un tema, porque ayuda a identificar los errores que autores anteriores cometieron y para no realizar copiar de otros trabajos.

4.2 Métodos de Optimización Aplicados a Reconfiguración

Existe una variedad de métodos utilizados para solucionar el problema de reconfiguración y su clasificación se muestra en la Figura 4-1.

El autor [12], realizó un trabajo sobre el estado del arte para el problema de reconfiguración e indica que existen 2 grupos de métodos empleados para solucionar este problema, determinístico y no determinístico. Un algoritmo se dice determinístico, si en un conjunto de problemas, todos los resultados llegan al mismo valor final. Y un algoritmo es no determinístico, si se introducen términos aleatorios en el proceso de encontrar la solución, por lo tanto, los resultados no necesariamente tienen que coincidir.

Además, estos métodos se clasifican de acuerdo a la manera de buscar la solución. Por ejemplo, se encuentran los métodos basados en el conocimiento de expertos, estos consisten en emplear la experiencia de los operadores sobre las modificaciones del sistema. Con base a estos conocimientos, se han empleado varios algoritmos que facilitan la búsqueda de las nuevas configuraciones de la red, tratando de obtener una solución cercana a la óptima. Dentro de estas categorías se encuentran los métodos heurísticos y se utilizan combinándolos con otros métodos, para así mejorar las respuestas, permitiéndoles agilizar la búsqueda.

Otro método empleado es la programación lineal (PL), la cual se ha utilizado para reducir los costos de expansión del sistema, involucrando las pérdidas de potencia. Métodos basados en sistemas de expertos (SE), lógica difusa (LD) y redes neuronales, han sido también aplicados a la

solución del problema de reconfiguración. Para mejorar estos métodos, se les ha incorporado operadores heurísticos para solucionar el problema con el menos esfuerzo computacional posible.

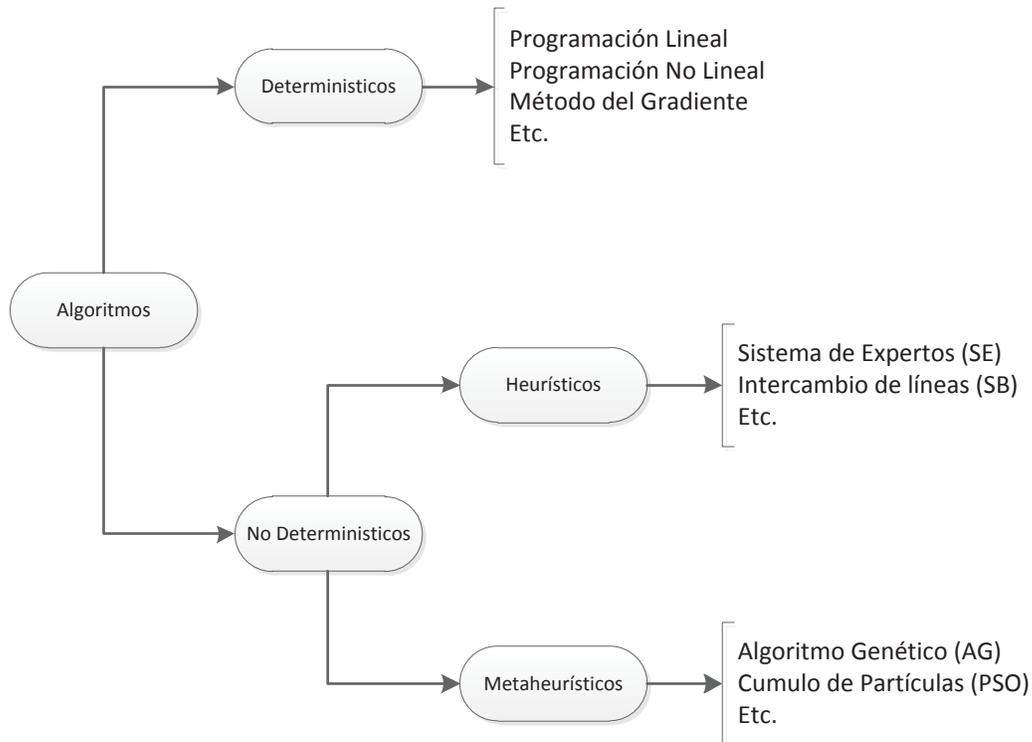


Figura 4-1: Métodos Aplicados al Problema de Reconfiguración.

Otros métodos realizan la búsqueda de la solución basada en algoritmo metaheurístico. Estos imitan el comportamiento de procesos físicos y biológicos que existen en la naturaleza, los cuales tienen como característica importante, la carencia de una formulación matemática rigurosa que permite establecer con certeza su comportamiento en cada situación.

Un ejemplo de algoritmos evolutivos está el algoritmo genético (AG) y el enfriamiento simulado. Estas técnicas parten en un grupo de posibles soluciones y las van mejorando en cada iteración. El algoritmo genético (AG), busca la solución basándose en el mecanismo de selección y genética natural. Este comportamiento combina la naturaleza adaptativa de la genética natural, con el proceso de optimización.

4.3 Primeras Aplicaciones para Reconfiguración

Los primeros trabajos de reconfiguración fueron técnicas heurísticas que se acercaban intuitivamente a la solución, y no necesariamente era la óptima. Unas de estas primeras aplicaciones era la técnica llamada “Switches” y fue propuesta por Merlin y Back [13]. Este método consiste en cerrar todas las líneas de la red, hasta obtener una estructura en forma de mallas y a partir de un flujo de cargas, se procede a abrir los interruptores correspondiente a las ramas que posean el menos flujo de corriente, hasta obtener una estructura radial. Este estudio

requería de grandes esfuerzos computacionales y fue mejorado por Shirmahammadi [14], realizando un método más robusto dentro de un menor tiempo que el anterior.

Otro método aplicando la técnica “Switches” fue propuesto por Civanlar [15] y posteriormente fue mejorada por Baran y Wu [16]. Esta técnica se basa en el intercambio de ramas manteniendo la radialidad del sistema. Se parte cerrando el switch de frontera y buscar el switch de seccionamiento que se debe abrir. Esta búsqueda se realiza mediante 2 reglas heurísticas: (1) cuando se considera la apertura de un switch de frontera es necesario transferir la carga desde un lado con mayor caída de tensión, al lado con la menos caída de tensión, (2) solo es posible una reducción de pérdidas, si existe una sustancial caída de tensión a través del switch de frontera. Este procedimiento se realiza, hasta no obtener opciones que reduzcan más las pérdidas.

Se ha utilizado Programación Lineal (PL) en estudios realizados por Wagner [17], realizando una comparación con diferentes métodos aplicados a reconfiguración. Propone emplear un nuevo método de programación lineal, utilizando técnicas de transporte, junto con un método de búsqueda heurística. Este estudio indica que la programación lineal, formulada como un problema de transporte, no es adecuada para aplicaciones en tiempo real. Aunque el enfoque heurístico no encuentre un óptimo global, puede proporcionar una mayor facilidad al momento de formular el problema.

Con el tiempo se utilizó una técnica llamada Sistemas de Expertos (SE), método basado en el conocimiento del operador de red, y se ha utilizado como medio de apoyo en la toma de decisiones y no para la toma de decisiones en forma autónoma. Estudios realizados por [18], propone utilizar SE para la restauración de servicio, aumentando la fiabilidad del sistema. Este consiste en identificar los alimentadores más afectados por la falla y tratar de restablecer a los clientes a través de los interruptores de enlace. Este método se utiliza como una ayuda en línea para los operadores del sistema SCADA. Si al ejecutar la maniobra, el operador observa que los límites de las variables se han violado, deshace la maniobra y de acuerdo con la base de conocimiento, se procede a realizar la siguiente maniobra.

Se ha solucionado el problema de reconfiguración seleccionando estructuras definidas mediante Redes Neuronales (RN). Parte de una estructura de red que se adiestra con ejemplos que se encuentran en algoritmos de aprendizaje, los cuales permiten encontrar los factores de peso de interconexión de las redes neuronales, luego se utiliza para evaluar las posibles soluciones. En este método no se utilizan flujos de cargas para verificar las restricciones, debido a que no se modelan las restricciones del tipo operativo. Por esta razón, las soluciones entregan la configuración, pero no necesariamente puede ser implementada.

Los métodos nombrados para solucionar el problema de reconfiguración, son heurísticos y no garantizan una solución óptima global. Pero se han implementado nuevos métodos con una gran capacidad de búsqueda y se puede pensar en soluciones óptimas.

El Algoritmo Genético (AG), fue propuesto el año 1975 y se basa en el mecanismo de selección y genética natural. El procedimiento de optimización se inicia generando un conjunto de soluciones llamadas “padres”, los cuales deben cumplir con las restricciones de tipo operativo. A esta etapa se le conoce como generación. La segunda etapa corresponde a la evolución, donde los individuos seleccionados como posibles padres, son evaluados en la función objetivo. A partir de la evaluación se generan copias idénticas de los padres que tienen una reducción mayor de pérdidas, esto con el fin de garantizar que los individuos más aptos tengan una mayor posibilidad en la etapa siguiente. A esta etapa se le llama reducción. A las nuevas soluciones obtenidas se les denomina “hijos”, se les verifican las restricciones técnicas del sistema. Esta etapa se llama reducción. Para que el AG no pueda quedar atrapado en soluciones locales, este posee un operador que añade un factor de aleatoriedad sobre los individuos resultantes (hijos), de esta manera el algoritmo tiene la capacidad de explorar otras áreas. A esta etapa se le denomina mutación. A pesar de sus años, sigue siendo un método robusto e históricamente ha demostrado buenos resultados en el problema de reconfiguración.

Otro método evolutivo es el enfriamiento simulado. Este método comienza a evaluar las pérdidas del sistema, luego genera aleatoriamente una configuración (que cumpla con las restricciones del sistema). Esta configuración es evaluada en la función objetivo y se aplica un criterio de aceptación que en algunos casos es el de Boltzman. Si el criterio de aceptación es menor, se acepta la configuración y se toma la configuración inicial y a partir de esta, se generan nuevas configuraciones hasta que el parámetro de control lo indique.

Estos son algunos de los primeros métodos de optimización empleados para el problema de reconfiguración. Desde entonces se han incorporado otros métodos metaheurísticos, para obtener soluciones cercanas a la óptima. Algunos autores utilizan operadores de otros algoritmos para formar métodos híbridos, y de esta forma mejora la capacidad de exploración, acelerando la convergencia a la solución deseada. Por otro lado, se han identificado trabajos donde se busca una solución óptima, pero considerando más de un objetivo.

4.4 Últimas Aplicaciones para Reconfiguración

El propósito de indagar en las publicaciones actuales, es para identificar la evolución de los trabajos solucionando el problema de reconfiguración, y mostrar como la incorporación y/o modificaciones de los algoritmos de optimización, hace más eficiente la búsqueda de la solución.

La estructura de los algoritmos de optimización se hace en base a operadores, y la modificación de esto puede mejorar tiempos y/o capacidades de ellos. En la sección 4.3, se mostró como el algoritmo genético (AG) es un método que históricamente ha entregado buenos resultados, pero puede mejorar aún más. Un trabajo realizado por Mendoza [19], propuso un nuevo enfoque que mejora la adaptabilidad y la eficiencia del algoritmo genético (AG), cuando es aplicado al problema de reconfiguración. Esta investigación propone un método capaz de reducir el espacio de búsqueda e incorpora nuevos operadores de cruz y mutación. La reducción del espacio de búsqueda se lleva a cabo gracias a una codificación entera correspondiente a las mallas fundamentales del sistema a estudiar. Esta codificación garantiza que una gran parte de los individuos creados para el algoritmo genético (AG) sean factibles. Por otro lado, los nuevos

operadores permiten reducir drásticamente el tiempo de cálculo y minimiza los requisitos de memoria, lo que garantiza una búsqueda eficiente en comparación con el clásico algoritmo genético (AG).

Los métodos de optimización metaheurísticos imitan el comportamiento de fenómenos de la naturaleza. Uno de estos es el algoritmo Particle Swarm Optimization (PSO), que imita el comportamiento de aves o peces en la búsqueda de su alimento. En trabajos realizados por Abdelaziz [20], propone una modificación del algoritmo PSO para resolver el problema de reconfiguración. El algoritmo presenta una modificación con el uso de una masa de inercia que disminuye linealmente durante la simulación. Esta configuración, permite que PSO mejore su exploración en áreas grandes en el inicio de la simulación. Además se presenta una modificación en el número de iteraciones y el tamaño de la población inicial.

Otro algoritmo bioinspirado es el Artificial Bee Coloni Algorithm (ABC), este imita el comportamiento de abejas en la búsqueda de los focos de miel. En trabajos realizados por Nguyen [21], utiliza el algoritmo ABC para la determinación del elemento de seccionamiento para ser operado, con el fin de resolver el problema de minimización de pérdidas del sistema.

Retomando la idea de modificar operadores de métodos de optimización, el autor Abdelaziz [22], utiliza una modificación del algoritmo búsqueda tabú para solucionar el problema de reconfiguración. Este algoritmo consiste en establecer como la peor solución, como un tabú y realizar su búsqueda con esa ideología. El autor introduce una modificación en el uso de una lista tabú con tamaño variable de acuerdo al sistema. Además, un movimiento multiplicativo aleatorio se utiliza para el proceso de búsqueda hacia regiones inexploradas. Estas modificaciones muestran que el nuevo algoritmo híbrido tiene como ventaja una mejor convergencia.

Un trabajo realizado por Pal [23], aborda dos problemas de optimización, la reconfiguración y la restauración de servicio. Ambos problemas son resueltos con un novedoso método llamado Evolución Diferencial (DE). El nuevo algoritmo demostró ser capaz de resolver este tipo de problemas.

Un año después, se propone una nueva modificación del algoritmo PSO. Trabajos realizados por Salman [24], propone un nuevo algoritmo de optimización para resolver el problema de reconfiguración, basado en un híbrido enjambre de partículas (PSO), junto con el algoritmo de optimización NelderMin (NM), llamándose PSOM. Otra modificación al algoritmo PSO es realizada por Taher [25], realiza una búsqueda multiobjetivo del problema de reconfiguración, considerando el objetivo de minimizar pérdidas, desviación de tensión y desequilibrio de cargas. También utilizó un método iterativo difuso que permite al operador, determinar el grado de satisfacción de cada función objetivo.

La formulación del problema de reconfiguración es de carácter no lineal y hay autores que tratan de modificarlo o linealizarlo para utilizar los clásicos métodos de optimización. En trabajos realizados por Antonio [26], presenta una nueva manera de formular y resolver el problema de reconfiguración. Las ecuaciones del sistema que representan a la topología de la red, las ecuaciones de flujo de potencia y las ecuaciones de la función objetivo, se transforman en un

modelo dinámico artificial, formulado utilizando únicamente ecuaciones de Lyapunov. Las posibles restricciones de desigualdad, se manejan mediante el uso de variables de holgura adicionales para transformarlas en restricciones de igualdad. A partir de un problema en el continuo dominio del tiempo, se obtiene una solución entera continua y mixta en un dominio Lyapunov. Los resultados obtenidos en un sistema prueba se muestran y discuten.

En la publicación realizada por Liyong [27], se investiga una nueva modificación al algoritmo genético, adaptándose para resolver el modelo propuesto en el esquema de reconfiguración óptima. Se utilizan 2 redes para demostrar la exactitud y la eficiencia de las modificaciones realizadas. Una última publicación realizada por Dusharla [28], realiza una modificación al método cumulo de partículas (PSO), empleado para solucionar el problema de reconfiguración. El enfoque consiste en realizar las simulaciones en un sistema IEEE 33 a prueba de situaciones y condiciones de ocurrencia de fallas.

Dentro de los últimos años los estudios realizados para solucionar el problema de reconfiguración, normalmente utilizan algoritmo previamente publicados, ya que de esta forma se pueden mejorar las capacidades de estos algoritmos. Para demostrar los resultados se utilizan redes de distribución de prueba como IEEE 16, 33, 69 buses.

4.5 Últimas Aplicaciones para Reconfiguración Considerando GD

La evolución de los trabajos solucionando el problema de reconfiguración considera medios de generación distribuidos (GD), Como uno de los tantos medios para mejorar el estado de la red. En esta sección se encarga se mostrar los nuevos enfoques para reconfiguración al momento de utilizar esta tecnología.

En estudios realizados por Olamaei [29], presenta un enfoque para reconfiguración de la red de distribución, considerando la GD presente en la red. Se utiliza le método de optimización basado en cúmulos (PSO), para obtener resultados al momento de incorporar esta tecnología en la red. Otra aplicación del algoritmo PSO por los mismos autores [30], realizan una búsqueda multiobjetivo, considerando los objetivos de minimiza pérdida activa, costos totales de energía activa generada por los GD y el número de operaciones de los elementos de red. La viabilidad del enfoque multiobjetivo propuesto, se demuestra y compara con otros métodos evolutivos tales como el algoritmo genético (AG) y búsqueda tabú (TS).

Una nueva solución al problema de reconfiguración es propuesta por Qiwang [31], él realiza la búsqueda basándose en la sensibilidad y el algoritmo de intercambio de ramas. Este trabajo utiliza la sensibilidad de pérdida de potencia real en la primera etapa y decide que interruptor de bucle debe estar cerrado. En la segunda etapa se utiliza un procedimiento de intercambio de ramas para definir la solución.

El algoritmo búsqueda tabú se ha utilizado para realizar la reconfiguración con GD dentro de una red de distribución. Estudios realizados por Rugthaichareoncheep [32], implementan este algoritmo utilizando la red IEEE 69 buses y busca la configuración con la menos pérdida. Los

resultados demuestran que la configuración encontrada entrega la menos pérdida y demuestra los beneficios de incorporar esta tecnología.

La técnica Ordinal Optimization (OO), junto con la optimización de enjambre de partículas (PSO) se presenta en estudios realizados por [33]. Un conjunto de buenos individuos seleccionados para la técnica OO, se toma como las partículas iniciales para la solución de PSO. Estas modificaciones aceleran la convergencia a la solución esperada.

Otra modificación para el algoritmo genético (AG) es propuesta por Zou [34]. Se adapta el método de codificación basado en bucles, reduciendo en gran medida las soluciones no factibles producidas para el algoritmo genético (AG). Esta modificación del algoritmo genético es el mismo que utilizó Mendoza [19] en su trabajo, y los resultados demuestran que los beneficios incrementan considerablemente.

Existe un interés creciente en fuentes de generación renovables interconectados en la red de distribución. Entre ellas están las eólicas y fotovoltaicas, siendo las más estudiadas por sus beneficios. Estudios realizados por Aboelsood [35], propone un método de reconfiguración considerando la mínima pérdida, pero indica que existe la incertidumbre entre la demanda y la generación. El enfoque se basa en un modelo de generación probabilístico que combina todas las posibles condiciones de funcionamiento de la GD renovable, con sus posibilidades de ocurrencia. Para obtener la solución se emplea el algoritmo genético (AG).

Existe una constante competencia entre cual es el mejor algoritmo de optimización. En trabajos realizados por Almoataz [36], propone dos algoritmos inspirados en fenómenos naturales para resolver el problema de reconfiguración. Ant Colony Optimization (ACO) implementado con Hyper Cube (HC) y Harmony Search (HS). Los resultados utilizando los algoritmos propuestos, muestran que se encuentran soluciones aceptables en los alimentadores propuestos, pero sin embargo HS requiere menos tiempo de simulación. La aplicación de HC, resulto ser más robusto y fácil de manejar que el ACO estándar.

El algoritmo NSGA-II se utiliza para resolver el problema de reconfiguración. Trabajos realizados por [37], utiliza el novedoso método para realizar la reconfiguración de la red considerando GD dentro de la red de distribución. La formulación original considera tiempos de ejecución aceptables, y han demostrado la precisión y la rapidez del algoritmo propuesto.

Estudios realizados por Behdad [38], propone un método basado en saltos de rana (SFLA) para solucionar el problema de reconfiguración. El método propuesto se aplica en los sistemas IEEE 33 y 69 buses y los resultados confirman las capacidades del método en comparación con otros.

Otra aplicación de reconfiguración, considerando la presencia de GD renovable dentro de la red de distribución, se muestra en trabajos realizados por [39]. Este modela las curvas de generación eólica y fotovoltaica, considerando el factor de potencia en ellos. Se utiliza una modificación del algoritmo PSO, dándole un enfoque multiobjetivo, considerando la mínima pérdida, desviación de tensión y el desperdicio de energía desde la GD. Los resultados obtenidos indican el mejor rendimiento de la red.

Últimos trabajos realizando la reconfiguración considerando generación distribuida dentro de la red de distribución, se muestran en trabajos realizados por [40]. Este trabajo desarrolla un modelo de programación lineal entera mixta estocástica (S-MILP). Los objetivos en este trabajos fueron minimizar los costos, pérdidas y mejorar el perfil de tensión. Se realizaron simulaciones en el sistema IEEE 41 buses y los resultados demuestran que utilizar GD con reconfiguración mejora los indicadores antes nombrados.

De acuerdo a la revisión bibliográfica, la mayoría de los autores que utilizan la GD para mejorar el estado de la red, minimizando las pérdidas de potencia en los alimentadores. Además, en cuanto a las restricciones, todos los autores siguen la misma tendencia y son límites térmicos, balance de cargas, desviación de tensión, estructura radial y límites de capacidad para el GD. Por otro lado, se diferencian estudios de acuerdo a la naturaleza de la GD. Algunos consideran generadores convencionales y otro prefieren estudios con generadores renovables.

4.6 Algoritmo Big Bang – Big Crunch

En el año 2006, un nuevo método de optimización basado en la teoría de la creación del universo es propuesto por Osman [1]. Este algoritmo consiste en 2 etapas fundamentales: La fase del Big Bang se produce un desorden y se disipa la energía, mientras que en la fase del Big Crunch, las partículas distribuidas son dibujadas en un orden específico. Inspirado en esta teoría, se construye un algoritmo de optimización llamado Big Bang – Big Crunch (BB-BC). Este genera puntos aleatorios en el espacio de búsqueda durante la etapa del Big Bang y reduce dichos puntos a un único punto representativo a través de un centro de masa o función de menos costos, en la fase del Big Crunch. Este estudio demuestra que el diseño del nuevo algoritmo BB-BC es superior al algoritmo genético (AG) clásico.

La primera aplicación de este algoritmo fue para el diseño de estructuras espaciales [41]. El objetivo de este trabajo fue minimizar el pesos total (o coste) de las estructuras, sometidas a restricciones de material y rendimiento en forme de límites de tensión y deflexión. Lo más significativo de este algoritmo es su fácil implementación ya que requiere relativamente de pocos parámetros de control y tiene la capacidad de mejorar una mezcla de variables de diseño continua y discreta.

Luego se realizó un trabajo que evaluaba el rendimiento de objetivos mediante sensores pasivos para aplicaciones prácticas [42]. Los parámetros básicos que definen el movimiento de blancos y se estiman a través de datos de medición de ruido dañado. Este trabajo utilizó el nuevo algoritmo de optimización BB-BC. Los resultados son superiores en relación con el algoritmo genético (AG) clásico, tanto en términos de velocidad y precisión.

Aunque el algoritmo BB-BC se desempeña bien en la exploración dentro del espacio de búsqueda, este tiene algunos problemas en quedar atrapado en soluciones locales. Si todos los candidatos en el Big Bang inicial se recogen en pequeñas cantidades, el método puede no encontrar la solución óptima y tendrá una alta posibilidad de quedar atrapado en soluciones locales. Existe la opción de aumentar la muestra inicial, pero implicaría un mayor tiempo en el cálculo y esfuerzo computacional.

Estudios realizados por Kaveh [43], incorporan la capacidad del método PSO para mejorar algunas desventajas que tiene este método. Además, se incorpora el Sub Optimization Mechanism (SOM) como una herramienta auxiliar que funciona como un mecanismo de actualización del espacio de búsqueda. Se emplea este nuevo híbrido BB-BC para el diseño de estructuras de celosía. Los resultados fueron comparados con otros métodos de optimización y se demuestra su superioridad.

Otros estudios que incorporan las capacidades del algoritmo de cúmulos (PSO) en el algoritmo BB-BC es [44]. Este realiza un estudio de diseño óptimo de cúpulas, incluyendo el cálculo de las coordenadas de ejes y la construcción de elementos. La no linealidad de la cúpula se considera durante el proceso de optimización y los resultados obtenidos demuestran la eficiencia del algoritmo HBB-BC.

Durante los próximos 2 años, se realizaron estudios utilizando el algoritmo BB-BC ignorando las limitaciones al momento de explorar el espacio de búsqueda. Estudios realizados por Bobby [45], utiliza el algoritmo para identificar los parámetros de los sistemas estructurales en condiciones de masa. También, se identificaron estudios aplicados a sistemas de control, como por ejemplos el trabajo realizado por Aliasghary [46], Utiliza el algoritmo BB-BC para reducir el polinomio característico. Tufan [47], realizó la construcción de un modelo para el diseño de un controlador para aplicaciones en péndulos invertidos. En [48] se empleó el algoritmo BB-BC para el diseño difuso de un modelo basado en un controlador para aplicaciones no lineales.

En el año 2012 se realizó la primera aplicación en sistemas eléctricos. Trabajos realizados por Zandi [49], utiliza el algoritmo BB-BC para la optimización de las medidas de control preventivo, para mejorar la seguridad dinámica del sistema, manteniendo la estabilidad transitoria. El método busca la estrategia de reprogramación óptima de las diferentes partes del espacio de búsqueda multidimensional y aumentar la posibilidad de encontrar soluciones globales, sin adherirse a soluciones locales.

Estudios realizados por Mostafa [2], presenta un eficiente algoritmo BB-BC para resolver el problema de reconfiguración multiobjetivo, en los sistemas de distribución equilibrados y desequilibrados. Los objetivos que considera son, minimizas las pérdidas reales, la mínima desviación de tensión en nodos y el equilibrio de cargar de los alimentadores. El algoritmo HBB-BC es un método eficiente y de gran alcance, ya que tiene una alta precisión, rápida convergencia y una fácil aplicación. Este algoritmo utiliza las capacidades de optimización de PSO para mejorar la exploración del algoritmo BB-BC. Además, utiliza un operador de mutación después de actualizas la posición de las partículas y así, evitar soluciones locales.

Esta nueva modificación se empleó para el diseño de estabilizadores de potencia (PSS) [50]. Este estudio empleo PSO para mejorar la exploración de BB-BC al momento de diseñar el controlador que maximiza la amortiguación de las oscilaciones electromagnéticas que se producen en los sistemas de potencia después de una perturbación.

Estudios realizados Ahmadi [51], soluciona el problema de reconfiguración empleando el algoritmo híbrido utilizado en [2]. Este trabajo realiza la reconfiguración y la ubicación de

generadores distribuidos en la red de distribución. El método propuesto abarca las funciones objetivos de mínima pérdida activa, estabilidad de tensión, costos de GD y la emisión de gases de efecto invernadero. El método se probó en sistemas equilibrados y desequilibrados, mostrando que no solo ofrece una capacidad de exploración mejorada, sino que también tiene una mejor tasa de convergencia en comparación con otros métodos.

Se han realizado estudios como en [52], desarrollando un algoritmo efectivo para el máximo punto de energía, con el fin de lograr un funcionamiento de máxima potencia en un sistema fotovoltaico (PV). Estudios realizados por Abdelaziz [53], utiliza el algoritmo BB-BC para el modelo de los generadores distribuidos (GD) a base de recursos renovables estocásticamente, dependiendo de los factores de una adecuada planificación de las redes de distribución. Y por último, el trabajo realizado por Almoataz [54], propone un enfoque de optimización multiobjetivo basado en el método BB-BC, utilizando para una planificación óptima de generación distribuida. El enfoque propuesto, tiene como objetivo mejorar los índices de desempeño del sistema mediante el dimensionamiento y ubicación de generadores distribuidos conectados a la red de distribución.

El algoritmo Big Bang – Big Crunch, es un método que ha tenido muy buenos resultados en numerosos estudios, demostrando ser eficiente al momento de converger a la solución deseada. Dos años después de su publicación, estudios indicaron problemas al momento de explorar el espacio de búsqueda, ya que tiene una alta posibilidad de quedar atrapado dentro de espacios locales. La solución a este problema es aumentar el tamaño de la población inicial previa a la fase del Big Bang, Pero a cambio se requiere de más tiempo de iteración y un mayor esfuerzo computacional.

Desde entonces se han realizado estudios incorporando operadores de otros métodos de optimización, con el objetivo de obtener un equivalente híbrido del algoritmo BB-BC, mejorando sus capacidades de exploración. Para este proyecto se implementan las capacidades del algoritmo PSO para direccionar la búsqueda. Además, para no quedar atrapado en zonas locales, se incorpora un operador de mutación del algoritmo genético (AG), al momento de crear los nuevos individuos para el Big Bang. Esta modificación es la misma que publica el autor [2] en su trabajo, el cual asegura que el nuevo híbrido BB-BC tendrá un buen desempeño en aplicaciones eléctricas.

4.7 Conclusión del Capítulo

El propósito de realizar un estado del arte, es para dar a conocer que históricamente solucionar el problema de reconfiguración y utilizar GD dentro de la red, mejoran considerablemente el estado de la red. Por otro lado, sirve para identificar los objetivos y límites que deben ser considerados para modelar el presente proyecto. En conjunto, se realizó un estado del arte del algoritmo Big Bang – Big Crunch (BB-BC), porque fue el método que fue seleccionado para solucionar el problema de reconfiguración. Este estado del arte fue de gran importancia, porque permitió identificar los problemas que presenta este método al momento de realizar su búsqueda, pero las modificaciones que fueron indicadas en este capítulo, convierten a este algoritmo en un nuevo y mejorado híbrido Big Bang – Big Crunch (HBB-BC).

5 Método de Solución Propuesto

5.1 Introducción del Capítulo

Dentro del estado del arte, se mostraron cuáles son las formas de solucionar el problema de reconfiguración, estos pueden ser: utilizar métodos heurísticos, linealizar las ecuaciones del problema, utilizar métodos de optimización metaheurísticos, realizar una comunicación entre equipos de medición en terreno, entre otros. La solución propuesta para el presente proyecto, es un método de optimización metaheurísticos llamado Big Bang – Big Crunch (BB-BC).

Este método es de naturaleza evolutiva, es decir, parte de una pequeña porción de posibles candidatos y se van mejorando en cada iteración hasta que termine el proceso. El principal motivo de utilizar el algoritmo, es porque no requiere de una formulación rigurosa para realizar la búsqueda, por lo tanto, puede enfrentarse a la naturaleza no lineal de las ecuaciones matemáticas del flujo de carga. En general, la desventaja de estos métodos es el hecho de no saber cuál es su comportamiento en cada iteración, y como consecuencia, los resultados no siempre tienen que coincidir.

En el capítulo anterior, se indicó que el algoritmo BB-BC tiene dificultades al moverse dentro del espacio de búsqueda. Para esto, se utilizan las capacidades del algoritmo de cúmulos (PSO) y el operador de mutación del algoritmo genético (AG), para calcular los nuevos candidatos para una próxima iteración. Estas modificaciones ayuda al algoritmo BB-BC a recorrer zonas inexploradas, dando origen a un nuevo y mejorado híbrido Big Bang – Big Crunch (HBB-BC).

5.2 Big Bang – Big Crunch (BB-BC)

El algoritmo BB-BC fue propuesto por Osman y Ibrahim [1] en el año 2006, y fue inspirado en la teoría de la evolución del universo. Sus principales ventajas son su bajo tiempo computacional, fácil implementación y rápida convergencia. El algoritmo BB-BC se puede describir en 2 etapas fundamentales: La primera es el Big Bang, esta corresponde a la etapa de disipación de energía, donde todas las soluciones candidatas son distribuidas aleatoriamente dentro del espacio de búsqueda. Luego está la etapa del Big Crunch, donde se concentra la energía en un centro de masa. Básicamente calcula las nuevas soluciones alrededor de un centro de masa correspondiente a la función de menos costo, donde son utilizadas para un próximo Big Bang (iteración).

El centro de masa se calcula con respecto a las posiciones actuales de cada candidato y su valor de función objetivo. Este cálculo se muestra en la expresión (5-1).

$$A_i^{C(k)} = \frac{\sum_{j=1}^N \frac{1}{f_j} \cdot A_i^{(k,j)}}{\sum_{j=1}^N \frac{1}{f_j}} \quad (5-1)$$

Donde:

$A_i^{C(k)}$: Centro de masa del componente i en la iteración k.

$A_i^{(k,j)}$: Componente i de la partícula j en la iteración k.

f_j : Valor de la función objetivo del candidato j.

N : Tamaño de la población elegida en la fase del Big Bang.

i : Componente de cada partícula j.

Los nuevos candidatos para el siguiente Big Bang, se distribuyen normalmente alrededor del centro de masa o el mejor individuo. Considerando una función de distribución normal que disminuye en cada iteración. La ecuación que calcula los nuevos candidatos se muestra en la expresión (5-2).

$$A_i^{(k+1,j)} = A_i^{C(k)} + \frac{r_j \cdot \alpha_1 \cdot (A_{imax} - A_{imin})}{K + 1} \quad (5-2)$$

Donde:

r_j : Número aleatorio asociado a una distribución normal estándar.

α_1 : Parámetro que limita el espacio de búsqueda.

A_{imax} y A_{imin} : Límites superior e inferior para el componente i.

i : Componente de cada partícula j.

Este procedimiento del Big Bang – Big Crunch, continúa hasta que se cumple un criterio de término.

5.3 Híbrido Big Bang – Big Crunch (HBB-BC)

El algoritmo HBB-BC utiliza las capacidades del algoritmo de cúmulos (PSO) y el operador de mutación del algoritmo genético (AG), para mejorar el direccionamiento de la búsqueda y para explorar nuevas zonas. Estas modificaciones fueron propuestas por el autor [2], y confirma que mejora considerablemente las capacidades del algoritmo propuesto.

El algoritmo Particle Swarm optimization (PSO), fue propuesto por Kennedy y Eberhart [55] en el año 1995, y se inspiró en el comportamiento social de cúmulos de aves o peses. PSO consiste en un enjambre de partículas como soluciones candidatas para el problema de optimización. Cada partícula ajusta su trayectoria hacia su mejor posición previamente vista (mejor solución local) y la mejora posición global del enjambre (mejor solución global). El algoritmo HBB-BC utiliza esta capacidad para el cálculo de los nuevos candidatos para un próximo Big Bang. Este cálculo se muestra en la expresión (5-3).

$$A_i^{(k+1,j)} = \alpha_2 \cdot A_i^{C(k)} + (1 - \alpha_2) \left(\alpha_3 \cdot A_i^{gbest(k)} + (1 - \alpha_3) \cdot A_i^{lbest(k,j)} \right) + \frac{r_j \cdot \alpha_1 \cdot (A_{imax} - A_{imin})}{k + 1} \quad (5-3)$$

Donde:

$A_i^{lbest(k,j)}$: Mejor posición del componente i de la partícula j en la iteración k.

$A_i^{gbest(k)}$: Mejor posición global del componente i en la iteración k.

α_2 y α_3 : Parámetros ajustables que controlan el efecto del mejor global y local respectivamente.

A estos nuevos candidatos para un próximo Big Band, se les aplica un operador de mutación. Ese operador se aplica a cada hijo de manera individual y consiste en alterar aleatoriamente (con una probabilidad pequeña) cada gen que compone al cromosoma. En simples palabras, se escoge una partícula aleatoriamente y se modifica parte de su estructura, consultando con las líneas de su correspondiente maya fundamental. Esta modificación ayuda a explorar nuevas zonas del espacio de búsqueda.

5.4 Conclusión del Capítulo

Para buscar un método de optimización, se deben considerar las características no lineales que tiene el problema de reconfiguración. En esta ocasión, se detalló porque el algoritmo HBB-BC, puede solucionar problemas de optimización como lo es el de reconfiguración, y por medio del estado del arte, quedo claro que es bastante eficiente al momento de realizar su exploración. En el presente capítulo, se detalló cual es el funcionamiento del algoritmo BB-BC y se indicaron cuáles son las nuevas modificaciones que tiene su versión híbrida HBB-BC.

6 Formulación del Problema de Reconfiguración

6.1 Introducción del Capítulo

Como todo problema de optimización, ya sea lineal o no lineal, requiere de una adecuada formulación, y debe estar sujeta a las restricciones que limiten el espacio de búsqueda. En este capítulo se mostrarán los objetivos propuestos en esta búsqueda, considerando las restricciones que una red de distribución debe tener para realizar un buen suministro y además, indicar las restricciones que los GD deben tener para su correcto funcionamiento.

Hasta la fecha, todas las publicaciones realizadas en busca de resolver el problema de reconfiguración, tiene como objetivo primordial el de minimizar la potencia activa disipada en las líneas de la red de distribución. Este objetivo, ayuda a las empresas distribuidoras a utilizar de manera eficiente los recursos energéticos que poseen.

Con la llegada de la GD dentro de las redes de distribución, se han notificado grandes beneficios para las empresas de distribución. Pero tiene aspectos desventajosos si no es utilizada correctamente. Un aporte significativo de reactivos al sistema o condiciones de flujo no deseados, son algunas de estas desventajas. Pero si esta tecnología es utilizada de manera adecuada, reduce considerablemente las pérdidas y mejora el perfil de tensión en usuarios alejados a la subestación. Por lo tanto, de acuerdo a los objetivos históricos y el beneficio que trae esta tecnología, se considera además el objetivo de minimizar las desviaciones de tensión en los nodos del sistema.

El enfoque propuesto para el presente proyecto modifica la formulación del problema, porque para realizar la reconfiguración se debe considerar el particular funcionamiento de los generadores eólicos y fotovoltaico, lo que obliga a realizar una búsqueda que evalúa cada candidato en cada instante del día. Por otro lado, como el algoritmo HBB-BC no fue diseñado para realizar búsquedas multiobjetivos, se deben realizar algunas modificaciones sobre estos objetivos, transformando el problema de multiobjetivo a uno mono objetivo. En el presente capítulo, se detallaran los objetivos por separado, para luego construir la verdadera función objetivo que será utilizada para construir la formulación del problema de reconfiguración.

6.2 Función Objetivo

El objetivo que minimiza las pérdidas disipadas en todas las líneas de la red se muestra en la expresión (6-1). Esta consiste en realizar la sumatoria de todas las pérdidas activas producidas en las líneas de sistema.

Objetivo 1

$$F(K_i, f) = \sum_{i=1}^{N_{lineas}} P_{loss_i} \cdot K_i = \sum_{i=1}^{N_{lineas}} K_i \cdot R_i \cdot I_i^2 \quad (6-1)$$

Donde:

K_i : Corresponde al estado de la i-ésima línea.

P_{loss_i} : Son las pérdidas de potencia activa disipadas en la línea i del sistema.

R_i : Es la resistencia de la i-ésima línea del sistema.

I_i : Es el flujo de corriente en la i-ésima línea del sistema.

El objetivo que minimiza la desviación de tensión en los nodos del sistema, se puede obtener mediante la expresión (6-2). Esta expresión se refiere a minimizar la máxima desviación de tensión en los nodos del sistema.

Objetivo 2

$$F(v_n, f) = \min(\max[|V_{ref} - \min\{v_n\}|, |V_{ref} - \max\{V_n\}|]) \quad (6-2)$$

Donde:

V_{ref} : Es el voltaje de referencia para todos los nodos del sistema.

V_n : Es el voltaje del n-ésimo nodo del sistema.

La modificación que se debe realizar sobre los objetivos nombrados y podes utilizar el algoritmo mono objetivo HBB-BC, se muestra en la expresión (6-3). Esta expresión realiza la suma de los 2 objetivos para este proyecto, utilizando un factor de peso para cada uno, donde el objetivo de minimizar las pérdidas activas queda multiplicado por w_1 y el que minimiza las desviaciones de tensión es multiplicado por w_2 .

$$F.O. = \left(\sum_{i=1}^{N_{lineas}} P_{loss_i} \cdot K_i \right) \cdot w_1 + (\min(\max[|V_{ref} - \min\{v_n\}|, |V_{ref} - \max\{V_n\}|])) \cdot w_2 \quad (6-3)$$

Donde:

w_1 y w_2 : Son factores de peso para cada uno de los objetivos antes nombrados.

El valor que se asigna a los factores de peso de cada objetivo, depende del conocimiento y de la prioridad del operador que realizará las simulaciones. En esta ocasión, los valores de los factores serán unitario para así realizar la búsqueda sin discriminar un objetivo y para encontrar mejores resultados.

Se debe realizar una última modificación sobre la función objetivo, porque se debe realizar la búsqueda considerando la variabilidad del asunto. Esta consiste en realizar la suma de la expresión (6-3) dentro de las 24 horas del día.

$$F.O. = \text{Min} \sum_{t=1}^{24} \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{lineas}}} \frac{P_{\text{loss}}^t \cdot 100\% \cdot w_1}{P_{\text{loss}}^t} + \frac{\max[|V_{\text{ref}} - \min\{V_n^t\}|, |V_{\text{ref}} - \max\{V_n^t\}|] \cdot 100\% \cdot w_2}{V_{\text{nom}}} \right) \quad (6-4)$$

Para simplificar la expresión y obtener la verdadera función objetivo, se debe realizar la siguiente modificación.

$$F.O. = \text{Min} \sum_{t=1}^{24} \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{lineas}}} P_{\text{loss}}^t \cdot w_a^t + \max[|V_{\text{ref}} - \min\{V_n^t\}|, |V_{\text{ref}} - \max\{V_n^t\}|] \cdot w_b \right) \quad (6-5)$$

$$w_a^t = \frac{w_1 \cdot 100\%}{P_{\text{loss}}^t} \quad (6-6)$$

$$w_b = \frac{w_2 \cdot 100\%}{V_{\text{nom}}} \quad (6-7)$$

Donde:

P_{loss}^t : Pérdida de potencia activa en la i-ésima línea en el instante t.

P_{loss}^t : Pérdida de potencia activa inicial en el instante t.

V_n^t : Tensión en el n-ésimo nodo en el instante t.

w_1 : Factor de peso para el objetivo 1.

w_2 : Factor de peso para el objetivo 2.

w_a^t : Factor de peso equivalente para el objetivo 1 en el instante t.

w_b : Factor de peso equivalente para el objetivo 2.

La suma que se realiza sobre los objetivos propuestos, se debe ajustar para que las unidades sean la misma y tenga coherencia en el desarrollo del proyecto. Las pérdidas activas de la red encuentran en forma de porcentaje con respecto a las originales y la desviación de tensión en porcentaje con respecto a su valor de referencia.

Las restricciones de la formulación del problema son las siguientes:

1. Límite operacional de tensión en nodos: la estructura obtenida después de realizar la reconfiguración debe respetar los límites de tensión especificados en la sección 2.5.2.

$$V^{min} \leq V_j \leq V^{max} \quad j = 1, 2, \dots, N_{barras} \quad (6-8)$$

2. Límite de corriente en líneas: todas las líneas conectadas deben ser operadas con un flujo de corriente que sea limitado, para no sobrepasar los límites térmicos del conductor.

$$K_i \cdot |I_i| \leq I_i^{max} \quad i = 1, 2, \dots, N_{lineas} \quad (6-9)$$

3. Estructura radial: se desea que después de realizar la reconfiguración, la red encontrada tenga una estructura radial. Para ello se debe cumplir la siguiente igualdad.

$$N_{lineas} = N_{barras} - 1 \quad (6-10)$$

4. Límites de generación: El generador distribuido (GD) fue diseñado para trabajar con un factor de potencia unitario, por lo que solamente se debe limitar los aportes activos del mismo.

$$P_{GD,n}^{min} \leq P_{GD,n} \leq P_{GD,n}^{max} \quad n = 1, 2, \dots, N_{GD} \quad (6-11)$$

6.3 Conclusión del Capítulo

Los métodos de optimización metaheurísticos, no necesitan de una formulación rigurosa para realizar la búsqueda, solamente es necesario indicar los objetivos según corresponda el método que se utilizara e indicar las restricciones que limitarán el espacio de búsqueda. En el presente proyecto, se desea buscar una estructura de red que minimice las pérdidas y la desviación de tensión, para este fin, se realizará la optimización utilizando el algoritmo HBB-BC.

En el capítulo, se mostraron cuáles deben ser las modificaciones que se deben implementar sobre los objetivos propuestos, porque el algoritmo HBB-BC fue diseñado solamente para realizar búsquedas mono objetivo. Luego, para considerar la variabilidad de la demanda y la generación, se agrega una sumatoria adicional sobre esta expresión, con el objetivo de evaluar las condiciones de la red en todo momento.

En el próximo capítulo se muestra como se construye el algoritmo para realizar la reconfiguración, considerando los objetivos y el enfoque propuesto para este proyecto.

7 Aspectos Preliminares a las Simulaciones

7.1 Introducción al capítulo

Antes de comenzar con las simulaciones del presente proyecto, es necesario que el lector tenga presente cuales son los enfoques, consideraciones y la metodología empleada para solucionar el problema de reconfiguración. Este capítulo contempla temas como: codificaciones de las variables de decisión, el algoritmo para realizar la reconfiguración, los alimentadores donde se realizaran las simulaciones, el modelo de curvas de demanda y generación y las hipótesis finales del proyecto.

7.2 Variable de Decisión

La función objetivo en el problema de reconfiguración, tienen como variable de control un vector de números que corresponden a las líneas que deberían abrirse para obtener una configuración radial y factible. Para poder indicar que línea se abrirá durante las simulaciones, es necesario realizar una codificación adecuada e inteligente.

La creación de los individuos que se utilizaran dentro de las simulaciones, se obtiene realizando una codificación mediante números enteros correspondiente a las mallas fundamentales de cada red de distribución. Esta codificación fue propuesta por el autor [19], y garantiza que una gran parte de los individuos seleccionados serán factibles dentro de las simulaciones.

El número de mallas fundamentales se obtiene mediante la expresión (7-1).

$$N_L = N_{br} - N_b + 1 \quad (7-1)$$

Donde N_b y N_{br} es el número de nodos y líneas presentes en la red, respectivamente.

En la Figura 7-1 se muestra una red compuesta por 6 nodos y 8 líneas, y se según la expresión (7-1), la cantidad de mallas fundamentales es de 3. Luego la codificación se realiza con un vector de 3 columnas para una línea de cada malla fundamental. Esta codificación reduce el tamaño del vector de variables de decisión, haciéndola más manejable dentro de las simulación.

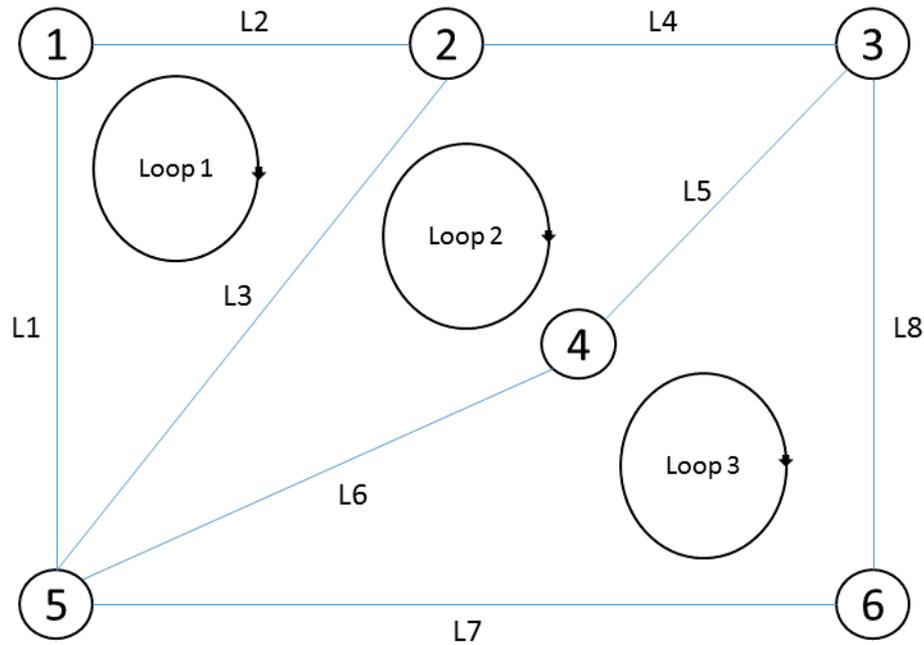


Figura 7-1: Esquema para Obtención de Individuos Iniciales Mediante Mallas Fundamentales [19].

El proceso de obtención de los individuos para el algoritmo HBB-BC, se realiza mediante los siguientes pasos:

1. De cada malla fundamental se abre una línea para que la estructura de la red sea radial.
2. Verificar que para 2 mallas fundamentales, la línea abierta no sea la misma, porque la estructura obtenida no será radial.
3. Verificar que la apertura de las líneas no deje nodos aislados.

Cumpliendo con estos pasos, se asegura que los individuos creados para el algoritmo HBB-BC sean factibles.

7.3 Algoritmo Empleado para Realizar la Reconfiguración

Para utilizar el algoritmo HBB-BC, es necesario adaptar un algoritmo que simule todas las operaciones que se deben realizar para su búsqueda. Esta adaptación del algoritmo debe partir desde la codificación de las mallas fundamentales, generar la población inicial previa al algoritmo y realizar el flujo de carga sobre cada uno de los individuos y aplicar las operaciones del algoritmo HBB-BC hasta se alcance la cantidad máxima de iteraciones. En el presente proyecto, se desea encontrar una estructura de red aceptable frente a una demanda y generación variable durante el día, es por esta razón, que a cada individuo se le debe realizar un flujo de carga y ser evaluado en cada instante del día. Esta acción se realiza para verificar que la estructura encontrada cumpla con las restricciones operacionales a toda hora.

Para que el algoritmo pueda realizar la reconfiguración y evaluar cada individuo a toda hora, se debe construir un ciclo adicional al momento de evaluar a los individuos, este consiste en modificar los datos de carga de cada alimentador para cada hora del día y después realizar el flujo de carga. Esta operación se realiza hasta completar las 24 horas o hasta que el individuo no cumpla con las restricciones, si ese fuera el caso, se ajusta para que no sea considerado dentro del algoritmo HBB-BC.

Para mayor detalle, a continuación se mostrará el algoritmo que se utilizara para solucionar el problema de reconfiguración en el presente proyecto.

El algoritmo HBB-BC se aplica al problema de reconfiguración de la siguiente manera:

1. Definir los datos de entrada: En este paso se introducen los parámetros iniciales de la simulación, como datos de línea y carga del alimentador propuesto, curvas de demanda y generación, parámetros ajustables α_1 , α_2 y α_3 , los factores de peso para cada objetivo, el tamaño de la población, la cantidad máxima de iteraciones y la probabilidad de mutación.
2. Generar la población inicial: En este paso se selecciona aleatoriamente una porción de individuos que serán evaluados en la primera iteración.
3. Comprobar radialidad: Si el individuo no poseen una estructura radial, se ajusta su función objetivo como inválida, para que no sea considerada dentro de las operaciones del algoritmo HBB-BC, pero si cumple con esta restricción se realiza el siguiente ciclo.
 - a. Realizar un flujo de potencia para los candidatos en el instante t: En este paso, el individuo que cumplió con la restricción de radialidad, se le aplica flujo de carga en el instante t de la simulación.
 - b. Restricciones en el instante t: Si el individuo evaluado no cumple con las restricciones de corriente y/o tensión en el instante t, se ajusta su función objetivo como inválida para que no sea considerado en las operaciones del algoritmo HBB-BC y se ingresa el siguiente individuo (vuelva al paso 3).
 - c. Si el individuo evaluado en el instante t cumple con las restricciones antes nombradas, se realiza la suma de la función objetivo expresado por (6-1), en los instante t y t-1.
 - d. Luego se verifica si se completaron las 24 horas del día, si no cumple, este ciclo continúa hasta que el individuo sea evaluado en las 24 horas o si se viola una de las restricciones antes nombradas.
 - e. Repetir el paso 3 (a, b, c y d), hasta que todos los individuos sean evaluados.
4. Calcular el centro de masa $A_i^{C(k)}$ usando la expresión (5-1), determinar la mejor posición de cada partícula $A_i^{lbest(k)}$ y la mejor posición global del conjunto $A_i^{gbest(k)}$.
5. Calcular los nuevos candidatos utilizando la expresión (5-3), luego antes de realizar la siguiente iteración, se aplica el operador de mutación sobre los nuevos candidatos. Este paso permite que el algoritmo no quede atrapado en zonas locales.
6. Repetir los pasos del 3 al 6, hasta que el criterio de término lo indique.

Para un mayor detalle, el algoritmo descrito se ilustra en la Figura 7-2.

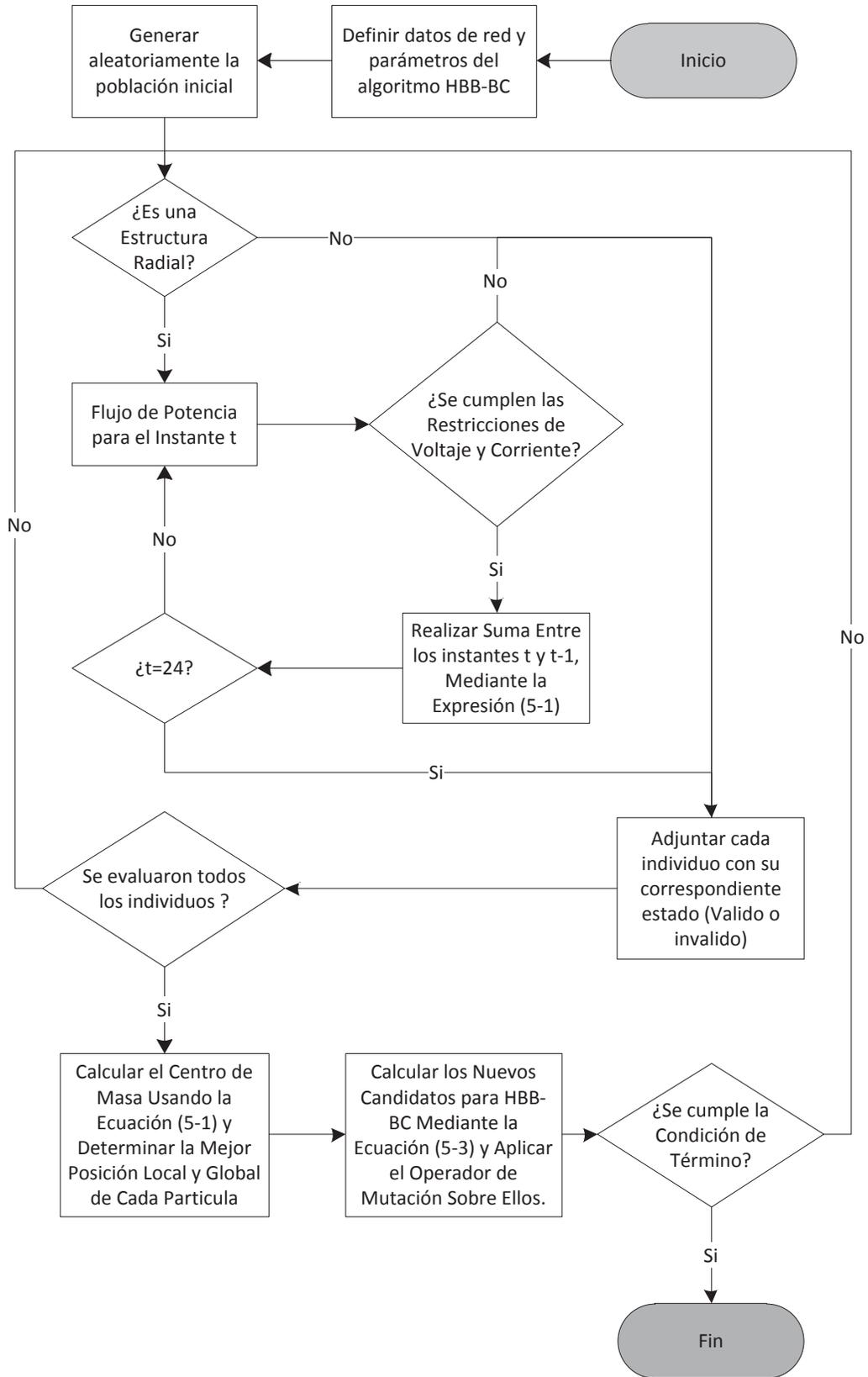


Figura 7-2: Algoritmo Empleado para Realizar la Reconfiguración de la Red.

7.4 Sistemas propuestos para Realizar Simulaciones

Para realizar las simulaciones dentro de los sistemas propuestos para este proyecto, es necesario establecer un modelo representativo de cada alimentador, especificando el tipo de usuario que poseen y el comportamiento que tienen durante el día.

Uno de los sistemas propuesto es uno llamado “Baran” y se ilustra en la Figura 7-3.

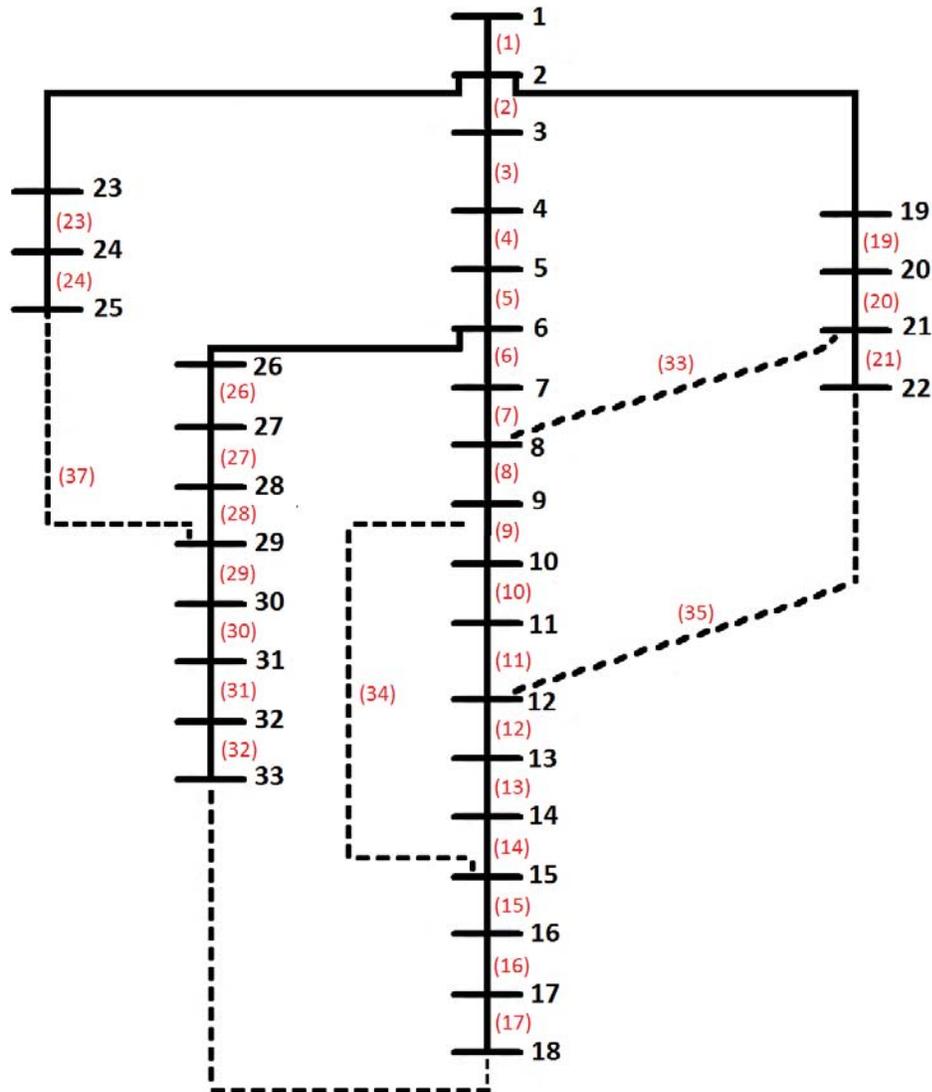


Figura 7-3: Sistema Prueba Baran [56].

Los detalles del sistema Baran, se muestran en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1: Detalles del Sistema Prueba Baran.

	Detalle
Nombre del sistema	Baran
Número de líneas	37
Número de barras	33
Número de barras de generación	1
Número de cargas	32
Tensión base [kV]	13,2
Potencia base [MVA]	100

El segundo sistema utilizado en el presente proyecto es una red de distribución real llamada “Colo Colo”.

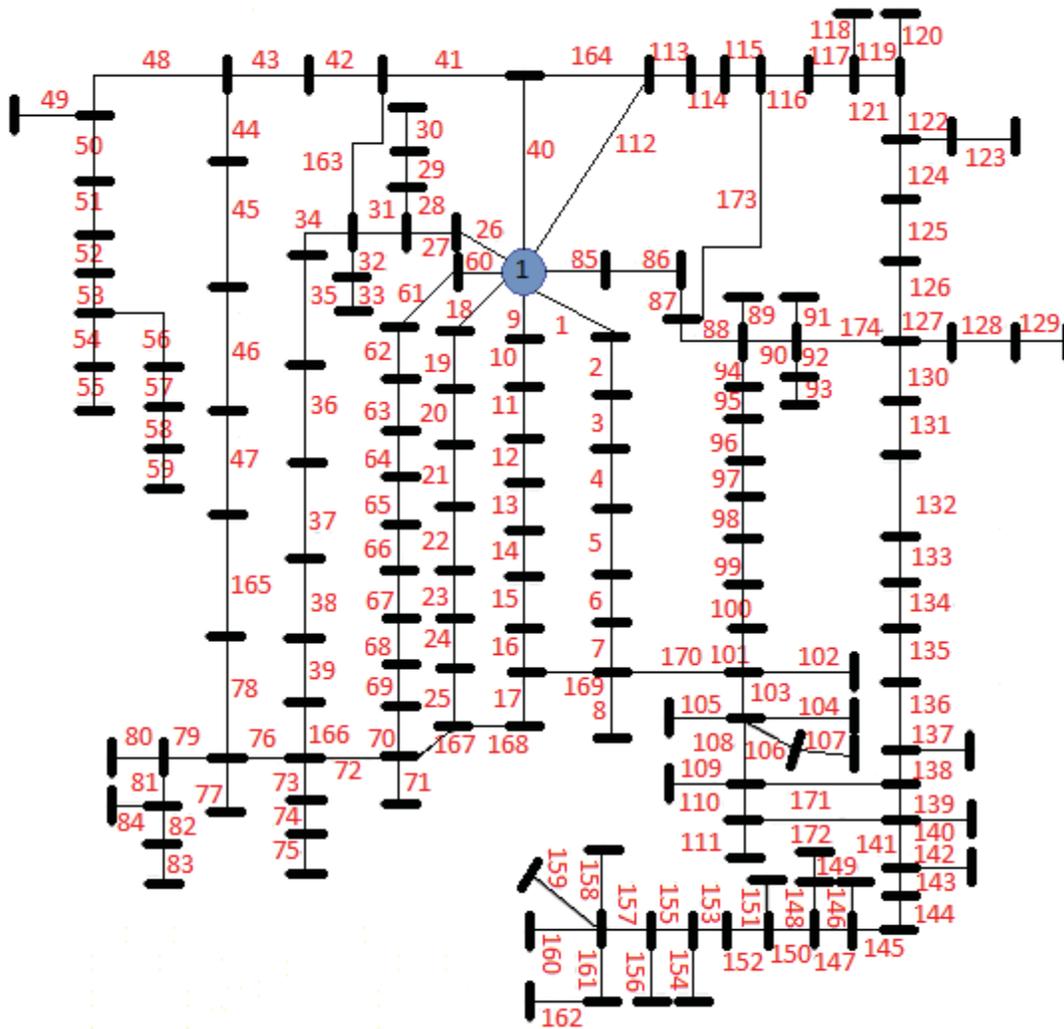


Figura 7-4: Sistema Prueba Colo Colo [57].

Tabla 7-2: Detalles Sistema Real Colo Colo.

	Detalle
Nombre del sistema	Colo Colo
Número de líneas	174
Número de barras	163
Número de barras de generación	1
Número de cargas	162
Tensión base [kV]	13,2
Potencia base [MVA]	10

Luego de indicar cuáles serán los alimentadores para realizar las simulaciones, es necesario especificar la ubicación de los usuarios presentes en la redes de distribución. Este detalle es importante para realizar las modificaciones en los datos de carga para cada hora del día.

7.4.1 Asignación de Áreas de Distribución

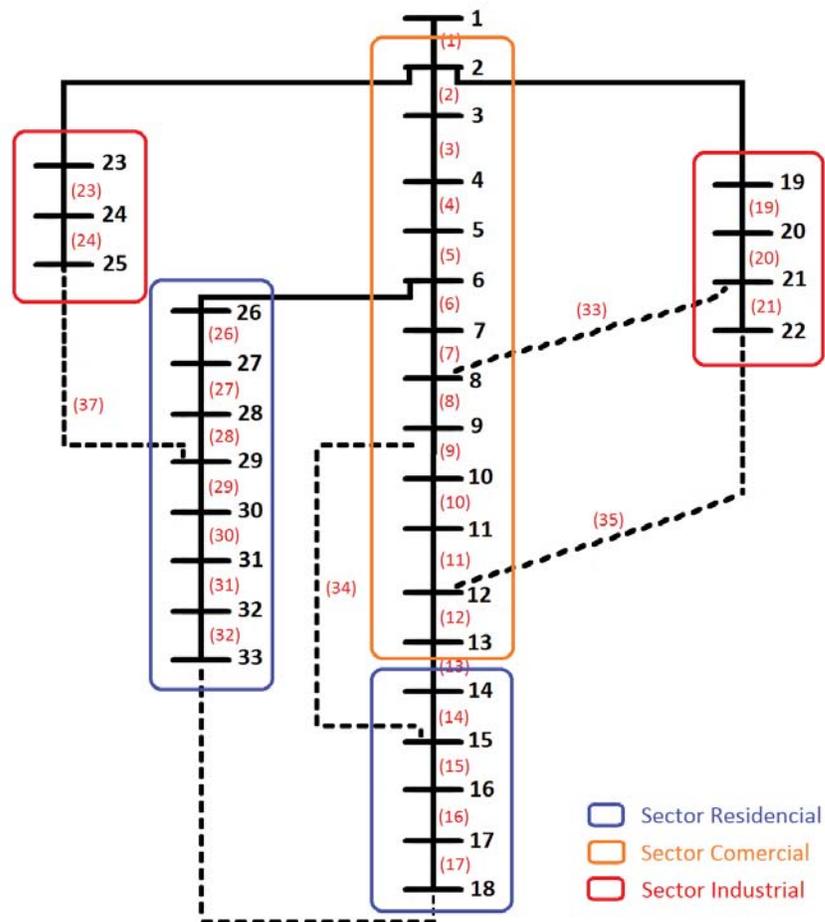


Figura 7-5: Tipos de Clientes en el Sistema Baran.

Tabla 7-3: Descripción de Tipos de Cargas por Nodo en Sistema Baran [56].

Tipos de carga	Nodos						
Sector residencial	14	15	16	17	18	26	27
	28	29	30	31	32	33	
Sector comercial	2	3	4	5	6	7	8
	9	10	11	12	13		
Sector industrial	19	20	21	33	23	24	25

Tabla construida con información consultada en [56].

En el diseño de la red de distribución Colo Colo, la empresa indica que los usuarios están distribuidos como se indica en la Tabla 7-4.

Tabla 7-4: Descripción de Tipos de Cargas por Nodo en sistema Real Colo Colo.

Tipo de carga	Nodos										
Sector Residencial	8	17	25	29	30	40	41	42	43	44	45
	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	70
	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	91
	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116
	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131
	136	137	138	139	1	40	49	74	105	120	135
	48	119	134	47	72	93	118	133	104	46	71
	92	117	132	73							
Sector Comercial	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12
	18	19	20	21	22	23	24	26	27	28	31
	36	37	38	39	60	61	62	63	64	65	66
	86	87	88	89	90	94	95	96	97	98	99
	16	35	85	103	15	34	69	102	14	33	68
	13	32	67	100	101						

Tabla construida con información consultada en [57].

7.4.2 Modelo de Curvas Diarias para Usuarios Típicos

El comportamiento de las cargas tiene un rol muy importante en el suministro eléctrico. Por esta razón, se debe disponer de una adecuada fuente de registros, con tal de generar información fiable y a su vez viable. Para realizar las simulaciones del proyecto, es necesario plantear un modelo del comportamiento de la demanda diaria en los alimentadores.

Como se indicó anteriormente, los tipos de cargas que se pueden identificar dentro de una red de distribución son: Residenciales (urbano y rural), industrial, comercial, alumbrado público y

mixto. Para este proyecto, las simulaciones se realizarán con usuarios de carácter industrial, comercial y residencial.

1. Sistemas de distribución industrial: comprenden a los grandes consumidores de energía eléctrica, tales como fábricas petroleras, de papel, minera, etc. Este tipo de consumidor recibe un suministro contante y de alta intensidad.
2. Sistemas de distribución comercial: se denominan de esta forma a los consumidores que forman parte de complejos comerciales y municipales, tales como: grandes edificios, bancos, supermercados, escuelas, hospitales, puertos, etc. Para este tipo de demanda, es esencial constar con un suministro eléctrico para realizar la labor diaria y mantener la seguridad de las personas y los bienes.
3. Sistemas de distribución residencial: este tipo de demandas está dividida en 2 grupos: urbano y rural. Estos se diferencian de acuerdo a la ubicación geográfica dentro de la red. Aunque su demanda no se compara con los anteriores, estos 2 se centran en 2 periodos durante el día, entre las 8 y las 14 horas, y otro se centra entre las 17 y las 23 horas.

Estudios indicados en el estado del arte, buscan solucionar el problema de reconfiguración, considerando un perfil de demanda constante durante el día, descuidando los efectos que pueden causar estas variaciones de demanda, ya sea para el estado de la red o para los efectos que pueden causar los medios de generación utilizados dentro de la red. Para realizar las simulaciones del proyecto, se modelan 3 curvas típicas para usuarios dentro de una red de distribución.

Las curvas propuestas para cada sector se ilustran en las Figuras 7-6, 7-7 y 7-8; donde se representa el sector residencial, sector industrial y comercial respectivamente. Mediante estas curvas es posible observar a qué tipo de usuario corresponde cada una. Por ejemplo, en la Figura 7-6, se observa claramente que el comportamiento es de usuarios residenciales, donde la demanda se centra en periodos específicos, partiendo en la mañana donde todos los usuarios comienzan sus labores diarias, luego cuando regresan a sus hogares. Otro ejemplo claro es el sector industrial que se muestra en la Figura 7-8, estos usuarios tienen un proceso productivo continuo durante las 24 horas del día y necesitan de un suministro continuo y de alta intensidad en cada instante.

Estudios realizados por [39], propone un modelo de curvas típicas para los distintos tipos de usuarios, asignando una potencia en por unidad para los usuarios cuando su demanda es máxima y a partir de ahí, realizar modificaciones para cada instante del día. Además, estas curvas las dividió en periodos de 1 hora, para poder implementarlas dentro de las simulaciones de su trabajo. Esta estrategia para utilizar las curvas de demanda, es la que será utilizada para realizar las simulaciones del presente proyecto.

Las curvas que se muestran a continuación, son obtenidas con información consultada en el estudio realizado por [39].

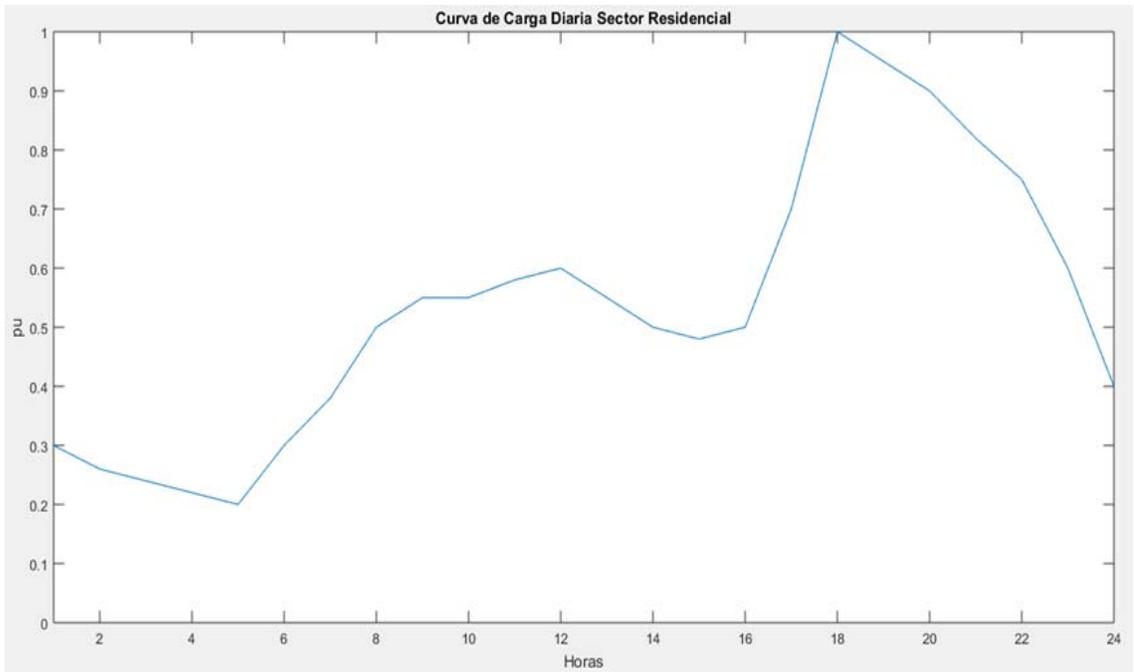


Figura 7-6: Curva Típica de Carga Diaria para Sectores Residenciales [39].

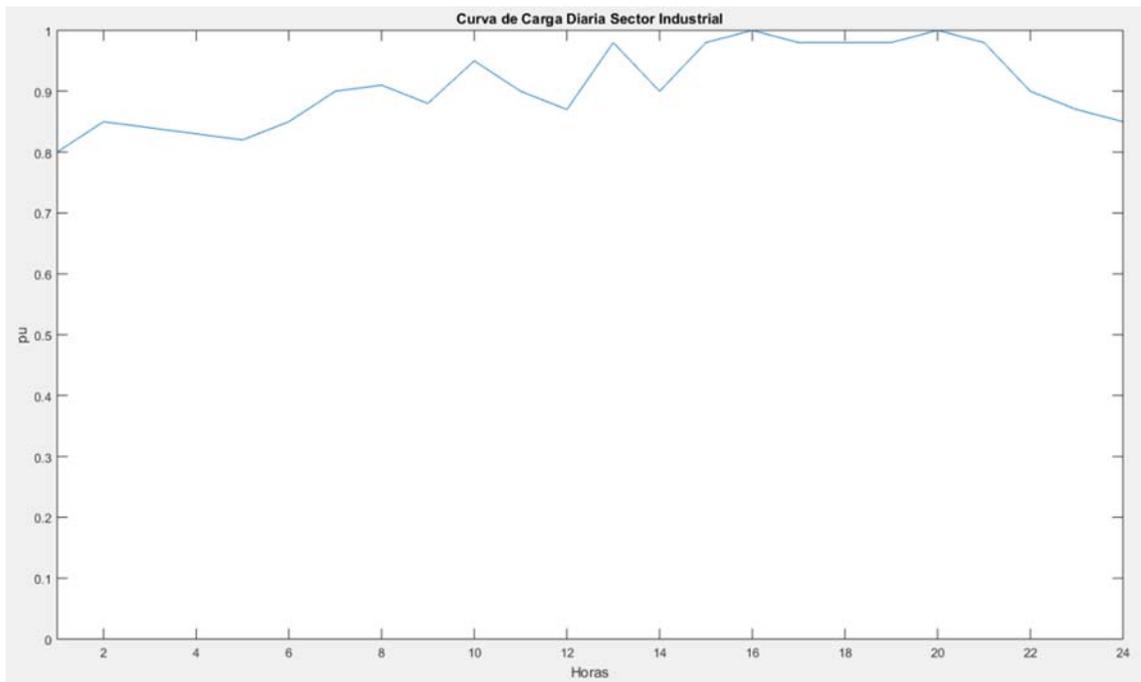


Figura 7-7: Curva Típica de Carga Diaria para Sectores Industriales [39].

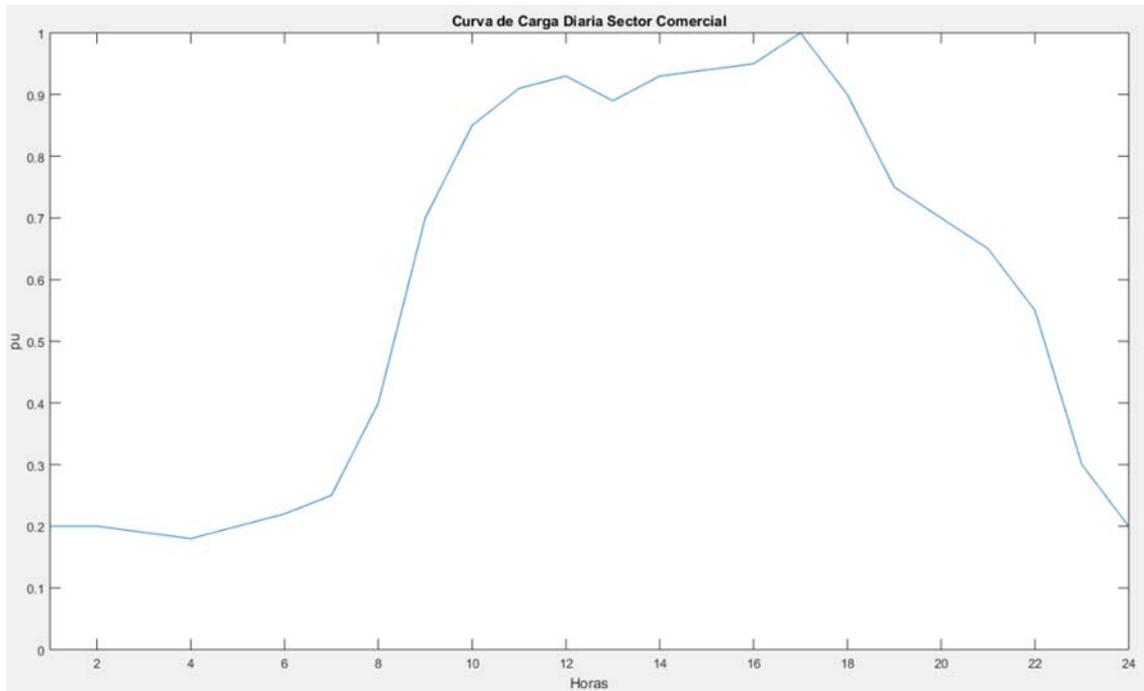


Figura 7-8: Curva Típica de Carga Diaria para Sectores Comerciales [39].

7.5 Generadores Propuestos

Los generadores propuestos para este proyecto son de carácter renovable (eólico y fotovoltaico) y pertenecen al grupo de las energías renovables no convencionales (ERNC). La potencia máxima de estos no superará los 10 [MW] en los alimentadores propuestos, esto quiere decir que los generadores estarán beneficiados por las normas indicadas en la sección 2.4.

7.5.1 Características y Ubicación de los GD

Para el presente proyecto se utilizarán 2 generadores renovables (eólico y fotovoltaico), y dado a su comportamiento probabilístico de acuerdo a la estación del año y la hora del día, no son capaces de controlar la tensión en los nodos donde serán ubicados. Este detalle está especificado en el DS N°244 [58], y por esta razón las barras donde serán ubicados los GD se modelarán como barras PQ.

Para maximizar la penetración de los GD dentro de la red y no tener problemas con el consumo y aporte de reactivos de los mismo. Cada generador trabajará con un factor de potencia unitario en cada instante de la simulación y la potencia activa aportada, seguirá el comportamiento indicado por curvas de generación propuestas.

Para indicar la potencia de los generadores que se utilizarán en este proyecto, es necesario establecer un nivel de penetración de esto con respecto a la demanda máxima de cada alimentador propuesto. El sistema “Baran”, con una potencia base de 100 [MVA], tiene una demanda máxima de 3.715 [MW] y con un nivel de penetración del 30%, el aporte máximo de los

generadores será de 1.1145 [MW]. En el sistema “Colo Colo”, con una potencia base de 10 [MVA], tiene una demanda máxima de 25.85 [MW] y con un nivel de penetración del 10%, la capacidad máxima de los generadores será de 2.585742 [MW].

Los detalles de los GD utilizados para el presente proyecto, se muestran en la Tabla 7-5.

Tabla 7-5: Límites de Generación para los GD Propuestos.

	Sistema Baran		Sistema Colo Colo	
	Generador fotovoltaico	Generador eólico	Generador fotovoltaico	Generador eólico
Potencia [MW]	0,7	0,4145	1.5	1.085742
Generación máxima [MW]	0,7	0,4145	1.5	1.085742
Generación mínima [MW]	0	0,1243	0	0.325722
Ubicación	Nodo 16	Nodo 30	Nodo 137	Nodo 76

7.5.2 Modelo de Curvas Diarias para GD

En los últimos años, la capacidad aportada por los generadores renovables dentro de la red de distribución no es de gran influencia versus el total aportado por las centrales de generación convencionales. Es por esta razón, que los últimos estudios que se han realizado utilizando GD dentro de la red de distribución, realizan sus simulaciones con un factor de potencia unitario, para así maximizar su penetración e incentivar el uso de estos medios de generación.

La idea de utilizar este tipo de generación, es promover a las grandes empresas generadoras a realizar nuevas inversiones en este tipo de generación. Además, los GD brindan beneficios a las empresas distribuidoras en condiciones de alta demanda o en momentos desfavorables. Estos beneficios son: minimizar las pérdidas activas y la desviación de tensión en los nodos del sistema.

Para realizar las simulaciones de los generadores propuestos para el presente proyecto, es necesario indicar cuál será su comportamiento en cada instante del día. Existen 2 formas de modelar estos medios de generación, una puede ser realizando un análisis probabilístico en cada instante del día, considerando la radiación solar y la velocidad del viento según la estación del año o modelar su comportamiento mediante curvas típicas utilizadas por otros autores.

Para este proyecto, se utilizarán curvas que el autor [39] utiliza para realizar simulaciones, él considera medios de generación renovables para realizar la reconfiguración de la red de distribución y sus resultados indican que es una buena forma de representar el comportamiento de este tipo de generación, pero no se asemeja a la realidad.

La ilustración que se muestra en la Figura 7-9, indica el comportamiento de un generador fotovoltaico en condiciones de un día despejado. Por otro lado, la curva de generación eólica indicada por la Figura 7-10, sigue un comportamiento establecido por un estudio probabilístico. Estas curvas son obtenidas consultando información de estudios realizados por [39].

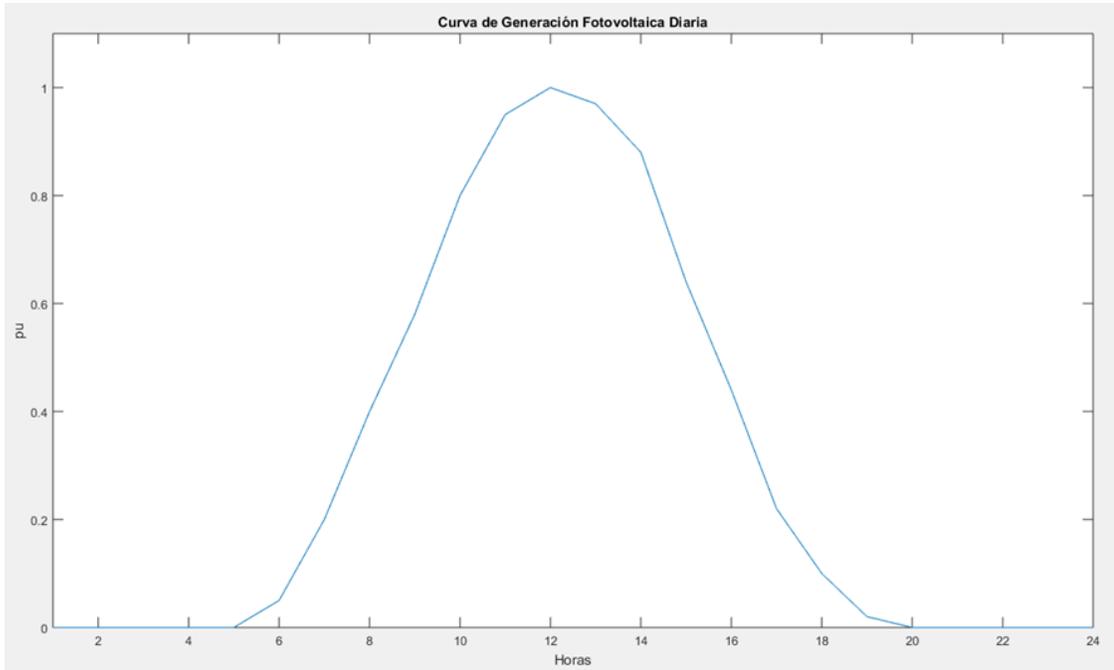


Figura 7-9: Curva de Generación Diaria para Tecnología Fotovoltaica [39].

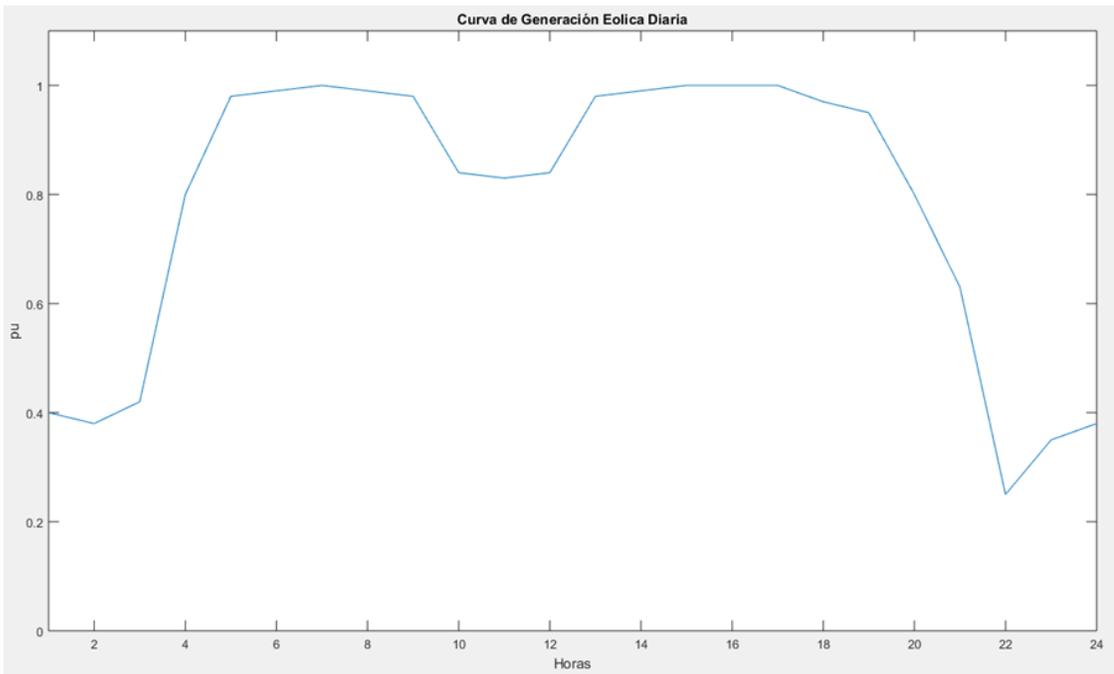


Figura 7-10: Curva de Generación Diaria para Tecnología Eólica [39].

Las curvas de generación propuestas para este proyecto, están construidas en una escala de 0 a 1, esto indica que 1 es para generación máxima y 0 para generación mínima. Con estas indicaciones se puede modelar el comportamiento de los generadores en cada instante del día. Luego, para realizar las simulaciones del proyecto, estos generadores son ubicados y dimensionados como se indicó en la sección anterior y en cada instante del día su potencia máxima es multiplicada por el factor correspondiente al instante de la simulación.

El mismo procedimiento se realiza para modificar los datos de carga según el tipo de cliente y la hora del día. Las curvas de demanda mostradas en la sección 7.4.2, están construidas en una escala de 1 a 0, igual que el caso de los generadores. La idea es la misma, los datos de carga son multiplicados por el factor correspondiente a la hora y el sector del usuario, de esta forma se puede modelar el comportamiento de los usuarios presentes dentro de las redes propuestas.

7.6 Hipótesis

Se propone un método de optimización llamado Big Bang – Big Crunch (BB-BC), para solucionar el problema de reconfiguración de la red de distribución de media tensión. Este método de optimización, fue seleccionado porque no necesita de una formulación rigurosa para realizar la búsqueda, por lo tanto, puede enfrentarse a la formulación no lineal del problema de reconfiguración.

Debido al creciente aumento de la demanda energética y el impacto ambiental en todo el mundo, se dificulta el buen suministro eléctrico por parte de las empresas distribuidoras. Como medio de respaldo, existe la opción de utilizar generadores distribuidos (GD) ubicados cerca del consumo, manteniendo un suministro eficiente y seguro. Los autores de la bibliografía, indican que utilizar esta tecnología mejora considerablemente el estado de la red. Para efectos de simulación en el presente proyecto, específicamente se utilizan 2 medios de generación renovables (eólicos y fotovoltaico), perteneciente al grupo de las energías renovables no convencionales (ERNC).

Luego de realizar la búsqueda del método de optimización Big Bang – Big Crunch (BB-BC) dentro del estado del arte, se espera que tenga un buen desempeño al momento de explorar el espacio de búsqueda que tiene el problema de reconfiguración. Esto quiere decir que el algoritmo debe ser capaz de converger a la solución en pocas iteraciones y con una pequeña porción del espacio.

Se espera encontrar una estructura de red que minimice las pérdidas activas disipadas en las líneas del sistema y las desviaciones de tensión en todos los nodos. Estos resultados servirán de evidencia para demostrar los beneficios que trae para red de distribución, el uso de GD ubicados cerca del consumo.

7.7 Software y Hardware de Simulación

El software que se utilizará debe tener la capacidad de efectuar flujos de potencia mediante códigos. Hay 2 tipos de métodos para realizar flujos, Gauss Sidel y Newton Raphson. Actualmente se emplea Newton Raphson ya que se obtiene la respuesta rápidamente.

Se utiliza el flujo de potencia creado por el autor Hadi Saadat [59], en la plataforma Matlab. Este software está disponible en plataformas Unix, Windows y GNU/Linux y es muy utilizado en universidades y centros de investigación.

Para realizar las simulaciones se utiliza un computador con las siguientes características: Un procesador Intel(R) Pentium(R) CPU B950 @ 2.1 GHz. Con una memoria RAM de 8 GB.

7.8 Conclusión del capítulo.

Las empresas distribuidoras, son las entidades que se encargan de administrar estos recursos energéticos y distribuirlos de manera eficiente en redes que contienen usuarios con cargas de diversas magnitudes. Esta labor debe considerar que existe una dinámica dentro de la red durante el día, es decir, se debe suplir la demanda de usuarios con distintas características, manteniendo un margen de seguridad en todo momento. Este es un aspecto muy importante al momento de rediseñar una red de distribución, y ahora con el fuerte impacto ambiental y la escasez de los recursos, las empresas distribuidoras utilizan generadores distribuidos (GD) con distinto comportamiento, con el objetivo de ampliar el alcance de la red de distribución, manteniendo un suministro eficiente y seguro.

Para solucionar el problema de reconfiguración, se debe buscar un método de optimización que considere la naturaleza no lineal de las ecuaciones matemáticas del flujo de cargas, para este fin, la optimización se realizará utilizando un método de optimización híbrido llamado Big Bang – Big Crunch (HBB-BC).

En el presente capítulo, se mostró la construcción del algoritmo que utiliza el método HBB-BC para solucionar el problema de reconfiguración, y se ilustra a través de un diagrama en bloques, cual es el comportamiento en cada iteración. No está demás decir, que este algoritmo considera la variabilidad de la demanda y la generación. Luego, se ilustraron los sistemas de prueba “Baran” y “Colo Colo”, que serán utilizados para realizar las simulaciones del presente proyecto, indicando cual es la distribución de los usuarios y el comportamiento de cada uno de ellos. Por otro lado, se detallaron las características, ubicación y la potencia de cada uno de los generadores propuestos.

8 Simulaciones y Resultados

8.1 Introducción del Capítulo

Realizar la modificación de la red de distribución es una tarea muy importante para los operadores, y requiere de una ardua planificación debido a los miles de factores que se deben considerar antes de realizar cualquier intervención. La modificación de la estructura sirve para mejorar indicadores técnicos y/o económicos que una empresa necesita para que el suministro eléctrico sea adecuado.

Cada capítulo del presente documento fue destinado para que el lector identificara cuales son los factores que se considerarán en las simulaciones, como por ejemplo: estructuras de una red, variabilidad de la demanda, límites técnicos dentro de una red de distribución, usos e implementación de generadores distribuidor, entre otros. Estos factores ayudan al lector a tener claridad del tema y entender que tan acotada es la investigación. En este caso, se pretende solucionar el problema de reconfiguración considerando la presencia de generadores distribuidos (eólico y fotovoltaico), encontrando una estructura de red que minimice las pérdidas activas y la desviación de tensión en los nodos.

En el presente capítulo, se realizarán las simulaciones para solucionar el problema de reconfiguración, utilizando el sistema “Baran” y una red real llamada “Colo Colo”. En un comienzo, se indicarán los preparativos previos a las simulaciones, detallando como se ingresan los alimentadores y cuáles serán los parámetros que se deben ingresar para las operaciones del algoritmo HBB-BC y para considerar el espacio de búsqueda de cada alimentador. Luego de las simulaciones, se ilustrarán las curvas de convergencia detallando como se obtiene la solución en cada caso. Se indicarán las líneas que deben abrirse, con su respectivo valor de pérdida total durante el día y la máxima desviación de tensión detectada durante el día. Finalmente, para verificar que los resultados entregados por el algoritmo HBB-BC sean certeros sobre cada sistema, se realizará una comparación con trabajos anteriores buscando el mismo fin.

8.2 Sistema de Prueba Baran

En esta sección se realizarán las simulaciones sobre el sistema de prueba “Baran”, indicando nuevamente la construcción de la variable de decisión, la potencia y ubicación de los generadores propuestos. Se ilustrará la curva de convergencia del algoritmo HBB-BC y se hablará de cómo se

obtiene la solución al momento de utilizar un método de optimización metaheurístico. Y se mostrará través de imágenes contrastadas, cuales son los beneficios de utilizar generadores distribuidos (GD) al momento de realizar la reconfiguración de la red de distribución.

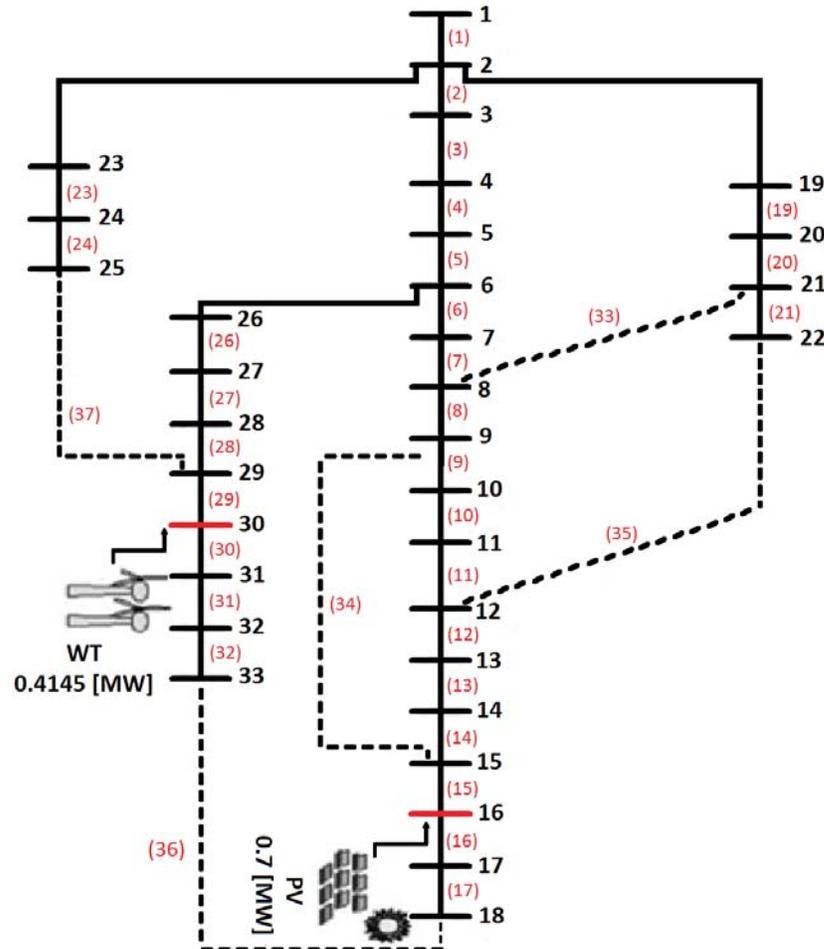


Figura 8-1: Estructura Sistema Prueba Baran.

8.2.1 Simulaciones de Sistema de Prueba Baran

La reconfiguración es un problema combinatorial que se desarrolla en la red de distribución de media tensión, donde se busca una estructura de funcionamiento radial con el objetivo de mejorar indicadores técnicos y/o económicos, considerando las restricciones operacionales de la red. Para realizar esta modificación en el presente proyecto, se deben ingresar los parámetros del alimentador construido en forma de mallas como se muestra en la Figura 8-1, de esta forma, se pueden generar los individuos al comienzo del algoritmo (5 mallas fundamentales, implica tener un vector de 5 columnas).

Dentro de los alimentadores propuestos, se encuentran 2 medios de generación que pertenecen al grupo de las ERNC, uno es eólico y el otro fotovoltaico, y están ubicados en los nodos 30 y 16

respectivamente. La potencia máxima de ellos, se asignó considerando una penetración del 30% con respecto a la demanda máxima del sistema.

Antes de comenzar la simulación, se deben ingresar los parámetros del alimentador que se va a utilizar y los del algoritmo HBB-BC. Estos últimos valores, fueron obtenidos por información consultada en estudios realizados en [51], donde se realizaron varias pruebas sobre estos parámetros, hasta llegar a los que entregaban mejores respuestas. Los parámetros que controlan la capacidad de exploración del algoritmo son el tamaño de la población y la cantidad de iteraciones; por lo que deben ser modificados de acuerdo al tamaño de la red que se desea simular. En el caso del alimentador “Baran”, se realizaron varias pruebas y se llegó a la conclusión de que con una cantidad de 20 individuos y 40 iteraciones, es suficiente para que el algoritmo entregue buenos resultados. Los parámetros anteriormente nombrados se adjuntan en la Tabla 8-1.

Tabla 8-1: Parámetros del Algoritmo Híbrido Big Bang –Big Crunch (HBB-BC) para el Sistema Baran.

Parámetros	
Tamaño de la población	20
Cantidad máxima de iteraciones	40
Probabilidad de mutación	0.1
Límite del espacio de búsqueda (α)	1
Influencia global (β)	0,8
Influencia personal (β)	0,4

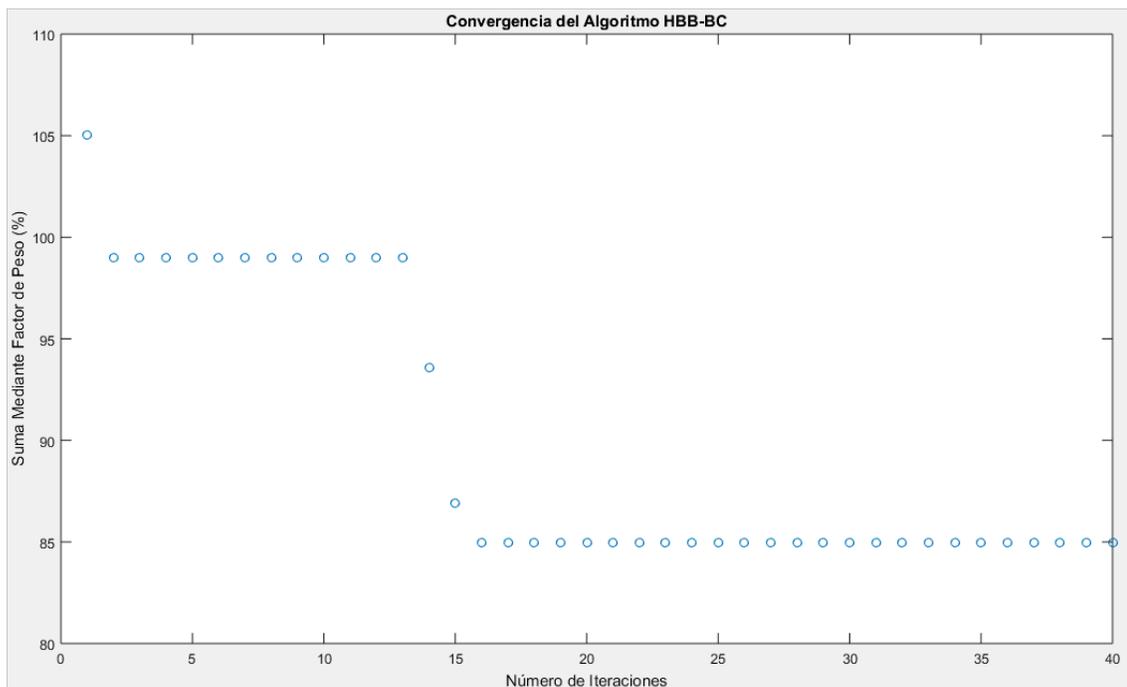


Figura 8-2: Convergencia del Algoritmo HBB-BC en Simulaciones Sobre el Sistema Baran.

En el capítulo 5 se indicó que el algoritmo HBB-BC pertenece al grupo de los métodos metaheurísticos, eso quiere decir, que no se puede saber el comportamiento del algoritmo en cada iteración y tampoco se puede asegurar que se obtenga la misma solución en cada iteración. Por lo tanto, la manera de verificar que el algoritmo haya encontrado una solución, es observando su respectiva curva de convergencia. En la Figura 8-2, se ilustra el comportamiento del algoritmo HBB-BC luego de realizar las simulaciones sobre el sistema “Baran”. Como se puede apreciar, el algoritmo converge en las primeras 15 iteraciones, eso quiere decir que está funcionando correctamente. Luego en iteraciones posteriores, el resultado se mantiene constante hasta llegar a la iteración 40. Este comportamiento es suficiente para indicar que el algoritmo ya encontró la solución en esta ocasión. Este proceso tardó un total de 303,2 segundos, lo que equivale a 5,03 minutos.

En esta ocasión, las líneas que se deben abrir del sistema “Baran” para obtener una estructura radial, son las que se muestran en la expresión (8-1).

$$[33 \ 28 \ 10 \ 30 \ 14] \quad (8-1)$$

Esta configuración muestra un comportamiento acorde al comportamiento de la red, esto quiere decir, que los respectivos indicadores aumentan en los periodos donde se concentra la actividad durante el día, llegando a su máximo punto en la hora 20 que es cuando todos los usuarios regresan a sus hogares. Las potencias se encuentran en un rango que parte de los 0,0062 hasta los 0,0105 [p.u.], y la potencia total disipada durante el día es de 0,1927 [MW] (Figura 8-3). Por otro lado, las desviaciones es de 0,6476 % (Figura 8-4) lejos de los $\pm 6\%$ indicados por la norma. Esto quiere decir, que la estructura encontrada puede ser implementada en la realidad.

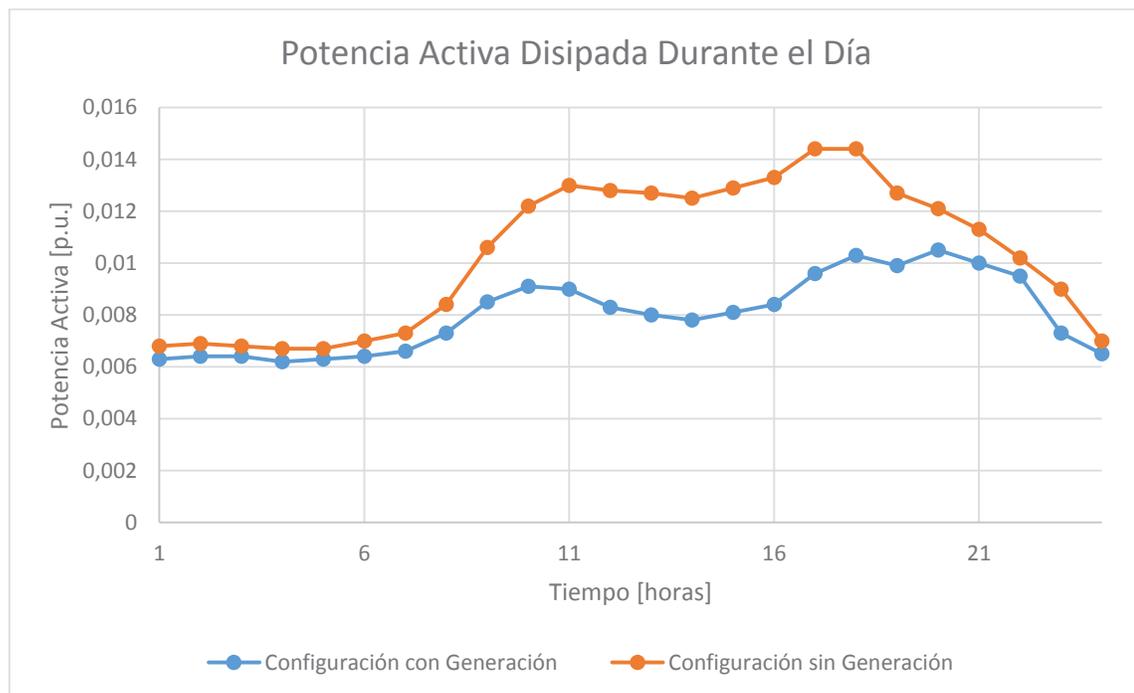


Figura 8-3: Potencia Activa Disipada Durante el Día en el Sistema Baran.

El motivo que impulso el uso de estos generadores, son los beneficios que trae para la red de distribución, tanto para las pérdidas como para el perfil de tensión. Es por esta razón que se deben mostrar los cambios y beneficios que se obtienen al considerar estos generadores dentro de las simulaciones.

En la Figura 8-3, se ilustra el contraste que se obtiene luego realizar la reconfiguración, con y sin generadores distribuidos. Como se puede observar, en las primeras horas no se distingue un cambio significativo, porque se encuentra en generación mínima, luego comienzan a tener protagonismo los generadores y se minimizan las pérdidas. Finalmente los generadores vuelven a su estado de generación mínima. Hablando de número, las pérdidas totales durante el día llegan a reducirse a casi un 50% de las pérdidas sin generación.

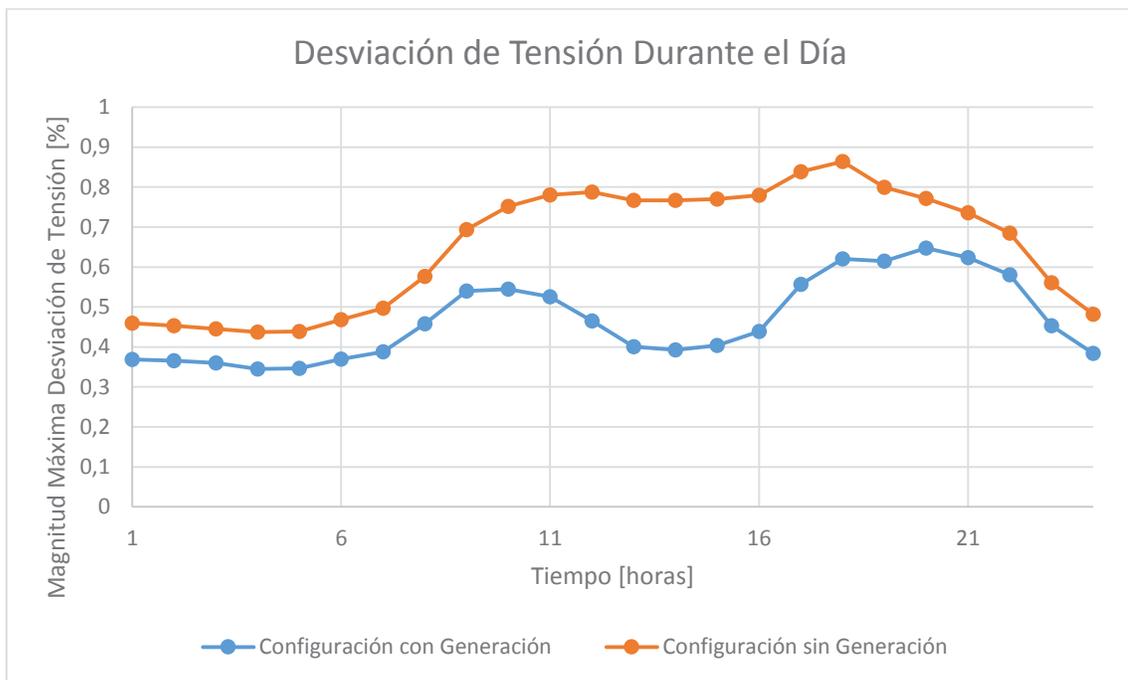


Figura 8-4: Magnitud de la Desviación de Tensión Durante el Día en el Sistema Baran.

Los niveles de tensión igual se ven afectado al momento de considerar los generadores, esto se puede apreciar a través de la Figura 8-4. Al igual que el caso anterior, el comportamiento de la desviación de tensión se modifica al momento que los generadores comienzan a tener protagonismo durante el día. La máxima desviación de tensión antes resultaba ser de 0,8651% y mejoró a 0,6476%, prueba suficiente de los beneficios que trae la generación a la red de distribución. Este análisis se puede apreciar en la Tabla 8-2. No esta demás decir, que la configuración encontrada cambia al momento de considerar los generadores y son las líneas que se muestran en la misma tabla. Para mayor detalle, los valores correspondientes al contraste realizado, se adjuntan en el apéndice C.

Tabla 8-2: Contraste Beneficios del GD en el Sistema Baran.

Pruebas	Líneas abiertas	Potencia activa total [MW]	Magnitud máxima desviación de tensión [%]
Reconfiguración Sin generador distribuido	[33 27 10 30 34]	0,3609	0,8651
Reconfiguración con generador distribuido	[33 28 10 30 14]	0,1927	0,6476

Hasta el momento se ha demostrado que el algoritmo está funcionando correctamente de acuerdo a su naturaleza. Además, se demostraron los cambios y los beneficios que se obtienen al momento de considerar los generadores dentro de las simulaciones. Ahora es momento de verificar si los resultados que entrega el algoritmo HBB-BC son certeros sobre el sistema “Baran”.

Tabla 8-3: Valides de los Resultados Obtenidos para la Reconfiguración en el Sistema Baran.

Trabajos	Líneas abiertas		Potencia activa total [MW]	
	Referencia	Trabajo propuesto	Referencia	Trabajo propuesto
Leslie Rojo [60]	7-9-14-32-37	7-25-9-30-14	0,2542	0.2504

El trabajo realizado por [60], realiza la optimización del problema de reconfiguración, considerando como objetivo el de minimizar las pérdidas activas de la red. Para poder ser comparado con el presente algoritmo, se debe ajustar el factor de peso correspondiente a la desviación de tensión (W_2) en cero, de este modo se realiza una búsqueda mono objetivo como el de la referencia. Los resultados indican que la configuración encontrada por el algoritmo HBB-BC resulta ser próxima a la encontrada por la referencia, incluso es mejor.

8.3 Sistema de Prueba Real Colo Colo

En esta sección se realizarán los preparativos para realizar las simulaciones sobre el sistema real “Colo Colo”, indicando los parámetros antes de utilizar el algoritmo de optimización. No esta demás decir, que este sistema tiene un gran espacio de búsqueda y seguramente sea necesario aumentar la población inicial y la cantidad máxima de iteración. A continuación se ilustrara la estructura en forma de mallas de la red de distribución “Colo Colo”.

La Figura 8-5, se ilustra la configuración en forma de mallas de la red real “Colo Colo”, y se muestra la ubicación y la potencia de los generadores eólico y fotovoltaico. Esta red tiene 12 mallas fundamentales, por lo que su correspondiente vector de la variable de decisión, estará compuestos por 12 columnas, lo que es mucho mayor que las 5 de la red “Baran”.

Los generadores distribuidos (GD) están diseñados para que su máxima penetración sea de un 10% con respecto a la demanda máxima del sistema, esto quiere decir, que el generador fotovoltaico y el eólico tienen una potencia de 1,5 y 1,085 [MW] y están ubicados en los nodos 137 y 76 respectivamente.

8.3.1 Simulaciones en Sistema de Prueba Colo Colo

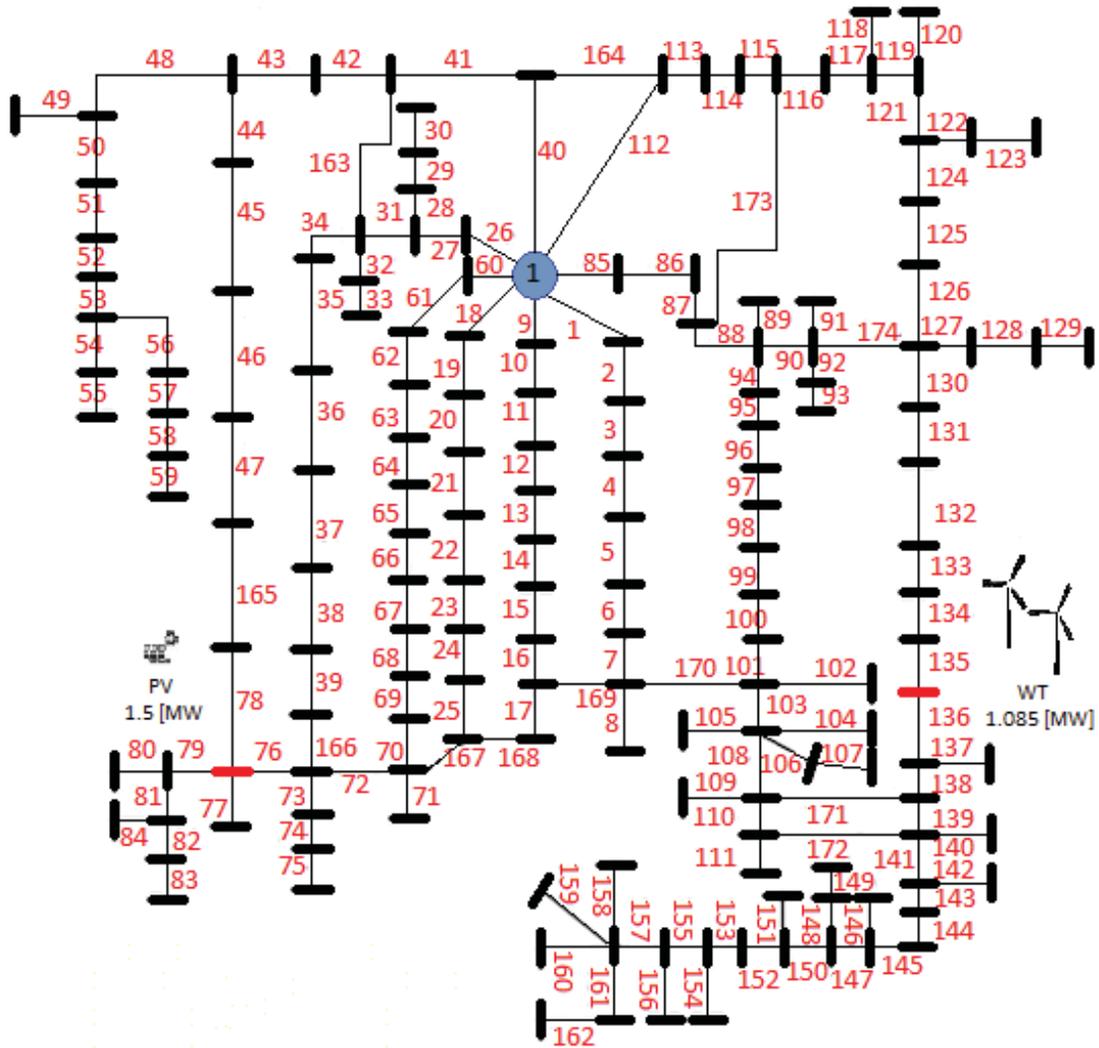


Figura 8-5: Estructura Sistema Prueba Colo Colo.

Tabla 8-4: Parámetros del Algoritmo Híbrido Big Bang –Big Crunch (HBB-BC) para el Sistema Colo Colo.

Parámetros	
Tamaño de la población	60
Cantidad máxima de iteraciones	80
Probabilidad de mutación	0,1
Límite del espacio de búsqueda (α)	1,5
Influencia global (β)	0,8
Influencia personal (β)	0,4

A continuación, se indicarán los parámetros que serán utilizados para realizar las simulaciones del algoritmo HBB-BC, estos deben considerar la magnitud del espacio de búsqueda.

Como se mencionó en el comienzo de esta sección, es necesario modificar los parámetros del algoritmo HBB-BC para poder explorar espacios de búsqueda de mayor tamaño. En esta ocasión, se mantienen los parámetros para la probabilidad de mutación y los de la influencia personal y global, que fueron indicados por el autor [51]. Y se aumenta el tamaño de la población a 60, el límite del espacio de búsqueda a 1,5 y la cantidad de iteración a 80. No está demás de decir, que estos últimos valores se encontraron luego de realizar varias pruebas sobre la red “Colo Colo”.

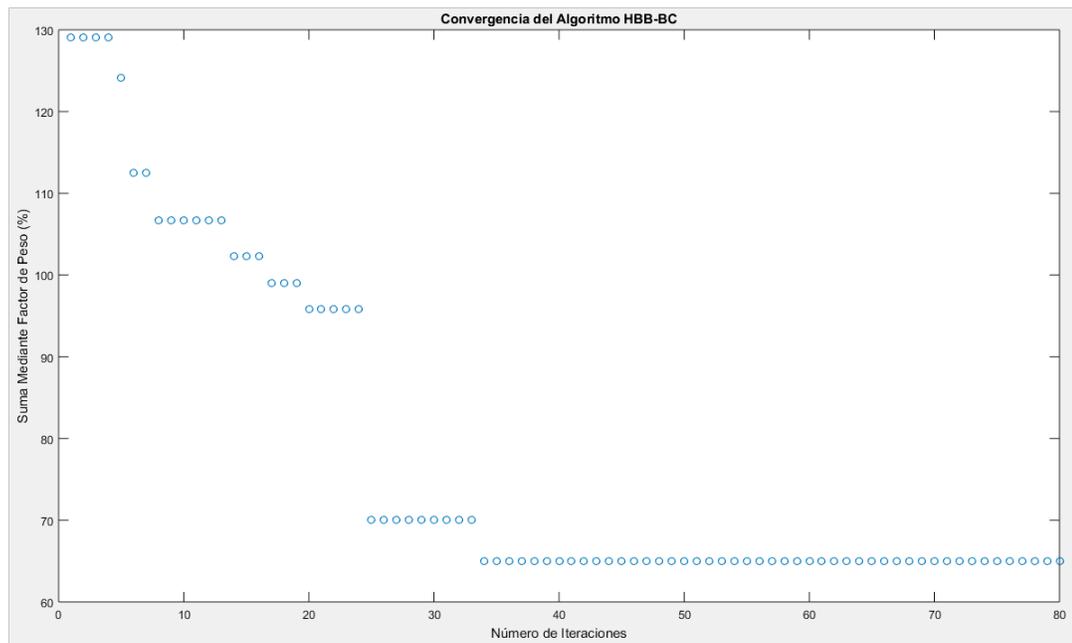


Figura 8-6: Convergencia del Algoritmo HBB-BC en Simulaciones Sobre el Sistema Colo Colo.

Al igual que el caso anterior, para verificar que el algoritmo HBB-BC ya haya encontrado la solución en la simulación, es necesario verificar su respectiva curva de convergencia. En la Figura 8-6, se ilustra el comportamiento del algoritmo HBB-BC luego de realizar las simulaciones sobre el sistema “Colo Colo”. Como se puede observar, el algoritmo converge hasta la iteración 34, eso quiere decir que está funcionando correctamente. Luego en iteraciones posteriores, el resultado

se mantiene constante hasta llegar a la iteración 80. Este comportamiento es suficiente para indicar que el algoritmo ya encontró la solución en esta ocasión. Este proceso tardó un total de 3241,54 segundos, lo que equivale a 54,025 minutos, mucho mayor a los 5 minutos del sistema “Baran”. La expresión (8-2), indica las líneas que se deben abrir de la red “Colo Colo”.

$$[5 \ 16 \ 167 \ 166 \ 76 \ 163 \ 164 \ 173 \ 174 \ 100 \ 172 \ 171]$$

(8-2)

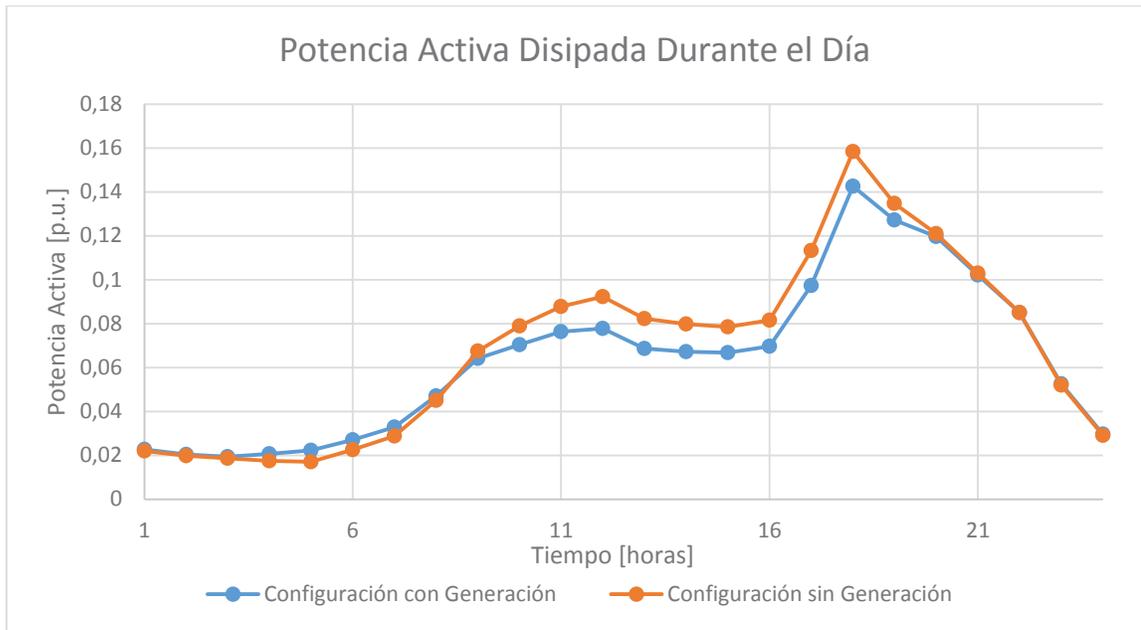


Figura 8-7: Potencia Activa Disipada Durante el Día en el Sistema Colo Colo.

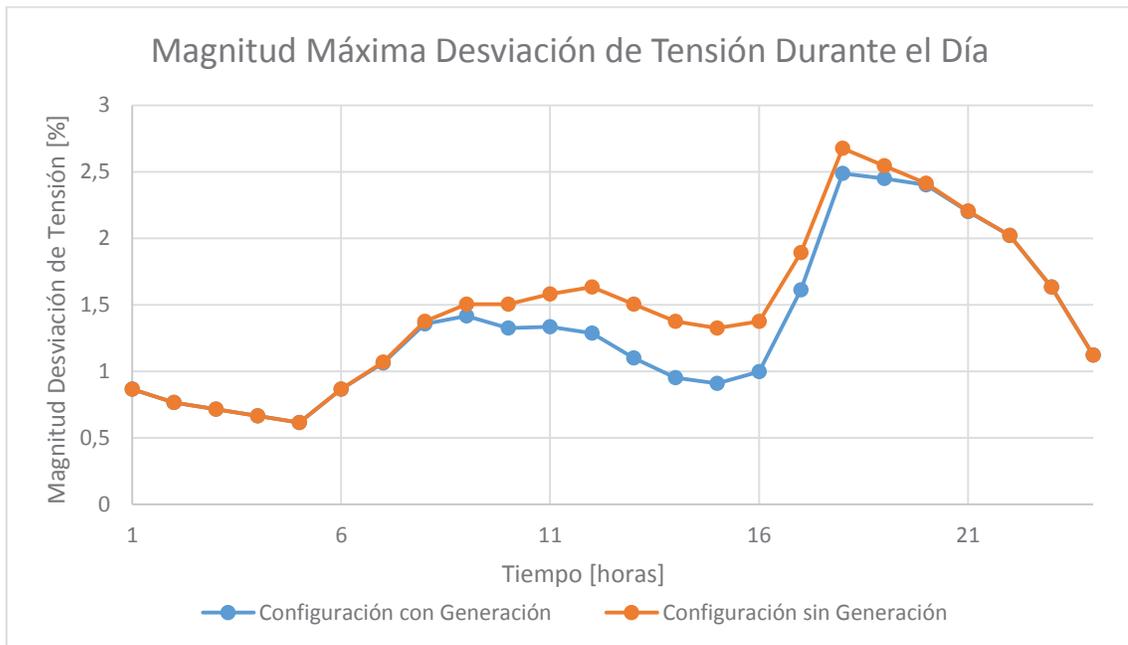


Figura 8-8: Magnitud de la Máxima Desviación de Tensión Durante el Día en el Sistema Colo Colo.

Al igual que el caso anterior, esta configuración muestra un comportamiento acorde al comportamiento de la red, esto quiere decir, que aumentan en los periodos donde se concentra la actividad durante el día, llegando a su máximo punto en la hora 20 que es cuando todos los usuarios regresan a sus hogares. El rango de las pérdidas van desde los 0.0193 hasta los 0.1425 [MW], y las pérdidas totales son de 1.529 [MW] (Figura 8-7). Por otro lado, las desviaciones llegan a un valor de 2.48%% (Figura 8-8) (lejos de los $\pm 6\%$ indicados por la norma), esto quiere decir, que la estructura encontrada tiene un excelente perfil de tensión y puede ser implementada en la realidad.

Las pérdidas totales durante el día llegan a reducirse desde unos 1.636 [MW], hasta 1.5283 [MW]. Y la máxima desviación de tensión antes resultaba ser de 2.6763% y mejoró a 2.4877%, resultando ser prueba suficiente de los beneficios que trae la generación a la red de distribución. Estos resultados se muestran en la Tabla 8-5. Para mayor detalle, los datos correspondientes al contraste realizado se adjuntan en el apéndice C.

Tabla 8-5: Contraste Beneficios del GD en el Sistema Colo Colo.

Pruebas	Líneas abiertas	Potencia activa total [MW]	Magnitud máxima desviación de tensión [%]
Reconfiguración Sin generador distribuido	[7 23 78 99 163 164 166 167 171 172 173 174]	1,636	2,6763
Reconfiguración con generador distribuido	[5 16 167 166 76 163 164 173 174 100 172 171]	1,5283	2.4877

Tabla 8-6: Valides de los Resultados Obtenidos para la Reconfiguración en el Sistema Colo Colo.

Trabajos	Líneas abiertas		Potencia activa total [MW]	
	Referencia	Trabajo propuesto	Referencia	Trabajo propuesto
Leslie Rojo [60]	7-23-78-99-163-164-166-167-171-172-173-174	6-16-76-100-163-164-166-167-171-172-173-174	1,6475	1,636

Como se mencionó anteriormente. El auto [60], realizó una búsqueda mono objetivo minimizando las pérdidas activas. Por lo tanto, para poder realizar la comparación, se ajustó el factor de peso “W2” con un valor de cero para poder igualar condiciones. Los resultados indican

que la configuración encontrada por el algoritmo HBB-BC, se acerca bastante a los resultados encontrados por la referencia, pero resultan ser superiores. Esta comparación es muy importante para verificar si los resultados encontrados por el algoritmo HBB-BC, son aceptables sobre los alimentadores propuestos.

8.4 Conclusiones del Capítulo

En el presente capítulo se realizaron las pruebas de reconfiguración sobre los sistemas prueba “Baran” y “Colo Colo”. Se realizó una breve explicación de cómo modificar los parámetros de entrada del algoritmo al momento de enfrentarse a alimentadores de distintas proporciones, esto queda en evidencia al momento de ilustrar las curvas de convergencia, porque en las simulaciones realizadas en el alimentador “Baran” el algoritmo converge en la iteración 16, mucho menos que en el caso del alimentador “Colo Colo” que obtuvo la solución en la iteración 34. Luego se indicaron las configuraciones luego de realizar las simulaciones sobre cada alimentador y se mostraron los respectivos valores de pérdidas totales durante el día y la magnitud de la máxima desviación de tensión detectada durante el día. Con estos resultados, se realizó un análisis para evidencia los beneficios de utilizar generadores distribuidos (GD) dentro de la red de distribución. Finalmente, para poder verificar que los resultados obtenidos por el algoritmo HBB-BC son ciertos sobre los alimentadores propuestos, se realizó una comparación con otros trabajos anteriores que buscan el mismo fin.

Discusión y conclusiones

En un comienzo se habló que la energía eléctrica cumple un papel muy importante en la sociedad actual y saber aprovecharla es una tarea que nos compromete a todos. Esta energía es obtenida mediante bloques concentrados en plantas generadoras de gran capacidad y luego es trasladada hasta las empresas distribuidoras, que se encargan de administrar y distribuir esta energía hasta los usuarios de todas las ciudades. Las redes de distribución es el área donde se realiza la mayor cantidad de inversiones en trabajos de ingeniería, diseño, construcción y operación; porque esta parte de los sistemas eléctricos está ubicada directamente en el consumo y es muy importante que el suministro eléctrico sea seguro y confiable en todo momento.

Actualmente, debido al aumento de la demanda por el crecimiento de las ciudades y la escasez de los recursos, se dificulta el trabajo habitual de las empresas distribuidoras y es necesario evaluar nuevas posibles soluciones para continuar con el suministro correctamente. En esta ocasión, se utiliza una técnica que modifica la estructura del suministro eléctrico mediante la operación de los elementos de maniobra, protección y/o seccionamiento presentes en la red, hasta obtener finalmente una estructura de funcionamiento radial. Esta técnica se llama reconfiguración y es muy útil para mejorar indicadores técnicos y/o económicos de la red sin tener presupuestar elevados costos para las empresas distribuidoras. El problema que surge al momento de realizar la reconfiguración, son las miles de posibles estructuras que se pueden identificar dentro de la misma, lo que convierte la técnica de reconfiguración en un problema de carácter combinatorial, por otro lado, es de carácter no lineal debido a las ecuaciones matemáticas del flujo de carga. Para solucionar este problema, se realizó la optimización utilizando un método híbrido basado en la teoría de la creación del universo, llamado Big Bang – Big Crunch (HBB-BC). El enfoque propuesto para esta ocasión, es utilizar GD que pertenezcan al grupo de las energías renovables no convencionales (ERNC), como un elemento adicional al momento de solucionar el problema de reconfiguración. El objetivo de utilizar generadores renovables, es para realizar un estudio que considere la variabilidad horario de los aportes energéticos que tienen los generadores eólicos y fotovoltaicos.

Los primeros 2 capítulos del presente documento fueron destinados a ambientar al lector, mostrando donde se desarrolla el problema de reconfiguración y cuáles son las consideración que se deben tener en cuenta antes de realizar las simulaciones. Primero que todo, es importante detallar cuales son las estructuras que se pueden apreciar dentro de una red de distribución,

porque en esta ocasión, la lógica para realizar la reconfiguración consiste ingresando una red con estructura en forma de mallas y liberar una línea de cada malla, de esta forma se puede obtener una posible estructura radial. Por otro lado, es importante identificar los usuarios típicos que se encuentran dentro de una red de distribución, porque de esta forma se puede modelar su comportamiento en cada instante del día e identificar sus respectivas curvas típicas. Finalizando el capítulo, se explicaron las normas que se establecen dentro de una red de distribución. En el siguiente capítulo, se mostraron los distintos tipos de generadores distribuidos (GD) que se pueden encontrar dentro de una red de distribución, haciendo énfasis en sus ventajas y desventajas de utilizar esta tecnología como fuente de apoyo del suministro. El objetivo de estas secciones, es mostrar cuales son los GD que serán utilizados para realizar las simulaciones del presente proyecto (eólico y fotovoltaico), y para indicar cuales son las consideraciones que se deben tener en cuenta para aprovechar sus ventajas. Además, se indicó que los GD trabajaran con un factor de potencia unitario, por lo tanto, las restricciones del mismo solo limitan la parte activa.

Ya mostradas las bases del problema de reconfiguración y las ventajas de utilizar los generadores distribuidos (GD), se destinaron tres capítulos para mostrar los problemas de realizar la reconfiguración, indicando los métodos que se han utilizados para solucionarlo y para exponer el método que será utilizado en el presente proyecto. En primer lugar, es importante entender e identificar cuáles son los problemas que se deben enfrentar los operadores de la red, porque de esta forma se puede realizar la búsqueda de un método de optimización que sea adecuado para esta ocasión. Luego, el capítulo del estado del arte comienza hablando de la clasificación de los métodos utilizados para solucionar el problema de reconfiguración, con el propósito es ayudar al lector a entender el enfoque de los trabajos propuestos en la bibliografía. Luego se mostraron los trabajos que se han realizado para solucionar el problema de reconfiguración, con o sin generador distribuido, con el objetivo de indicar las tendencias de los últimos trabajos. Finalmente, se indicó que se utilizó un método de optimización llamado Big Bang – big Crunch (HBB-BC) y se mostraron las características que hay que considerar para poder ser implementado en el presente proyecto.

Luego de mostrar las bases del problema de reconfiguración e indicar el algoritmo que será utilizado para realizar la optimización, es necesario realizar los preparativos antes de las simulaciones. En primer lugar, se realizó la formulación del problema con los objetivos de minimizar las pérdidas activas y la desviación de tensión. Como es un problema multiobjetivo y el algoritmo HBB-BC fue diseñado para realizar búsquedas mono objetivo, se realizó una suma mediante factores de peso sobre los objetivos y se modificó el problema de multiobjetivo a uno mono objetivo. Luego la formulación del problema fue nuevamente modificada, porque se debe considerar la variabilidad de la demanda y generación, para hacer ello, se agregó una sumatoria adicional en esta suma ponderada, y de esta forma se pudo evaluar cada posible estructura en cada instante del día. Con esta función objetivo se construyó un algoritmo de optimización que utiliza el método HBB-BC y tiene como objetivo minimizar esta expresión.

En el presente proyecto, la variable de decisión se obtiene utilizando una codificación entera mediante mallas fundamentales, donde se obtiene un vector que muestra las líneas que deben abrirse en cada ocasión. Luego se mostraron los sistemas donde se realizaron las simulaciones,

detallando sus características, parámetros y la distribución de los usuarios presentes dentro del sistema. Después, se mostraron los generadores eólicos y fotovoltaicos que se utilizaron, detallando sus características y parámetros dentro de las simulaciones. Finalmente, se explicó con detalles el modelo de curvas que se utilizó para modificar el estado de los sistemas en cada instante del día. Con estos preparativos, se pueden comenzar a realizar las simulaciones y solucionar el problema de reconfiguración bajo estas consideraciones.

Para realizar las simulaciones, se ingresaron los parámetros de los alimentadores construidos en forma de mallas, indicado la ubicación y la potencia de cada generador, luego se ingresaron los parámetros de cada sistema y del algoritmo HBB-BC. Partiendo por el sistema “Baran”, los parámetros del algoritmo fueron asignados acorde a las dimensiones de este sistema, por lo tanto, la cantidad de iteraciones y el tamaño de la población no fueron superior a los 40 y 20 respectivamente. Como resultado se obtiene la operación de las líneas 33, 28, 10, 30 y 14, donde las potencias disipadas fluctúan entre los 0,0062 hasta los 0,015 [MW], y la potencia total disipada durante el día es de 0,1927 [MW]. En esta estructura de red, se observa que la máxima desviación de tensión es de 0,6476%, muy por debajo de los $\pm 6\%$ indicados por la normativa. Para demostrar los aportes de realizar la reconfiguración de la red considerando generadores distribuidos (GD), se realizó un contraste sin considerar GD, donde los resultados indicaron un evidente cambio en los resultados y la configuración, llegando a minimizar hasta un 50% de las pérdidas totales del sistema durante el día y la desviación de tensión se redujo de 0,8651% a 0,6476%. Estos resultados fueron comparados con otros trabajos anteriores con un fin en común, y se obtuvo una configuración que resulto ser superior.

En las simulaciones realizadas en el sistema real “Colo Colo”, el tamaño de la población y la cantidad máxima de iteración se ajustó a 60 y 80 respectivamente, debido al enorme espacio de búsqueda que tiene esta red. La configuración se obtiene retirando las líneas 5, 16, 167, 166, 76, 163, 164, 173, 174, 100, 172 y 171, donde las potencias disipadas están en el rango de los 0,0193 hasta los 0,1424 [MW], con un total de 1,529 [MW]. La máxima desviación de tensión se observa a la hora 18 del día, donde alcanza los 2,48%. Al igual que el caso anterior, se realizó un contraste realizando la reconfiguración sin GD, los resultados demuestran los beneficios de utilizar esta tecnología dentro de la red de distribución. Como la red de distribución “Colo Colo” tiene un espacio de búsqueda superior, es necesario realizar una comparación trabajos anteriores y demostrar así, que tan certeros son los resultados que se obtienen utilizando el algoritmo HBB-BC. En ambos casos, se ajustaron las condiciones de la búsqueda para realizar una comparación justa con otros trabajos, y se obtuvieron resultados que fueron certeros y demuestran ser superiores.

Para trabajos futuros, sería interesante solucionar el problema desde 2 puntos de vista: (1) como la reconfiguración es una técnica que sirve para rediseñar una red de distribución, sería muy buena idea, ubicar y dimensionar simultáneamente los generadores propuesto durante la reconfiguración. Este nuevo enfoque, podría mejorar los resultados obtenidos en esta investigación. (2) en el presente proyecto, los generadores fueron diseñados para que trabajaran con un factor de potencia unitario y así poder aumentar su penetración dentro del sistema. En la

realidad esto no ocurre, pero sería una buena opción el considerar el consumo y aporte de reactivos por parte de ellos dentro de la red.

Bibliografía

- [1] Osman K. Erol, Ibrahim Eksin, «A New Optimization Method: Big Bang - Big Crunch,» *Asvances in Engineering Software. ELSEVIER*, vol. 37, pp. 106 - 111, Julio 2006.
- [2] Mostada Sedihizadeh, Saeedeh Ahmadi, Mohammad Sarvi, «An Efficient Hybrid Big Bang - Big Crunch Algorithm for Multi-Objective Reconfiguration of Balanced and Unbalanced Distribution Systems in Fuzzy Framework,» *Electric Power Components and Systems*, vol. 41, pp. 75-99, 2013.
- [3] José Dolores Juárez Cervantes, «El Sistema de Distribución,» de *Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica*, Azcapolzalco, 1995, pp. 11-13.
- [4] Ministerio de Minería, «Reglamento de la Ley General de Servicio Eléctricos,» *Decreto 327*, 2008.
- [5] Energy Agency International (IEA), «Distributed Power Generation,» New York, Marcel Decker, 2005.
- [6] CIGRE, «Impact of Increasing Contribution of Dispersed Generation on the Power System,» vol. Final Report, September 1998.
- [7] Superintendencia de Electricidad y Combustible, «Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS),» Santiago, Chile, Marzo 2005.
- [8] Comisión Nacional de Energía (CNE), «Desarrollo de instrumentos de Difusión de Regulación de Geeración Eléctrica con Enería renovable no Convencional,» Santiago, Chile, Diciembre 2005.
- [9] Subsecretaría de Economica, Fomento y Reconstrucción, «Ley Numero 19.940,» Santiago, Chile, Marzo 2004.

-
- [10] Subsecretaría Económica, Fomento y Reconstrucción, «Ley Número 20.018,» Santiago, Chile, Mayo 2005.
- [11] Electric Power Research Institute (EPRI), «Potential for Reducing Consumption Through Distribution Efficient,» December 2010.
- [12] Rafael Granobles, Juan Francisco Dias, Gladys Caicedo, Juan Manuel Gaers, «Estado del Arte Reconfiguración de Sistema de Distribución,» *Energía y Computación*, vol. X, n° 1, 2001.
- [13] A. Merlin and H. Back, «Search for Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration for an Urban Power Distribution System,» *Proc. of the Fifth Power System Conference (PSCC)*, Cambridge 1975.
- [14] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, «Reconfiguration of Electric Distribution Network for Resistive Line Losses Reduction,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, n° 2, pp. 1492-1498, April 1989.
- [15] S. Civanlar, J. J. Grainger, H. Tin, S. S. Lee, «Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 3, n° 3, pp. 1217-1223, July 1988.
- [16] M. E. Baran, F. F. Wu, «Network Reconfiguration in Distribution System for Loss Reduction and Load Balancing,» *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 4, n° 2, pp. 1401-1407, April 1989.
- [17] T. P. Wagner, A. Y. Chikhani, R. Hackam, «Feeder Reconfiguration for Loss Reduction: And Application of Distribution Automation,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 6, n° 4, p. 25, July 1991.
- [18] C. C. Liu, S. J. Lee, S. S. Venkata, «An Expert System Operational aid for Reduction and Loss of Distribution System,» *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 3, n° 2, pp. 619-626, May. 1988.
- [19] J. Mendoza, R. Lopez, D Morales, E. Lopez, P. Dessante, R. Moraga, «Minimal Loss Reconfiguration Using Genetic Algorithm With Restricted Population and Adressed Operators: Real Application,» *IEEE Transactions on Power System*, vol. 21, pp. 948-954, May. 2006.
- [20] A. Andelaziz, F. Mohammed, S. F. Mekhamer, «Distribution Systems Reconfiguration Using Modified Particle Swarm Optimization,» *IEEE Transaction Power Systems Research*, vol. 7, pp. 1521-1520, 2009.

- [21] L. Nguyen Tung, «Application Artificial Bee Colony Algorithm (ABC) for Reconfiguration Distribution Networks,» *Second international Conference on Computer Modeling and Simulation*, 2010.
- [22] A. Y. Abdelaziz, F. Mohammed, M. A. Mekhamer, «Distribution Systems Reconfiguration Sugin a Modifies Tabu Search Algorithm,» *Power Systems Reseach*, vol. 80, pp. 943-953, 2010.
- [23] D. Pal, S. Kumar, B. Tudu, K. Mandal, N. Cha, «Efficient and Automatic Reconfiguration and Service Restoration in Radial Distribution System Using Differential Evolution,» *Conf. on Front Intell Comput.*, India 2013.
- [24] Salman Nasrollahi, Amir Sardarabadi, Tounes Khoshia, Alireza Gharib, «A novel Gybrid Algorithm for Reconfiguration Problem of the Distribution Networks,» *22nd International Conference and Exhibition on Electricity (CIRED)*, June 2013.
- [25] Taher Kaboodi, Javad Olamaei, Hassan Siahkalim, Roozbeh Bitra, «Optimal Distribution Network Using Fuzzy Interaction and MPSO Algorithm,» *Smart Grid Conference (SGC)*, Dec. 2014.
- [26] Antonio De Bonis, João P. S., Andrea Mazza, Gianfranco Chicco, Francesco Torelli, «A Novel Optimization Algorithm Solving Network Reconfiguration,» *Power Systems Computation Conference*, 2015.
- [27] Liyong Duan, Guangkai Li, Qinghong Wng, Xu Yang, Peng Wu, «Distribution Network Reconfiguration Method Considering Energy Storage Divice,» *3rd International Conference in Systems and Informatic (ICSAI)*, 2016.
- [28] Susharla Venkata Sunil, Narri Yadaiah, «A Novel Improved Particle Swarm Optimization Frame Work for Reconfiguration of Radial Distribution System,» *IEEE International Conference on Envionment and Electrical Engineering*, pp. 1-5, 2017.
- [29] J. Olamaei, J. Gharepetin, G. T. Niknam, «An Approach Based on Particle Swarm Optimization for Distribution Fedder Reconfiguration Considering Distributed Generators,» *Power Systems Conference: Advanced Metiring, Protection, Control Communication and Distributed Resources*, 2007.
- [30] «J. Olamaei, T. Niknam, G. Gharehpetin,» *Application of Particle Swarm Optimization Distribution feeder Reconfiguration Considering Distributed Generators*, vol. 201, n° 1, pp. 575-586, 2008.
- [31] L. Qiwang, D. wei, D. Jianquam, L. Anhui, «A New reconfiguration Approach for Distribution System With Distributed GEneration,» *Energy and Enviroment Technology, ICEET09. International Conference IEEE*, vol. 2, pp. 23-26, 2009.

- [32] N. Rugthaicharoencheep, S. Sirisumrannukul, «Feeder Reconfiguration with Dispatchable Distributed Generators in Distribution System By Tabu Search,» *Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2009.
- [33] R. Chand, S. Chen, J. Chang, C. Lu, «Modifies Particle Swarm optimization for Solving Feeder Reconfiguration Problem With Distributed Generation,» *IEEE Regional 10th Conference, TENCON*, 2010.
- [34] Zou Bi-Chang. Gong Qing Wu, Chen Dan-Jun, «Distribution NETwork Reconfiguration Based on the Minimum Comprehensive Cost Distributed Generations,» *IEEE Power Engineering and Automation Conference (PEAM)*, 2011.
- [35] Aboelsood Zidan, E. El-Saanday, «Network Reconfiguration in Balanced Distributed System With Variable load Demand and Variable Resource Generation,» *Power and Energy Society General Meeting*, July 2012.
- [36] Almoataz Y. Abdelaziz, Reham A. Osama, Salem M. Elkhodary, E. F. El-Saadny, «Reconfiguration of Distribution Systems with Distributed Generators Using and Colony Optimization and Harmony Search,» *Power and Energy Society General Meeting*, Nov. 2012.
- [37] T. Bogdan, C. Mircea, A. Sumper, A. Sudria-Andreu, r. Villafafila-Robles, «Pareto Optimal Reconfiguration of Distribution Systems Using a Genetic Algorithm Based on NSGA-II,» *Enginies*, vol. 3, n° 13, pp. 1439-1455, 2013.
- [38] Behdad Arandian, Rahmat-Allah Hooshamad, Eskandar Gholipur, «Decreasing Activity Cost od Distribution System Company By Reconfiguration and Power Generation Control of DGs Based on Shuffled Frog Leaping Algorithm,» *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, pp. 2842-2851, 2016.
- [39] Subas Ratna Tuladhar, Jai Govind Sigh, Weerakorn Ongdakul, «Multi-Objetive Approach for Distribution Network Reconfiguration With Optimal DG Power Factor Using NSPSO,» *IET Generation, Transmission & Distribution* , vol. 10, pp. 2842-2851, 2016.
- [40] F. V. Dantas, D. Z. Fitiwi, S.F. Santos, J. P. S. Cataláos, «Dynamic Reconfiguration od Distribution Network Systems: A Key Flexibility option for RES Integration,» *Enviroment and Electrical Engineering. Industrial and Commercial power Europe*, June 2017.
- [41] Charles V. Camp, «Design of Space Trusses Using Big Bang - Big Crunch Optimization,» *Journal of Structural Enginnerin*, vol. 133, July 2007.
- [42] A. Kaveh, S. Talatahari, «Size Optimization of Space Trusses Using Big Bang - Big Crunch,» *Computers & structures*, vol. 87, pp. 1129-1140, Sep. 2009.

-
- [43] A. Kaveg, S. Talatahari, «Optimal Design of Schewdler and Ribbed Domes Via Hybrid Big Bang - big Crunch,» *Journal od Contruactional Steel Research*, vol. 66, pp. 412-419, Mar. 2010.
- [44] Heshen Tang, Jin Zhou, Songtao Xue, Liyu Xie, «Big Bang - Big Crunch Optimization for Parameter Estimation in Structural System,» *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 24, pp. 2888-2897, Nov. 2010.
- [45] Bobby Philip, Jayanta Pal, «An Evolutionary Computation Based Approach for Reduced Order Modelling of Linear Systems,» *IEEE International Conference*, Dec. 2010.
- [46] M. Aliasghary. I. Eksin, M. Guzelkaya, «Fuzzy-Sliding Model References Learning Control of Inverted Pendulum With Big Bang - Big Crunch,» *Intelligent Systems Design and Application (ISDA). 11th International Conference*, Nov. 2011.
- [47] Tufan Kumbasar, Ibrahim Eksin, Mujde Guzelkaya. Engin Yesil, «Adaptative Fuzzy Model Based Inverse Controller Design Using BB-BC optimizati3n Algorithm,» *Expert Systems With Applications*, vol. 38, pp. 12356-12364, Sep. 2011.
- [48] C. F. Kucuktexcan, V.M. Genc, «Big Bang - Big Crunch Optimal Preventive Control Action on Power Systems,» *Conference Publitation 3rd IEEE PES*, Oct. 2012.
- [49] Z. Zandi, E. Efjey, M. Sedighizadeh, «Reactive Power Dispatch Using Big Bang-Big Crunch optimization Algorithm,» *Power And Energy (PENCON), IEEE International Conference on Power and Energy*, Feb. 2012.
- [50] Emre Dincel, V. M. Istemlhan Genc, «A Power Systems Stabilizer Design By Big Bang - Big Crunch Algorithm,» *Control System, Computing and Engineering (ACCSCE), IEEE International Conference*, Mar. 2013.
- [51] S. Ahmadi, S. Abdi, «Optimal Reconfiguration Of balanced Distribution Systems using a New Big Bang - Big Crunch Algorithm for Loss Reduction,» *Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC)*, Nov. 2015.
- [52] P. Kofinas, anastasio I. Sounis, G. papadakis, M. N. Assimakopoulus, «An intelligent MPPT Controller Based on Direct Nural Control for Partilly Shaded PV,» *Energy and Building, ELSEVIER*, vol. 90, pp. 51-64, Mar. 2015.
- [53] A. Y. Abdelaziz, Y. G. Hegazy, Walid El-Khattam, M. M. Othman, «optimal Allocation of Stochastically Dependent Renewable Energy Based Distributed Generators in Unbalanced Distribution Network,» *Electric Power Systems Research, ELSEVIER*, vol. 119, pp. 34-44, Feb. 2016.
- [54] Almoataz Y. Abdelaziz, Yasser G. Hegazy G. Hegazy, Walid El-Khattam, Mahmoud M. Pthman, «A Multi-Objetive optimization for Sizing and Placement of Voltaje Controlled

- Distributed Generation Using Supervised Big Bang - Big Crunch Method,» *Electric power Components and Systems*, vol. 43, pp. 105-117, 2016.
- [55] J. Kennedy, R. Eberhart, «Particle Swarm optimization,» *Neural Networks, IEEE International Conference*, 1995.
- [56] M. M. Aman, G. B. Jasmon, A. H. A. Bakar, H. Mokhlis, «A New Approach for Optimum Simultaneous Multi-DG Distributed Generation Units Placement and Sizing Based on Maximization of System Loadability Using HPSO (Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm),» *Power Energy Dedicated Advanced Centre (UMPEDAC)*, January 2014.
- [57] Marco Antonio Castro Farias, «Un Modelo de Reconfiguración Multiobjetivo Utilizando SPEA2 que Considera Variabilidad Horaria de la Carga,» Santiago, Chile, Julio 2009.
- [58] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, «Asociación Chilena de Seguridad (ACHS),» 13 Septiembre 1977. [En línea]. Available: http://www.achs.cl/portal/leyes/Documents/DS244_77.pdf. [Último acceso: 25 Octubre 2017].
- [59] Hadi Saadat, «MathWorks,» 22 Diciembre 2016. [En línea]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/60682-hadi-saadat-power-tool-box-for-latest-matlab-version?focused=7161461&tab=function>. [Último acceso: 25 Octubre 2016].
- [60] A. T. Council, Earthquake damage evaluation data for California. Technical report, Seismic Safety Commission, Applied Technology Council (ATC), California, 1995.
- [61] S. Fingerhuth, «Integridad académica,» Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Julio 2014. [En línea]. Available: <http://integridadacademica.cl/>. [Último acceso: 20 10 2015].
- [62] E. P. Wigner, «Theory of traveling wave optical laser,» *Phys. Rev.*, vol. 134, pp. A635-A646, 1965.
- [63] E. T. J. van Weert and R. K. Munro, «Informatics and the Digital Society: Social, ethical and cognitive issues: IFIP TC3/WG3.1&3.2 Open Conference on Social,» de *Ethical and Cognitive Issues of Informatics and ICT*, Dortmund, Germany, 2003.
- [64] M. Shell, «Preparation of papers for IEEE TRANSACTION and JOURNALS,» May 2007.
- [65] A. G. Tsipkin, V. Vodnev, G. G. Tsipkin y A. I. Samojv, *Fórmulas matemáticas: álgebra, geometría, análisis matemático.*, Mir, 1998.
- [66] C. K. Alexander y M. Sadiku, *Circuits, Fundamentals of Electric*, McGraw-Hill College, 2003.

- [67] Oficina Internacional de Pesas y Medidas, «El Sistema Internacional de Unidades SI,» 2006. [En línea]. Available: http://www2.cem.es:8081/cem/es_ES/documentacion/generales/SIU8edes.pdf. [Último acceso: 2 January 2015].

A Resumen Estado del Arte

A.1 Últimas Aplicaciones para Reconfiguración

Tabla A-1: Resumen Estado del Arte para Reconfiguración Sin Generadores Distribuidos.

FUNCIÓN OBJETIVO										
Minimizar pérdidas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Minimizar operaciones switch					0					
Minimizar desviación de tensión								0		0
RESTRICCIONES										
Límite de corriente	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Límite de tensión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Radialidad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Operación de switch						0		0		
Límite de corriente en transformadores						0				
MÉTODO										
Algoritmo Genético (AG)	0								0	
Particle Swarm Optimization (PSO)		0				0	0			0
Artificial Bee Colony (ABC)			0							
Tabu Search (TS)				0						
Differential Evolution (DE)					0					
Nelder Mid (NM)						0				
Fuzzy method							0			
Big Bang Big Crunch (BB-BC)								0		
	2006 [19]	2009 [20]	2010 [21]	2010 [22]	2013 [23]	2013 [24]	2014 [25]	2015 [02]	2016 [27]	2017 [28]

A.2 Últimas Aplicaciones para Reconfiguración Considerando GD

Tabla A-2: Resumen Estado del Arte para Reconfiguración Con Generadores Distribuidos.

FUNCIÓN OBJETIVO												
Minimizar pérdidas activas	0	0	0	0		0	0	0	0		0	
Minimizar desviación de tensión		0					0				0	
Maximizar la capacidad de los GD					0							
SAIFI									0			
Minimizar costos de generación										0	0	
Minimizar costos reconfiguración										0	0	
RESTRICCIONES												
Límites de generación (Qmax y Qmin)	0	0			0	0	0				0	
Límites de generación (Pmax y Pmin)	0	0		0	0	0	0				0	
Límite de corriente	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	
Límite de tap en transformadores	0	0								0		
Factor de potencia en subestación	0	0										
Límites de tensión			0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Radialidad	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Límite de operación de switch						0						
MÉTODO												
Particle Swarm Optimization (PSO)	0	0			0						0	
Línealizar ecuaciones			0									
Tabu Search (TS)				0								
Ordinal Optimization (OO)					0							
Genetic Algorithm (GA)						0	0		0			
Ant Colony Optimization (ACO)								0				
Harmony Search (HS)								0				
NSGA-II									0			
Shuffled Frog Leaping (SFL)										0		
S-MILP											0	
	2007 [29]	2008 [30]	2009 [31]	2009 [32]	2010 [33]	2011 [34]	2012 [35]	2012 [36]	2013 [37]	2016 [38]	2016 [39]	2017 [40]

B Datos Sistemas de Prueba

B.1 Sistema Baran

B.1.1 Datos de Línea

Tabla B-1: Parámetros de Línea del Sistema Baran.

Línea	Nodo i	Nodo j	R [p.u.]	XL [p.u.]	YC [p.u.]	Imax [p.u.]
1	1	2	0,0058	0,0029	0	0,2
2	2	3	0,0308	0,0157	0	0,2
3	3	4	0,0228	0,0116	0	0,2
4	4	5	0,0238	0,0121	0	0,2
5	5	6	0,0511	0,0441	0	0,2
6	6	7	0,0117	0,0386	0	0,2
7	7	8	0,0444	0,0147	0	0,2
8	8	9	0,0643	0,0462	0	0,2
9	9	10	0,0651	0,0462	0	0,2
10	10	11	0,0123	0,0041	0	0,2
11	11	12	0,0234	0,0077	0	0,2
12	12	13	0,0916	0,0721	0	0,2
13	13	14	0,0338	0,0445	0	0,2
14	14	15	0,0369	0,0328	0	0,2
15	15	16	0,0466	0,034	0	0,2
16	16	17	0,0804	0,1074	0	0,2
17	17	18	0,0457	0,0358	0	0,2
18	2	19	0,0102	0,0098	0	0,2
19	19	20	0,0939	0,0846	0	0,2
20	20	21	0,0255	0,0298	0	0,2
21	21	22	0,0442	0,0585	0	0,2
22	3	23	0,0282	0,0192	0	0,2
23	23	24	0,056	0,0442	0	0,2

Línea	Nodo i	Nodo j	R [p.u.]	XL [p.u.]	YC [p.u.]	Imax [p.u.]
24	24	25	0,0559	0,0437	0	0,2
25	6	26	0,0127	0,0065	0	0,2
26	26	27	0,0177	0,009	0	0,2
27	27	28	0,0661	0,0583	0	0,2
28	28	29	0,0502	0,0437	0	0,2
29	29	30	0,3017	0,0161	0	0,2
30	30	31	0,0608	0,0601	0	0,2
31	31	32	0,0194	0,0226	0	0,2
32	32	33	0,0213	0,0331	0	0,2
33	8	21	0,1248	0,1248	0	0,2
34	9	15	0,1248	0,1248	0	0,2
35	12	22	0,1248	0,1248	0	0,2
36	18	33	0,0312	0,0312	0	0,2
37	25	29	0,0312	0,0312	0	0,2

B.1.2 Datos de Carga

Tabla B-2: Parámetros de Carga del Sistema Baran.

Nodo de carga	potencia activa [MW]	Potencia reactiva [MVAR]
1	0	0
2	0,1	0,06
3	0,09	0,04
4	0,12	0,08
5	0,06	0,03
6	0,06	0,02
7	0,2	0,1
8	0,2	0,1
9	0,06	0,02
10	0,06	0,02
11	0,045	0,03
12	0,06	0,035
13	0,06	0,035
14	0,12	0,08
15	0,06	0,01
16	0,06	0,02
17	0,06	0,02
18	0,09	0,04

Nodo de carga	potencia activa [MW]	Potencia reactiva [MVAR]
19	0,09	0,04
20	0,09	0,04
21	0,09	0,04
22	0,09	0,04
23	0,09	0,05
24	0,42	0,2
25	0,42	0,2
26	0,06	0,025
27	0,06	0,025
28	0,06	0,02
29	0,12	0,07
30	0,2	0,6
31	0,15	0,07
32	0,21	0,1
33	0,06	0,04

B.2 Sistema Real Colo Colo

B.2.1 Datos de Línea

Tabla B-3: Parámetros de Línea del Sistema Colo Colo.

Línea	Nodo i	Nodo j	R [p.u.]	XL [p.u.]	YC [p.u.]	Imax [p.u.]
1	1	2	0,02116	0,01365	0	0,45
2	2	3	0,0016	0,00103	0	0,45
3	3	4	0,00293	0,00189	0	0,45
4	3	5	0,00173	0,00112	0	0,45
5	3	6	0,00333	0,00215	0	0,45
6	6	7	0,00532	0,00343	0	0,45
7	7	8	0,00773	0,00263	0	0,35
8	8	9	0,008	0,00272	0	0,35
9	1	10	0,00402	0,00747	0	0,96
10	10	11	0,00155	0,00288	0	0,96
11	11	12	0,00327	0,00322	0	0,45
12	12	13	0,00084	0,00156	0	0,96
13	13	14	0,00142	0,00265	0	0,96
14	14	15	0,00054	0,00101	0	0,34
15	15	16	0,00084	0,00083	0	0,45

B Datos Sistemas de Prueba

Línea	Nodo i	Nodo j	R [p.u.]	XL [p.u.]	YC [p.u.]	Imax [p.u.]
16	16	17	0,00461	0,00455	0	0,45
17	17	18	0,00109	0,00107	0	0,96
18	1	19	0,00557	0,01035	0	0,86
19	19	20	0,00211	0,00317	0	0,86
20	20	21	0,001	0,00151	0	0,45
21	21	22	0,00201	0,00198	0	0,96
22	22	23	0,00285	0,00529	0	0,96
23	23	24	0,00559	0,0036	0	0,45
24	24	25	0,00133	0,00086	0	0,45
25	25	26	0,00093	0,0006	0	0,45
26	1	27	0,00211	0,00317	0	0,86
27	27	28	0,00069	0,00103	0	0,86
28	28	29	0,004	0,00136	0	0,45
29	29	30	0,00533	0,00181	0	0,45
30	30	31	0,00666	0,00227	0	0,45
31	28	32	0,00121	0,00182	0	0,86
32	32	33	0,00134	0,00132	0	0,45
33	33	34	0,00218	0,00215	0	0,45
34	32	35	0,00106	0,00159	0	0,86
35	35	36	0,0047	0,00706	0	0,86
36	36	37	0,00132	0,00198	0	0,86
37	37	38	0,00109	0,00202	0	0,96
38	38	39	0,00121	0,00226	0	0,96
39	39	40	0,00059	0,00109	0	0,96
40	1	41	0,00193	0,00235	0	0,86
41	41	42	0,00252	0,00308	0	0,86
42	42	43	0,00199	0,00243	0	0,86
43	43	44	0,00126	0,00154	0	0,86
44	44	45	0,00932	0,00601	0	0,45
45	45	46	0,0016	0,00103	0	0,45
46	46	47	0,00493	0,00318	0	0,45
47	47	48	0,00639	0,00412	0	0,45
48	44	49	0,00365	0,00445	0	0,86
49	49	50	0,00426	0,00145	0	0,45
50	49	51	0,00173	0,00211	0	0,86
51	51	52	0,00232	0,00283	0	0,86
52	52	53	0,00133	0,00162	0	0,86
53	53	54	0,00251	0,00248	0	0,45
54	54	55	0,004	0,00136	0	0,35

B Datos Sistemas de Prueba

Línea	Nodo i	Nodo j	R [p.u.]	XL [p.u.]	YC [p.u.]	Imax [p.u.]
55	55	56	0,01466	0,00499	0	0,35
56	54	57	0,00184	0,00182	0	45
57	57	58	0,00461	0,00455	0	0,45
58	58	59	0,00578	0,0057	0	0,45
59	59	60	0,0028	0,0018	0	0,45
60	1	61	0,00414	0,01043	0	1,25
61	61	62	0,00121	0,00226	0	0,96
62	62	63	0,00137	0,00206	0	0,86
63	63	64	0,00067	0,00066	0	0,45
64	64	65	0,00168	0,00165	0	0,45
65	65	66	0,001	0,00151	0	0,86
66	66	67	0,00095	0,00143	0	0,86
67	67	68	0,00137	0,00206	0	0,86
68	68	69	0,00184	0,00182	0	0,45
69	69	70	0,00268	0,00264	0	0,45
70	70	71	0,00251	0,00248	0	0,45
71	71	72	0,01199	0,00408	0	0,35
72	71	73	0,00218	0,00215	0	0,45
73	73	74	0,00586	0,002	0	0,35
74	74	75	0,01413	0,00481	0	0,35
75	75	76	0,01679	0,00571	0	0,35
76	73	77	0,00218	0,00215	0	0,45
77	77	78	0,00959	0,00327	0	0,35
78	77	79	0,00932	0,00601	0	0,45
79	77	80	0,00201	0,00198	0	0,45
80	80	81	0,00959	0,00327	0	0,35
81	80	82	0,00193	0,0019	0	0,45
82	82	83	0,01466	0,00499	0	0,35
83	83	84	0,00879	0,00299	0	0,35
84	82	85	0,00293	0,00289	0	0,45
85	1	86	0,00312	0,00381	0	0,86
86	86	87	0,00146	0,00178	0	0,86
87	87	88	0,00279	0,0034	0	0,86
88	88	89	0,00879	0,00299	0	0,35
89	89	90	0,00293	0,00289	0	0,45
90	89	91	0,00427	0,00421	0	0,45
91	91	92	0,01413	0,00481	0	0,35
92	91	93	0,00293	0,00289	0	0,45
93	93	94	0,01386	0,00472	0	0,35
94	89	95	0,0048	0,00163	0	0,35

B Datos Sistemas de Prueba

Línea	Nodo i	Nodo j	R [p.u.]	XL [p.u.]	YC [p.u.]	Imax [p.u.]
95	95	96	0,0032	0,00109	0	0,35
96	96	97	0,00293	0,00289	0	0,45
97	97	98	0,00142	0,0014	0	0,45
98	98	99	0,00168	0,00165	0	0,45
99	99	100	0,00352	0,00347	0	0,45
100	100	101	0,01226	0,00417	0	0,35
101	101	102	0,00267	0,00091	0	0,35
102	102	103	0,01119	0,00381	0	0,35
103	102	104	0,0021	0,00207	0	0,45
104	104	105	0,00586	0,002	0	0,35
105	104	106	0,00959	0,00327	0	0,35
106	104	107	0,00972	0,00627	0	0,45
107	107	108	0,00266	0,00172	0	0,45
108	104	109	0,00226	0,00223	0	0,45
109	109	110	0,004	0,00136	0	0,35
110	109	111	0,00666	0,00227	0	0,35
111	111	112	0,00533	0,00181	0	0,35
112	1	113	0,00066	0,00081	0	0,86
113	113	114	0,00086	0,00105	0	0,86
114	114	115	0,00213	0,00259	0	0,86
115	115	116	0,001	0,00121	0	0,86
116	116	117	0,00199	0,00243	0	0,86
117	117	118	0,00232	0,00283	0	0,86
118	118	119	0,008	0,00272	0	0,35
119	118	120	0,00179	0,00219	0	0,86
120	120	121	0,00266	0,00324	0	0,86
121	120	122	0,00173	0,00211	0	0,86
122	122	123	0,00173	0,00211	0	0,86
123	123	124	0,00166	0,00202	0	0,86
124	122	125	0,00312	0,00381	0	0,86
125	125	126	0,0012	0,00146	0	0,86
126	126	127	0,00106	0,0013	0	0,86
127	127	128	0,00226	0,00223	0	0,45
128	128	129	0,00453	0,00154	0	0,35
129	129	130	0,01386	0,00472	0	0,35
130	127	131	0,00093	0,00113	0	0,86
131	131	132	0,00173	0,00211	0	0,86
132	132	133	0,00299	0,00364	0	0,86
133	133	134	0,00086	0,00105	0	0,86
134	134	135	0,0012	0,00146	0	0,86
135	135	136	0,00153	0,00186	0	0,86

B Datos Sistemas de Prueba

Línea	Nodo i	Nodo j	R [p.u.]	XL [p.u.]	YC [p.u.]	Imax [p.u.]
136	136	137	0,00066	0,00081	0	0,86
137	137	138	0,00533	0,00181	0	0,35
138	137	139	0,00218	0,00215	0	0,45
139	139	140	0,00346	0,00223	0	0,45
140	140	141	0,00403	0,0021	0	0,35
141	140	142	0,00466	0,003	0	0,45
142	142	143	0,00386	0,00201	0	0,35
143	142	144	0,00226	0,00146	0	0,45
144	144	145	0,002	0,00129	0	0,45
145	145	146	0,00266	0,00172	0	0,45
146	146	147	0,01999	0,0068	0	0,35
147	146	148	0,01333	0,00454	0	0,35
148	148	149	0,00506	0,00172	0	0,35
149	149	150	0,03198	0,01089	0	0,35
150	148	151	0,01466	0,00499	0	0,35
151	151	152	0,01786	0,00608	0	0,35
152	151	153	0,00533	0,00181	0	0,35
153	153	154	0,01013	0,00345	0	0,35
154	154	155	0,01039	0,00354	0	0,35
155	154	156	0,01066	0,00363	0	0,35
156	156	157	0,01732	0,0059	0	0,35
157	156	158	0,00263	0,006	0	0,35
158	158	159	0,01439	0,0049	0	0,35
159	158	160	0,00426	0,00145	0	0,35
160	158	161	0,01359	0,00463	0	0,35
161	158	162	0,00666	0,00227	0	0,35
162	162	163	0,00613	0,00209	0	0,35
163	42	32	0,04484	0,06743	0	0,86
164	41	113	0,00066	0,00081	0	0,86
165	48	79	0,00359	0,00232	0	0,45
166	40	73	0,00444	0,00438	0	0,45
167	71	26	0,00235	0,00231	0	0,45
168	26	18	0,00101	0,00099	0	0,45
169	17	8	0,00218	0,00215	0	0,45
170	8	102	0,00168	0,00165	0	0,45
171	139	109	0,00218	0,00215	0	0,45
172	140	111	0,00359	0,00232	0	0,45
173	87	115	0,00199	0,00243	0	0,86
174	91	127	0,00444	0,00438	0	45

B.2.2 Datos de Carga

Tabla B-4: Parámetros de Carga del Sistema Colo Colo.

Nodo de carga	Potencia activa [MW]	Potencia reactiva [MVAR]
1	0	0
2	0,88011	0,4606
3	0,24009	0,10869
4	0,35204	0,18424
5	0,52807	0,27636
6	0,19001	0,08602
7	0,09663	0,04374
8	0	0
9	0,07808	0,03397
10	0	0
11	0,26341	0,11654
12	0,31212	0,13809
13	0,82322	0,3642
14	0,30564	0,13522
15	0	0
16	0,40641	0,1798
17	0	0
18	0,17122	0,07268
19	0,46314	0,14724
20	0,30055	0,09555
21	0,43959	0,13975
22	0,34741	0,11045
23	0,25364	0,08063
24	0	0
25	0,12773	-0,41225
26	0	0
27	0,1498	0,05634
28	0,18713	0,07037
29	0,01085	0,00408
30	0,06429	0,02418
31	0,23128	0,0824
32	0	-0,45
33	0,11524	0,04334
34	0,21431	0,08059
35	0,01799	0,00676

Nodo de carga	Potencia activa [MW]	Potencia reactiva [MVAR]
36	0,39274	0,1477
37	0,8525	0,3206
38	0,34991	0,13159
39	0,48483	0,18233
40	0,3108	0,11688
41	0,01482	0,00593
42	0	0
43	0	0
44	0,27996	0,10664
45	0,12078	0,0483
46	0,17687	0,07481
47	0,25181	0,10071
48	0,24157	0,09661
49	0,18237	0,06559
50	0,06164	0,02217
51	0	0
52	0,10371	0,0373
53	0	0
54	0,10612	0,04489
55	0,15691	0,05977
56	0,19168	0,07301
57	0,03754	0,0143
58	0,25757	0,10301
59	0,42481	0,16989
60	0,22082	0,08831
61	0,35733	0,10628
62	0,26795	0,0797
63	0,49975	0,14864
64	0,4195	0,12478
65	0,29534	0,08785
66	0,10764	0,03202
67	0,3445	0,10247
68	0,2421	0,07201
69	0,3105	0,09235
70	0,13374	-0,71338
71	0,20042	0,05487
72	0,05167	0,01022

Nodo de carga	Potencia activa [MW]	Potencia reactiva [MVAR]
73	0	0
74	0,15447	0,04229
75	0,14805	0,04054
76	0,08267	0,01635
77	0,11927	0,03266
78	0,05167	0,01022
79	0	0
80	0	0
81	0,2053	0,05621
82	0,1091	0,02987
83	0,14903	0,04433
84	0,10007	0,02976
85	0	0
86	0,13377	0,0625
87	0	0
88	0,23195	-0,6337
89	0	0
90	0,25293	0,11817
91	0,03682	0,01656
92	0,26276	0,12778
93	0,27844	0,12523
94	0,25767	0,11589
95	0,24485	0,11439
96	0,08521	0,03981
97	0,34782	0,1625
98	0,34863	0,16288
99	0,23786	0,11113
100	0,14225	0,06646
101	0,11899	0,05352
102	0,1412	0,06351
103	0,04952	0,02227
104	0,02783	0,01252
105	0,02347	0,01055
106	0,13257	0,06193
107	0,03896	0,0182
108	0,15865	0,08735
109	0,13488	0,06067

Nodo de carga	Potencia activa [MW]	Potencia reactiva [MVAR]
110	0,05043	0,02268
111	0,11566	0,04979
112	0,07694	0,03312
113	0,0474	0,01428
114	0,09196	0,0277
115	0	0
116	0	-0,45
117	0,07848	0,02181
118	0	0
119	0,10163	0,02824
120	0	0
121	0,11439	0,02867
122	0,07841	0,01965
123	0,01558	0,0039
124	0	0
125	0	-0,45
126	0,03811	0,01059
127	0	0
128	0	0
129	0,11946	0,02994
130	0,09257	0,0232
131	0,30613	0,06918
132	0,08223	0,02285
133	0,10106	0,02533
134	0	0
135	0	-0,75
136	0,18094	0,04392
137	0,02541	0,00706
138	0,13683	0,02849
139	0	0
140	0	0
141	0,14595	0,03039
142	0,04446	0,01114
143	0,54732	0,11397
144	0,04561	0,0095
145	0,42873	0,08928
146	0,05932	0,01487
147	0,09634	0,02415

Nodo de carga	Potencia activa [MW]	Potencia reactiva [MVAR]
148	0	0
149	0,07335	0,01838
150	0,13497	0,03383
151	0	0
152	0,34207	0,07123
153	0,06841	0,01425
154	0	0
155	0,09122	0,01899
156	0	0
157	0,02052	0,00427
158	0	0
159	0,22805	0,04749
160	0,06841	0,01425
161	0,36488	0,07598
162	0,37172	0,0774
163	0,04561	0,0095

C Resultados de las Simulaciones

C.1 Sistema Baran

Tabla C-1: Resultados obtenidos en el Sistema Baran.

horas	Potencia activa disipada [MW]		Magnitud desviación de tensión [%]	
	Con Generación	Sin Generación	Con Generación	Sin Generación
1	0,0063	0,0068	0,3689	0,4596
2	0,0064	0,0069	0,3655	0,4533
3	0,0064	0,0068	0,3597	0,4451
4	0,0062	0,0067	0,3451	0,4374
5	0,0063	0,0067	0,3468	0,4392
6	0,0064	0,007	0,3695	0,4682
7	0,0066	0,0073	0,3876	0,4972
8	0,0073	0,0084	0,4576	0,5767
9	0,0085	0,0106	0,5403	0,6937
10	0,0091	0,0122	0,5449	0,7516
11	0,009	0,013	0,5258	0,7804
12	0,0083	0,0128	0,4647	0,7872
13	0,008	0,0127	0,4009	0,7669
14	0,0078	0,0125	0,3929	0,7665
15	0,0081	0,0129	0,4036	0,7701
16	0,0084	0,0133	0,4387	0,7797
17	0,0096	0,0144	0,557	0,8382
18	0,0103	0,0144	0,6206	0,8641
19	0,0099	0,0127	0,6148	0,7994
20	0,0105	0,0121	0,6476	0,7719
21	0,01	0,0113	0,6235	0,7359
22	0,0095	0,0102	0,5805	0,6849
23	0,0073	0,009	0,4533	0,5608
24	0,0065	0,007	0,3835	0,4820

C.2 Sistema Colo Colo

Tabla C-2: Resultados obtenidos en el Sistema Colo Colo.

Horas	Pérdidas activas disipada [MW]		Magnitud desviación de tensión [%]	
	Con Generación	Sin Generación	Con Generación	Sin Generación
1	0,0227	0,022	0,8661	0.8661
2	0,0204	0,0198	0,7648	0.7648
3	0,0193	0,0186	0,7142	0.7142
4	0,0207	0,0174	0,6636	0.6636
5	0,0222	0,017	0,6132	0.6132
6	0,0271	0,0225	0,8661	0.8661
7	0,0329	0,0288	1,0609	1,0694
8	0,047	0,045	1,3547	1,3761
9	0,0642	0,0675	1,4145	1,5045
10	0,0704	0,0789	1,3248	1,5045
11	0,0763	0,0878	1,3334	1,5817
12	0,0777	0,0922	1,2867	1,6332
13	0,0686	0,0823	1,0995	1,5045
14	0,0672	0,0798	0,9512	1,3761
15	0,0667	0,0785	0,9088	1,3248
16	0,0696	0,0816	0,9976	1,3761
17	0,0973	0,1132	1,6118	1,8918
18	0,1425	0,1584	2,4877	2,6763
19	0,1272	0,1347	2,4482	2,5446
20	0,1196	0,121	2,4002	2,4133
21	0,1021	0,103	2,1996	2,204
22	0,085	0,085	2,0216	2,0216
23	0,0526	0,052	1,6332	1,6332
24	0,0297	0,029	1,1204	1,1204