

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

UBICACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO ÓPTIMO DE BANCOS DE
CAPACITORES PARA LA MINIMIZACIÓN DE PÉRDIDAS DE
POTENCIA ACTIVA EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN RADIAL
MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE MÉTODOS HEURÍSTICOS DE
COLONIA DE HORMIGAS Y ALGORITMO GENÉTICO

INFORME DE MATERIA INTEGRADORA

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

Presentado por:

KEVIN FRANKLIN LÓPEZ ROLDAN

WALTER JEANCARLO MARISCAL GARCÍA

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2018 – 2T

DEDICATORIA

Los primeros en ser indispensables en mi progreso como persona, estudiante y como profesional son mis padres Soraya García y Walter Mariscal, mis dos más grandes mentores, quienes me han dado el apoyo más incondicional del mundo, este logro tiene un gran valor para ellos al igual que para mí, así que son el primer lugar de mis agradecimientos como autor de este proyecto realizado con su apoyo.

A mi hermana Raisa Mariscal por darme su apoyo y atención en el hogar, que como médico profesional me ha atendido y ayudado en el transcurso de mi carrera en cada momento de debilidad en salud. Al resto de mi familia, a mis tías, primos y a mi querida abuelita Horlanda Larreta, quien, en muchos momentos, fue mi segunda madre, alguien que me ha cuidado y apoyado como lo haría la mejor madre del mundo.

A mis queridos compañeros y próximos colegas, Francisco Álvarez, David Plaza, Jonathan Garcés, Andrés Jacho, Joseph Guzmán, Ricardo Cajape, Andrés Pincay, Roger Ayala, Hellen Álvarez, Melissa Ontano, Carla Parra y Missael Fajardo quien ha sido también un excelente amigo durante mi carrera universitaria; a todos ellos, que desde el prepolitécnico han estado en compañía conmigo durante todos estos años de carrera, y que alguna vez fueron fundamentales en brindarme apoyo tanto académico como moral.

A mi compañero de tesis Kevin López, que sin su esfuerzo no hubiera podido culminar este proyecto. A mi compañera y querida amiga Bárbara Tamayo, quien no ha estado todos los años como el resto de compañeros, pero que ha sido un gran apoyo en mi vida y una muy buena compañera tanto personal como académica, una persona única, muy capaz y de gran corazón, alguien que forma parte de mi motivación en mi vida hasta el día de hoy.

A mis mejores amigos de la infancia, Alfredo Valdiviezo, Christopher Riera, Geovanny Calles y Jorge Bustamante, unas de las personas más importantes de mi vida como amigos que han sido durante varios años, que me han brindado una amistad única y de calidad, que ha perdurado a pesar de todo hasta el día de hoy.

Walter Jeancarlo Mariscal García.

DEDICATORIA

A Dios, en primer lugar, dedico este trabajo de titulación, por ser siempre el guiador de mis pasos, a mis padres Franklin López y Digna Roldan, por apoyarme en todo momento y en todo lugar a culminar con mis estudios, pese a las dificultades que hemos atravesado en este largo camino siempre han estado dispuestos a seguir en la lucha de querer lo mejor para nosotros sus hijos. A mis hermanos Erick López, Karen López y Kenny López porque forman parte de mi vida y sé que con el ejemplo van a ser mejores profesionales.

A mi esposa Andrea Loo, por ese apoyo incondicional que me dio en estos largos años, a pesar de los problemas y dificultades que se presentaron siempre salimos adelante, te agradezco también por ser madre de mi hijo Santiago López, una bendición que llegó a ser parte de nuestras vidas y nuestras familias, y que ahora es mi razón principal para seguir dando lo mejor de mí en cada objetivo, meta, proyecto que me proponga realizar.

Gracias a familiares en general, por creer en los sueños, y mucho más en los sueños cumplidos.

Kevin Franklin López Roldan.

AGRADECIMIENTOS

Los autores estamos agradecidos de todas las instituciones y personas que hicieron posible este trabajo.

Esta tesis de grado nunca hubiera sido posible sin el apoyo financiero de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). La ESPOL nos brindó tanto la oportunidad de convertirnos en Ingenieros como de recibir las tutorías en Quito. También queremos reconocer la ayuda recibida por la Corporación TRANSELECTRIC, quienes nos permitieron usar información relevante (especialmente al Ing. Juan Plazarte). Esto fue único e invaluable en el desarrollo de esta investigación.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Kevin Franklin López Roldan* y *Walter Jeancarlo Mariscal García* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOl realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”

Kevin Franklin López
Roldan

Walter Jeancarlo Mariscal
García

EVALUADORES

MSc. Fernando Vaca Urbano

PROFESOR DE LA MATERIA

Dr. Javier Urquiza Calderón

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Uno de los principales contribuyentes que forman parte del progreso de una comunidad es el índice de pérdidas de potencia activa en las empresas de distribución de energía eléctrica. Con la finalidad de implementar una solución a la reducción de pérdidas técnicas, así como se ha llevado a cabo por años la reducción de pérdidas no técnicas, este proyecto de investigación plantea las bases para realizar una optimización basada en metodología heurística para la minimización de pérdidas y por consiguiente el mejoramiento del perfil del voltaje.

Para cumplir con el objetivo de minimizar las pérdidas de potencia se utilizarán bancos de capacitores trifásicos que serán ubicados y dimensionados a lo largo de la red de distribución. Esta ubicación y dimensionamiento será realizado mediante métodos heurísticos denominados como Colonia de Hormigas y Algoritmo Genético, estos algoritmos buscaran la mejor solución para el problema planteado y determinaran que banco de capacitor deberá ser instalado en alguna barra específica de forma que en esas condiciones se reduzca la mayor cantidad de pérdidas.

Los métodos de optimización heurística serán comprobados en tres diferentes redes de distribución con topología radial, dos de ellos son casos de estudios del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, de aquí en adelante IEEE, y el último un caso real de una empresa de distribución. Las cuales son: IEEE 33 barras, IEEE 69 barras y el Alimentador Piñal de Cnel Guayas los Ríos.

Los resultados obtenidos al aplicar la metodología muestran reducciones sostenibles en las pérdidas, con mayor énfasis a las redes modelo de la IEEE, además, el perfil de voltaje mejora en las 3 redes de estudio, como consecuencia a instalación de los bancos de capacitores.

Palabras clave: Algoritmo genético, bancos de capacitores, colonia de hormigas, índice de pérdidas de potencia activa, método Heurístico, pérdidas no técnicas, pérdidas técnicas, topología radial.

ABSTRACT

One of the main contributors that are part of the progress of a community is the rate of active power losses in electricity distribution companies. To implement a solution to the reduction of technical losses, as well as the reduction of non-technical losses has been carried out for years, this research project establishes the bases to carry out an optimization based on heuristic methodology for the minimization of losses. and consequently, the improvement of the voltage profile.

To achieve the objective of minimizing power losses, three-phase capacitor banks will be used, which will be located and dimensioned throughout the distribution network. This location and sizing will be performed by heuristic methods called Ants Colony and Genetic Algorithm, these algorithms will seek the best solution for the problem and determine which capacitor bank should be installed in a specific bar so that in these conditions the greater amount of losses.

The heuristic optimization methods will be tested in three different distribution networks with radial topology, which are: IEEE 33 buses, IEEE 69 buses and the Piñal feeder of Cnel Guayas los Rios.

The results obtained by applying the methodology show sustainable reductions in losses, with greater emphasis on the model networks of the IEEE, in addition, the voltage profile improves in the three study networks, as a consequence of the installation of the capacitor banks.

Key words: Ant colony, capacitor banks, genetic algorithm, heuristic method, index of active power losses, non-technical losses, radial topology, technical losses.

TABLA DE CONTENIDO

EVALUADORES.....	xi
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xv
TABLA DE CONTENIDO	xvii
ÍNDICE DE FIGURAS	xxiii
ÍNDICE DE TABLAS.....	xxix
LISTADO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS	xxxí
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Contexto.....	3
1.1.1 Descripción del problema.....	6
1.1.2 Justificación del problema.....	7
1.2 Objetivos	9
1.3 Contribuciones del proyecto	11
Capítulo 2. Revisión de Literatura	13
2.1 Introducción.....	15
2.2 Red de Distribución Radial	17
2.2.1 Pérdidas de potencia activa en redes de distribución radial.....	18
2.2.2 Pérdida de estabilidad de voltaje en redes de distribución radial	18
2.2.3 Calidad del servicio eléctrico.....	19
2.3 Reducción de pérdidas de potencia en una red de distribución.....	20
2.3.1 Reducción de pérdidas usando los ULTC en transformadores y bancos de capacitores en un sistema de distribución.....	21

2.3.2	<i>Reducción de pérdidas de potencia utilizando generación distribuida.</i>	21
2.4	Métodos Aplicados a la Optimización	22
2.4.1	<i>Métodos heurísticos</i>	23
2.4.2	<i>Métodos metaheurísticos</i>	24
2.5	Algoritmos de optimización	25
2.5.1	<i>Algoritmo Genético (GA)</i>	25
2.5.2	<i>Optimización por Colonia de hormigas (ACO)</i>	26
2.6	Lenguaje DPL	27
Capítulo 3.	Metodología	29
3.1	Introducción	31
3.2	Descripción de los sistemas simulados en PowerFactory	32
3.2.1	<i>Sistema de 33 barras</i>	33
3.2.2	<i>Sistema de 69 barras</i>	34
3.2.3	<i>Sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos</i>	37
3.3	Inicialización de variables del sistema	38
3.3.1	<i>Codificación de las variables mediante el lenguaje DPL</i>	41
3.4	Planteamiento inicial para la minimización de pérdidas de potencia	44
3.4.1	<i>Formulación de la Ubicación y despacho Óptimo de Bancos de Capacitores</i>	44
3.4.2	<i>Evaluación de la función objetivo y restricciones</i>	47
3.5	Planteamiento del Algoritmo ACO (Ant Colony Optimization)	48
3.5.1	<i>Inicialización de parámetros</i>	48

3.5.2	<i>Construcción de soluciones mediante la probabilidad de selección</i>	50
3.5.3	<i>Regla de selección del objetivo</i>	51
3.5.4	<i>Actualización de feromonas</i>	52
3.6	Planteamiento del Algoritmo Genético.....	54
3.6.1	<i>Codificación de las variables de optimización de la red e inicialización de la población inicial</i>	54
3.6.2	<i>Estrategia de selección para la población inicial</i>	55
3.6.3	<i>Codificación de la población inicial</i>	58
3.6.4	<i>Evaluación de la primera generación y Selección natural</i>	60
3.6.5	<i>Cruce de individuos para la siguiente generación</i>	60
3.6.6	<i>Mutación del cromosoma</i>	61
Capítulo 4.	Resultados	63
4.1	Introducción.....	67
4.2	Topología final de los casos de estudio con las pérdidas reducidas mediante la ubicación óptima de bancos de capacitores utilizando el método de Colonia de hormigas.....	67
4.2.1	<i>Sistema IEEE 33 barras</i>	68
4.2.2	<i>Sistema IEEE 69 barras</i>	68
4.3	Topología final de los casos de estudio con las pérdidas reducidas mediante la ubicación óptima de bancos de capacitores utilizando el método de Algoritmo genético.....	69
4.3.1	<i>Sistema IEEE 33 barras</i>	69
4.3.2	<i>Sistema IEEE 69 barras</i>	70
4.4	Resultados de la convergencia de la Función objetivo utilizando el método de Colonia de hormigas.....	71

4.4.1	<i>Convergencia de la función objetivo para el sistema IEEE 33 barras..</i>	72
4.4.2	<i>Convergencia de la función objetivo para el sistema IEEE 69 barras..</i>	72
4.4.3	<i>Convergencia de la función objetivo para el sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos.....</i>	73
4.5	Resultados de la convergencia de la Función objetivo utilizando el método de Algoritmo genético	74
4.5.1	<i>Convergencia de la función Fitness y función objetivo para el caso IEEE 33 barras.....</i>	75
4.5.2	<i>Convergencia de la función Fitness y función objetivo para el caso IEEE 69 barras.....</i>	76
4.5.3	<i>Convergencia de la función Fitness y función objetivo para el caso Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos</i>	77
4.6	Perfiles de voltaje por barra: Sin compensación reactiva y con compensación reactiva mediante los Bancos de capacitores utilizando el método de colonia de hormigas.....	78
4.6.1	<i>Perfil de voltajes para el caso IEEE 33 barras</i>	78
4.6.2	<i>Perfiles de voltaje para el caso IEEE 69 barras</i>	79
4.6.3	<i>Perfil de voltajes para el caso Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos.....</i>	80
4.7	Perfiles de voltaje por barra: Sin compensación reactiva y con compensación reactiva mediante los Bancos de capacitores utilizando el método de Algoritmo genético	82
4.7.1	<i>Perfil de voltajes para el caso IEEE 33 barras</i>	83
4.7.2	<i>Perfiles de voltaje para el caso IEEE 69 barras</i>	84
4.7.3	<i>Perfiles de voltaje para el caso Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos.....</i>	85

4.8	Resumen de los resultados con Algoritmo Colonia de Hormigas y Algoritmo genético	87
4.8.1	<i>Resumen de resultados para el caso IEEE de 33 barras</i>	<i>88</i>
4.8.2	<i>Resumen de resultados para el caso de IEEE de 69 barras</i>	<i>88</i>
4.8.3	<i>Resumen de resultados para el caso de estudio real del Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas Los Ríos.....</i>	<i>89</i>
4.9	Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados utilizando el Algoritmo ACO	89
4.9.1	<i>Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso IEEE de 33 barras.....</i>	<i>89</i>
4.9.2	<i>Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso IEEE de 69 barras.....</i>	<i>90</i>
4.9.3	<i>Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso de estudio del Alimentador Piñal CNEL EP Guayas Los Ríos.....</i>	<i>92</i>
4.10	Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados utilizando el Algoritmo Genético	93
4.10.1	<i>Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso IEEE de 33 barras.....</i>	<i>93</i>
4.10.2	<i>Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso IEEE de 69 barras.....</i>	<i>94</i>
4.10.3	<i>Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso de estudio del Alimentador Piñal CNEL EP Guayas Los Ríos.....</i>	<i>95</i>
Capítulo 5.	Discusión	97
5.1	Introducción.....	99
5.2	Datos de entrada.....	99
5.3	Datos de salida	102
5.4	Elección de los Métodos de solución.....	103

5.5	Contrastes de los dos métodos heurísticos seleccionados.....	104
5.6	Reconciliación con otros métodos heurísticos.....	105
Capítulo 6.	Conclusiones.....	107
6.1	Introducción.....	109
6.2	Solución a las preguntas de investigación.....	110
6.3	Conclusiones específicas.....	112
6.4	Limitantes del proyecto de investigación.....	113
6.5	Recomendaciones y sugerencias para estudios posteriores.....	114
Apéndices.....		117
Apéndice A.....		119
Apéndice B.....		123
B.1	Sistema IEEE 33 Barras – Sistema de distribución radial.....	123
B.2	Sistema IEEE 69 Barras – Un alimentador principal.....	126
B.3	Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas Los Ríos.....	129
Apéndice C.....		135
Apéndice D.....		141
Apéndice E.....		155
REFERENCIAS.....		177

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, (ARCONEL, 2017).....	16
Figura 2.2: Porcentaje de pérdidas en el sistema eléctrico de transmisión y distribución, (ARCONEL, 2017).....	16
Figura 3.1: Diagrama de flujo del procedimiento para encontrar la solución al problema planteado.....	32
Figura 3.2: Red de distribución de la IEEE de 33 barras. Sistema de prueba 1 (Candelo-Becerra and Hernández-Riñao, 2015)	33
Figura 3.3: Sistema de la IEEE de 33 barras modelada en DlgSILENT PowerFactory con los Bancos de Capacitores ubicados	34
Figura 3.4: Red de distribución de la IEEE de 69 barras. Sistema de prueba 2 (Candelo-Becerra and Hernández-Riñao, 2015)	35
Figura 3.5: Sistema de la IEEE de 69 barras modelada en DlgSILENT PowerFactory con los Bancos de Capacitores ubicados	36
Figura 3.6: Red de distribución del Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos. Sistema de prueba 3	37
Figura 3.7: Sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos modelada en DlgSILENT PowerFactory con los Bancos de Capacitores ubicados	38
Figura 3.8 Asignación de variables a los objetos seleccionados del Sistema de Potencia en DPL.	38
Figura 3.9 Obtención del número de Barras del sistema.	39
Figura 3.10 Inicialización de matrices y vectores para las variables del sistema.	40
Figura 3.11 Inicialización de vectores y matrices para el registro y manejo de los resultados de las iteraciones.	41

Figura 3.12 Codificación de las Barras conectadas a los Bancos de Capacitores.	42
Figura 3.13 Codificación de las Líneas interconectadas entre las Barras i & j. ...	43
Figura 3.14 Diagrama unifilar de una Red de distribución radial convencional de un solo alimentador (Nikoukar and Gandomkar, 2005).....	44
Figura 3.15: Estado de servicio de los capacitores en el sistema de potencia....	46
Figura 3.16: Función de flujo de potencia, llamada la forma de onda externa en el script en DPL.....	47
Figura 3.17: Ejecución del flujo de potencia y obtención de las pérdidas en el cálculo de la información heurística.....	48
Figura 3.18: Inicialización de parámetros, matrices y vectores para el desarrollo del Algoritmo ACO	50
Figura 3.19: Ilustración de una hormiga con sus respectivas alternativas y selección en base a sus probabilidades (Rukundu and Cao, 2016).....	51
Figura 3.20: Ilustración de los resultados mediante el algoritmo ACO basado en el planteamiento para el dimensionamiento de cada Banco de capacitor (Sirjani and Hassanpour, 2012).....	52
Figura 3.21: Diagrama de flujo para el algoritmo por Colonia de Hormigas.	53
Figura 3.22: Inicialización de parámetros constantes para el desarrollo del Algoritmo Genético.....	55
Figura 3.23: Cromosoma generado aleatoriamente por cada Bit de un Gen de números binarios (Cadena de Bits)	56
Figura 3.24: Cromosoma generado aleatoriamente por cada Gen con números enteros.....	56
Figura 3.25: Probabilidades de generar un número igual a 0 o 1 (Estado de servicio de un Banco de Capacitores).	57

Figura 3.26: Algoritmo de selección aleatoria de la capacidad del Banco de Capacitores.....	57
Figura 3.27: Dimensión y valor codificado en Binario de un Gen con un valor de 31 Pasos de capacitancia	59
Figura 3.28 Estructura de una población de Cromosomas codificados en Binario (Liu, 2014).....	59
Figura 3.29: Cruce entre individuos y resultado de la siguiente población (Liu, 2014).....	61
Figura 3.30: Ejemplo del punto de cruce, para 1 sola sección (Troncoso and Suárez, 2017).....	61
Figura 3.31: Flujograma del Algoritmo Genético para la Optimización de la Red mediante Bancos de Capacitores.....	62
Figura 4.1: Topología de la red IEEE 33 Barras con la ubicación óptima de banco de capacitores mediante ACO.....	68
Figura 4.2: Topología de la red IEEE 69 Barras con la ubicación óptima de banco de capacitores mediante ACO.....	69
Figura 4.3: Topología de la red IEEE 33 Barras con la ubicación óptima de banco de capacitores mediante GA	70
Figura 4.4: Topología de la red IEEE 69 Barras con la ubicación óptima de banco de capacitores mediante GA	71
Figura 4.5: Convergencia ACO IEEE 33 Barras	72
Figura 4.6: Convergencia ACO 69 Barras	73
Figura 4.7: Convergencia ACO Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos	74
Figura 4.8: Convergencia GA IEEE 33 Barras.....	75
Figura 4.9: Convergencia GA IEEE 69 Barras.....	76

Figura 4.10: Convergencia GA Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos	77
Figura 4.11: Perfil de tensión ACO IEEE 33 Barras.....	78
Figura 4.12: Perfil de tensión ACO IEEE 69 Barras.....	79
Figura 4.13: Perfil de tensión Fase A con ACO Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos.....	80
Figura 4.14: Perfil de tensión Fase B con ACO Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos.....	81
Figura 4.15: Perfil de tensión Fase C con ACO Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos.....	82
Figura 4.16: Perfil de tensión GA IEEE 33 Barras	83
Figura 4.17: Perfil de tensión GA IEEE 69 Barras	84
Figura 4.18: Perfil de tensión Fase A con GA Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos	85
Figura 4.19: Perfil de tensión Fase B con GA Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos	86
Figura 4.20: Perfil de tensión Fase C con GA Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos.....	87
Figura A.1 Inicio del Data Manager de DlgSILENT PowerFactory.....	119
Figura A.2 Creación de un nuevo proyecto en DlgSILENT PowerFactory	119
Figura A.3 Creación del nuevo proyecto ("Project").....	120
Figura A.4 Asignación de nombre y frecuencia nominal del 1er sistema de potencia a crear.....	120
Figura A.5 Ventana para la construcción del diagrama esquemático de la red.	121
Figura A.6 Opción para dimensionar el formato de la hoja de dibujo.....	121

Figura A.7 Edición del formato de la hoja de dibujo mediante la opción de "Drawing Format"	122
Figura A.8 Elementos principales utilizados para la creación de una red de distribución radial	122
Figura B.1 Diagrama esquemático del sistema IEEE de 33 barras realizado en PowerFactory	123
Figura B.2 Diagrama esquemático del sistema IEEE de 69 barras realizado en PowerFactory	126
Figura B.3 Sistema de potencia del Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos modelada en DIgSILENT PowerFactory con los Bancos de Capacitores ubicados	129
Figura B.4 Diagrama unifilar completo del Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos modelada en DIgSILENT PowerFactory con los Bancos de Capacitores ubicados en las barras trifásicas	131
Figura C.1 Creación del Script en lenguaje DPL	135
Figura C.2 Asignación del nombre del nuevo script.....	136
Figura C.3 Creación de un vector en el script previamente hecho.....	136
Figura C.4 Creación de una matriz en el script previamente hecho.....	137
Figura C.5 Creación de la función de flujo de potencia para el script en DPL previamente hecho.....	138
Figura C.6 Configuración de la función de flujo de potencia para sistemas desbalanceados	138
Figura C.7 Creación de la función "Echo" para silenciar los mensajes de las funciones internas	139
Figura C.8 Configuración de la función Echo	139

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Pseudocódigo de la Optimización por Algoritmo Genético (Gavrilas, 2010).....	26
Tabla 2.2: Pseudocódigo para la Optimización por Colonia de Hormigas(Gavrilas, 2010).....	27
Tabla 3.1: Matriz de valores de potencias reactivas para el dimensionamiento de cada Banco de capacitor	47
Tabla 3.2: Ejemplo de la evaluación de la población inicial	60
Tabla 4.1: Resumen de la reducción de pérdidas y Bancos de capacitores Instalados - Caso IEEE 33 barras	88
Tabla 4.2: Resumen de la reducción de pérdidas y Bancos de capacitores Instalados - Caso IEEE 69 barras	88
Tabla 4.3: Resumen de la reducción de pérdidas y Bancos de capacitores Instalados - Alimentador Piñal CNEL EP Guayas Los Ríos.....	89
Tabla 4.4: Valores de estado de servicio y dimensión de reactivos por cada Banco de capacitores para el caso de 33 barras utilizando el algoritmo ACO	90
Tabla 4.5: Valores de estado de servicio y dimensión de reactivos por cada Banco de capacitores para el caso de 69 barras utilizando el algoritmo ACO	91
Tabla 4.6: Valores de estado de servicio y dimensión de reactivos por cada Banco de capacitores para el caso del Alimentador Piñal CNEL EP Guayas Los Ríos utilizando el algoritmo ACO	92
Tabla 4.7: Valores de estado de servicio y dimensión de reactivos por cada Banco de capacitores para el caso de 33 barras utilizando el Algoritmo genético	93
Tabla 4.8: Valores de estado de servicio y dimensión de reactivos por cada Banco de capacitores para el caso de 69 barras utilizando el Algoritmo genético	94

Tabla 4.9: Valores de estado de servicio y dimensión de reactivos por cada Banco de capacitores para el caso del Alimentador Piñal CNEL EP Guayas Los Ríos utilizando el Algoritmo genético	95
Tabla B.1 Datos de potencias de la Demanda por cada barra del sistema IEEE de 33 barras (Mithulanathan et al., 2016)	124
Tabla B.2 Datos de las impedancias de línea del Sistema de la IEEE 33 Barras (Mithulanathan et al., 2016)	125
Tabla B.3 Datos de la potencia de demanda por cada barra del sistema de la IEEE de 69 barras (Mithulanathan et al., 2016)	127
Tabla B.4 Datos de las impedancias de línea del Sistema de la IEEE de 69 barras de 1 solo alimentador (Mithulanathan et al., 2016)	128
Tabla B.5 Datos de la potencia de demanda por fase de cada barra del sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos.	132
Tabla B.6 Datos de las impedancias de línea del Sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos – Parte 1	133
Tabla B.7 Datos de las impedancias de línea del Sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos – Parte 2	134

LISTADO DE ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ABC	ARTIFICIAL BEE COLONY
ACO	ANT COLONY OPTIMIZATION
ARCONEL	AGENCIA DE REGULACIÓN Y CONTROL DE ELECTRICIDAD
CNEL	CORPORACIÓN NACIONAL DE ELECTRICIDAD
DG	DISTRIBUTED GENERATION
DPL	DigSILENT PROGRAMMING LANGUAGE
GA	GENETIC ALGORITHM
IEEE	INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS
PSO	PARTICLE SWARM OPTIMIZATION
SED	SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN
SNI	SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO
SSO	SHARK SMELL OPTIMIZATION
ULTC	UNDER LOAD TAP CHANGER

Capítulo 1. Introducción

Capítulo 1. Introducción

1.1	Contexto.....	3
1.1.1	<i>Descripción del problema</i>	6
1.1.2	<i>Justificación del problema</i>	7
1.2	Objetivos	9
1.3	Contribuciones del proyecto	11

1.1 Contexto

A medida que pasan los años, los avances tecnológicos se van desarrollando de forma exponencial, creando una necesidad en los seres humanos que consiste en fortalecer sus habilidades, destrezas y competencias en todos los escenarios que interactúan. Las compañías, empresa e instituciones públicas y privadas, que cumplen la labor de prestar servicios diariamente a la población, deben estar en la capacidad de enfrentar con eficiencia y eficacia los retos diarios que la globalización les genere, (Cordova Mite, 2015). De esa forma estar preparados a confrontar las posibles eventualidades de forma anticipada, permitiéndose incorporar soluciones íntegras en su comunidad.

Este trabajo pretende solucionar, un problema propuesto que requiere, mejorar el proceso de Distribución de la energía eléctrica a nivel de media tensión que en la actualidad genera una cantidad elevada de pérdidas de potencia, tales que representan pérdidas de dinero para el país y la comunidad.

La idea de tener procesos eficientes que abarquen el ahorro de recursos y el aprovechamiento de toda la materia prima se direcciona a que todo el recorrido que se da en la transformación de la energía, es decir, generación, transmisión y distribución, debe ser monitoreado y controlado, y con mucha más exactitud en los centros de carga pues justo en esos puntos es donde se producen la mayor cantidad de pérdidas y variaciones de voltaje, he ahí el interés en mejorar la eficiencia y la confiabilidad del sistema eléctrico de distribución, de aquí en adelante SED, que de cierta forma se traduce en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejora la calidad de la energía y la mejor satisfacción del cliente.

En esta primera parte del proyecto de titulación se propone explicar el contenido del documento en general, capítulo por capítulo, así como la temática que se desarrollará en cada uno de ellos. Además, describe la importancia del empleo de bancos de capacitores en una red de distribución radial, tal como la correcta ubicación y dimensionamiento para que posteriormente puedan ser utilizados en una adecuada operación de redes de distribución con variabilidad de cargas.

Una condición de falla que se presente en un SED puede provocar pérdidas de carga a gran escala, dichas fallas pueden ocurrir de forma directa, ante la operación incorrecta de equipos que se encuentren interactuando en la red, o de forma indirecta, cuando un agente externo perturba de forma intencional o no el sistema de distribución. El objetivo principal de la operación del SED siempre será proporcionar un voltaje aceptable para todos los clientes en todas las condiciones de carga, (Uluski, 2012). De esa forma se asegura que los equipos del sistema de distribución no sufran daños por sobrecarga o condiciones de falla reduciendo de esa manera la probabilidad de falla tipo directa.

Para lograr el objetivo de proporcionar un voltaje aceptable a los clientes, las empresas de distribución están implementando nuevas tecnologías como la optimización de volt-VAR y la reconfiguración óptima de la red (Uluski, 2012). Dichos procesos conducen al aprovechamiento integral de todos los activos que se encuentren en línea dentro del sistema de potencia. La optimización de volt-VAR se relaciona directamente con la aplicación de la ubicación y dimensionamiento óptimo de bancos de capacitores que permitan inyectar reactivos al SED, dichos bancos son dimensionados de acuerdo a la máxima demanda del sistema.

Teniendo como premisa lo mencionado anteriormente, se pretende entregar al cliente un voltaje aceptable en sus terminales reduciendo de forma significativa las pérdidas de potencia activa, asegurando el máximo desempeño de todos los activos del sistema de potencia.

El funcionamiento óptimo de una red de distribución de energía eléctrica es un problema mixto de enteros, no lineales y de objetivos múltiples (Ebrahimi et al., 2012), por ello se crea la necesidad de tener redes de distribución de energía eléctrica de tipo radiales con un adecuado dimensionamiento de reactivos y a su vez una adecuada ubicación, refiriéndose al empleo de bancos de capacitores.

Los bancos de capacitores deben estar ubicados y dimensionados de forma que ante alguna perturbación se tenga una respuesta flexible y mantenga las variables de control dentro de los rangos adecuados. Por lo tanto, en este documento, los métodos heurísticos como el algoritmo genético, de aquí en adelante (GA), y la

optimización por colonia de hormigas, de aquí en adelante (ACO), se utilizarán para resolver el problema de ubicación y dimensionamiento.

Finalmente, para comprobar la eficacia y viabilidad de los métodos propuestos, se modelarán redes de distribución tipo radiales y se verificará mediante la ubicación y el dimensionamiento óptimo de bancos de capacitores la reducción de pérdidas de potencia y la entrega del voltaje adecuado en sus terminales. Las redes que se utilizarán son: IEEE 33 barras, IEEE 69 barras y Alimentador Piñal – Cnel Guayas los Ríos. A continuación, se detalla lo que se tratará en cada una de las secciones próximas.

En la Sección 1.1.1 se describe el problema de las pérdidas de potencia activa en las redes de distribución de energía eléctrica y la relación que existe con el voltaje y la calidad de la energía, sus principales causantes y las consecuencias que provocan en el sistema, además, se describen los problemas que se establecen en sistemas adyacentes conectados a la red.

En la Sección 1.1.2 se encuentra la justificación del por qué es necesario resolver el problema de las pérdidas de potencia, con la metodología basada en la ubicación y dimensionamiento óptimo de bancos de capacitores. En adición, se resalta la importancia de esta solución a causa de la información actual de pérdidas en el sistema eléctrico ecuatoriano que la podemos encontrar en (ARCONEL, 2017), para mantener un porcentaje de pérdidas bajo y así obtener el escenario más eficiente de operación en las redes de distribución eléctrica, además de mantener un perfil de voltaje adecuado que se encuentre dentro del rango permitido por la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL).

En la Sección 1.2 se establecen las preguntas de investigación que se desean responder en esta tesis, se incluyen, además, los objetivos que se esperan alcanzar en cada capítulo.

En la Sección 1.3 se describen las contribuciones que se espera brindar al sector energético, en el campo de sistemas de potencia.

1.1.1 Descripción del problema

En un SED, las pérdidas de potencia activa representan del 10 al 13% de la energía generada, esto se debe a la disipación de energía térmica I^2R en los alimentadores, (Devabalaji et al., 2015). La disipación de energía térmica produce efectos secundarios en los componentes asociados, pues al elevarse la temperatura se crea un ambiente hostil que termina disminuyendo el tiempo de vida útil de los equipos, que al final terminará provocando falla de los aislamientos convirtiéndose dicha disipación térmica en una catástrofe para la sociedad.

Como consecuencia a ello se presentan algunos problemas de calidad de la energía como: fluctuaciones de voltaje, perturbación rápida del voltaje, cortes de energía eléctrica y saturación prematura en equipos. Dichos problemas que pueden provocar una deformación de la onda sinusoidal ideal de tensión o corriente que a su vez genera efectos indeseados como: pérdida de información en los dispositivos informáticos, mal funcionamiento de los aparatos de medidores de energía, funcionamiento erróneo y paros no planeados en los sistemas de protección, control y producción, picos indeseados de potencia eléctrica, mal funcionamiento y aumento de temperatura de elementos electromecánicos, los cuales producen una reducción en su tiempo de vida útil, entre otros (Rojas et al., 2014). Problema que no solo pueden costar la pérdida material, sino que en casos extremos hasta la vida de algún equipo de trabajo

Una falla en el SED puede provocar gran cantidad de pérdidas para las industrias en términos monetarios debido a horas de producción detenidas por falta del suministro eléctrico, pues ante un evento inesperado no se tiene una reacción oportuna que permita reducir el tiempo de reconexión que asegure la calidad y confiabilidad del sistema.

Usualmente las redes de distribución son operadas de forma radial (Arredondo et al., 2016); sin embargo, debido a la disipación de energía que se hace presente cuando los alimentadores se encuentran en estado de sobrecarga o desbalanceo se da la necesidad de poner en funcionamiento los bancos de capacitores instalados estratégicamente a lo largo de la red minimizando las pérdidas de

potencia activa y mejorando el perfil de voltaje en todos los puntos de la red de distribución.

El desarrollo de este trabajo de titulación se enfocará en resolver el problema de la ubicación y dimensionamiento óptimo de bancos de capacitores pues, a medida que cambian las condiciones de operación de las redes de distribución eléctrica se producen un conjunto de alteraciones en el sistema que pueden provocar diferentes perturbaciones como: inestabilidad de voltaje, pérdidas de potencia, entre otros. El empleo de bancos de capacitores en los SED presenta las siguientes ventajas: (i) reduce las pérdidas de potencia en el sistema, (ii) mejora el perfil de voltaje, (iii) libera la capacidad de los alimentadores, (iv) mejoramiento del factor de potencia (Askarzadeh, 2016). Ventajas que a su vez se traducen en beneficio para la comunidad que logra establecer un lazo de confianza hacia el sector energético, permitiéndose así desarrollarse e ir evolucionando en lo personal y profesional, contribuyendo así al país de forma positiva.

Otra ventaja muy representativa que presenta el uso de bancos de capacitores es la atenuación de los niveles de armónicos, ya que modifican la impedancia de la red y las frecuencias de resonancias (Genovez and Ureña, 2018). Con estas atenuaciones se logra obtener perfiles de voltaje con mayor calidad para el consumidor, que a su vez implica tener ondas de voltaje mayormente sinusoidales.

1.1.2 Justificación del problema

Para empresas que se dedican a la distribución de energía eléctrica y tengan como objetivo entregarla al mínimo costo, resulta significativo ejecutar estudios sobre la ubicación y dimensionamiento óptimo de bancos de capacitores, de forma que se consiga el aprovechamiento total de la energía provista por las centrales de generación. Esto implica tener un SED eficiente, capaz de consumir la menor cantidad de energía, para obtener los mismos beneficios en términos de cantidad y calidad, es decir, conservar los mismos bienes, servicios, realizar las mismas actividades, pero con la intención de que haya el menor desperdicio energético posible (Riofrío et al., 2014). Permittiéndose así reducir tarifas de cobro que a la larga ayudará al mejor desempeño de la población, consiguiendo así un desarrollo sostenible y con mayores oportunidades.

Es importante, además, que dicho sistema pueda contemplar un porcentaje de reducción de pérdidas de potencia activa superior a los niveles que se manejan en la actualidad, que consecuentemente se traduzcan en reducción de caídas de voltaje. Una solución que tendrá como principal responsable la ejecución de algoritmos basados en metodología heurística ACO y GA, para la disminución del porcentaje de pérdidas de potencia en el sistema de distribución.

El sector eléctrico ecuatoriano a través de su historia ha tratado de suplir la demanda de acuerdo al aumento de población; según ARCONEL, en el año 2016 se tuvo un consumo energético de 18,897.43 GWh con una cobertura del 97.24% por lo cual se tuvo que generar 23,254.62 GWh de energía, es decir, 4,357.19 GWh son representados como pérdidas de potencia tanto en el sistema de transmisión como en el sistema de distribución. El sistema de distribución fue el mayor contribuyente con respecto a las pérdidas pues se presentó con el 12.21% en comparación con el sistema de transmisión que tan solo fue el 3.48% (ARCONEL, 2017).

Los datos que muestra el ARCONEL llaman mucho la atención pues desde el 2008 al 2017 se ha trabajado para reducir dicho porcentaje, en el 2008 el nivel de pérdidas de potencia fue del 19.61%, entre pérdidas técnicas (9.31%) y pérdidas no técnicas (10.30%); en el 2017 el nivel de pérdidas alcanzó el 11.49%, entre pérdidas técnicas (7.30%) y pérdidas no técnicas (4.18%) (ARCONEL, 2017). Se puede observar que el porcentaje de pérdidas de potencia en el sistema de distribución se ha reducido conforme han pasado los años. Sin embargo, algo que llama mucho la atención es que en pérdidas no técnicas se ha reducido el 59.42% mientras que en pérdidas técnicas tan solo el 21.59%, esto indica que los sistemas de distribución siguen siendo deficientes y que ha sido complicado contrarrestar esta tendencia.

Este proyecto de investigación pretende buscar el mecanismo más adecuado para conseguir cambiar una tendencia que en años no se ha logrado, la misma que consiste en la ubicación y dimensionamiento óptimo de bancos de capacitores en las redes de distribución de energía eléctrica, de tal forma se consiga una importante reducción de las pérdidas de potencia, es decir, ser eficientes y responsables en el manejo de la energía.

Los métodos de optimización que se emplean en (Sirjani and Hassanpour, 2012) y (Lohia et al., 2016), ACO y GA, muestran que son algoritmos adecuados para la reducción de pérdidas de potencia mediante la utilización de los bancos de capacitores. Dichas referencias realizan pruebas en las redes distribución radial de la IEEE de 69 y 33 barras respectivamente, y especifican que la reducción de pérdidas de potencia y costos son significativos.

1.2 Objetivos

En esta sección se describirán las preguntas de investigación y objetivos que se desean responder y cumplir para alcanzar la meta de la reducción de pérdidas en un SED.

Mediante el uso de softwares especializados para el análisis de sistemas de potencia, de los cuales, se utilizará el software DlgSILENT™ PowerFactory, se pretende aplicar dos métodos heurísticos de optimización, ACO y GA, con el enfoque de ubicación y dimensionamiento óptimo de Bancos de Capacitores en una Red de distribución radial, cuyo objetivo será la minimización de pérdidas y el mejoramiento del perfil de voltaje. Para iniciar el proyecto de investigación, se plantean las siguientes preguntas acordes a los objetivos:

1. ¿Qué alcance se tiene con el dimensionamiento, instalación y ubicación óptima de bancos de capacitores en una Red de Distribución?
2. ¿De qué manera se deben realizar y aplicar los métodos de optimización por colonia de hormigas y algoritmo genético para el dimensionamiento, instalación y ubicación óptima de bancos de capacitores para la minimización de pérdidas y mejoramiento del perfil del voltaje?
3. ¿Cómo se ve afectada la eficiencia de la red en términos de costos, al utilizar de forma eficaz los bancos de capacitores para solucionar los problemas de pérdidas de potencia activa y perturbaciones de voltaje?
4. ¿Cuál es la planificación prospectiva en el diseño de las redes de Distribución al aplicar los dos métodos heurísticos mencionados para minimizar las pérdidas utilizando los bancos de capacitores?

5. ¿Cuál de los métodos heurísticos para la optimización, ACO y GA, aporta con la mayor reducción de pérdidas de potencia activa en las redes de distribución estudiadas y por qué?

Una vez planteado las preguntas de investigación, se definen los siguientes objetivos que permitirán para concluir el proyecto de investigación, dichos objetivos que se relacionan con las preguntas planteadas anteriormente.

1. Plantear los códigos de programación en el software PowerFactory utilizando los algoritmos heurísticos.
2. Aplicar los códigos de programación de los algoritmos heurísticos en el enfoque: Ubicación y Dimensionamiento óptimo de bancos de capacitores.
3. Comprobar la minimización de pérdidas de potencia activa en las redes de distribución radial de la IEEE 33 barras, IEEE 69 barras y el alimentador Piñal de Cnel Guayas los Ríos mediante la aplicación de los métodos heurísticos propuestos, ACO y GA.

Definido los objetivos que se desea cumplir en el presente proyecto de investigación, a continuación, se describen los logros a obtener por cada uno de los capítulos que se irán desarrollando a lo largo del trabajo de investigación.

Capítulo 2: se llevará a cabo la revisión de literatura en base a los temas y a la teoría necesaria para el desarrollo del proyecto de investigación, que posteriormente, ayudarán a resolver el problema planteado y analizar los resultados obtenidos en base a las metodologías a realizar.

Capítulo 3: se describirán las metodologías a utilizar que serán desarrolladas con el Software DIgSILENT PowerFactory, y el diseño del código de programación de los algoritmos heurísticos para la minimización de pérdidas de potencia en una Red de Distribución radial.

Capítulo 4: se mostrarán los resultados obtenidos al finalizar las simulaciones en el software utilizado en la metodología de ubicación y dimensionamiento óptimo de bancos de capacitores, estos se analizarán y compararán para poder responder las debidas preguntas de investigación que correspondan a los resultados, y así, realizar las debidas conclusiones.

Capítulo 5: Se llevarán a cabo las discusiones de los métodos heurísticos propuestos a utilizar para la minimización de pérdidas de potencia activa. No obstante, se hará una comparativa entre los resultados obtenidos y los resultados de otros autores para corroborar la mejor solución al problema planteado de forma que ayude a investigaciones e implementaciones futuras.

Capítulo 6: Se responderá a las preguntas y se dará solución a los objetivos planteados en esta sección. Se llegarán a las conclusiones con ayuda de los resultados que se arrojen, se reconocerán las limitantes que enfrentaremos en esta tesis, y finalmente se harán las recomendaciones para mejoras en trabajos futuros.

1.3 Contribuciones del proyecto

En esta sección del capítulo de introducción, es importante recalcar las contribuciones que se realizan en el área de potencia la utilización de la metodología propuesta ACO y GA para alcanzar niveles que garanticen sostenibilidad en los diferentes sistemas.

Los códigos de programación basados en los algoritmos heurísticos, en el presente proyecto de investigación, ofrecerán un soporte que podrá ser traducido en aplicaciones reales, como la introducción de bancos de capacitores en las diferentes zonas de los sistemas de distribución, sean estas industriales, residenciales o comerciales.

Así mismo, en aplicaciones computacionales, puede utilizarse para simulaciones en distintos softwares, de tal forma que se puedan realizar análisis preventivos y de planificación para prevenir problemas potenciales en los diseños de las redes de distribución radial.

De igual manera, se puede aplicar a cualquier Red de Distribución eléctrica que presente problemas de calidad de energía en términos de pérdidas de potencia y energía en sus alimentadores.

Capítulo 2. Revisión de Literatura

Capítulo 2. Revisión de Literatura

2.1	Introducción.....	15
2.2	Red de Distribución Radial	17
2.2.1	<i>Pérdidas de potencia activa en redes de distribución radial.....</i>	18
2.2.2	<i>Pérdida de estabilidad de voltaje en redes de distribución radial</i>	18
2.2.3	<i>Calidad del servicio eléctrico.....</i>	19
2.3	Reducción de pérdidas de potencia en una red de distribución	20
2.3.1	<i>Reducción de pérdidas usando los ULTC en transformadores y bancos de capacitores en un sistema de distribución.....</i>	21
2.3.2	<i>Reducción de pérdidas de potencia utilizando generación distribuida</i> 21	
2.4	Métodos Aplicados a la Optimización	22
2.4.1	<i>Métodos heurísticos.....</i>	23
2.4.2	<i>Métodos metaheurísticos.....</i>	24
2.5	Algoritmos de optimización.....	25
2.5.1	<i>Algoritmo Genético (GA).....</i>	25
2.5.2	<i>Optimización por Colonia de hormigas (ACO)</i>	26
2.6	Lenguaje DPL	27

2.1 Introducción

Para el presente capítulo se entrará en detalle con la revisión de la literatura a utilizar para tener una base teórica en el cual apoyarnos a lo largo del proyecto de investigación. En este capítulo se mencionarán los distintos puntos que conforman la revisión de literatura de la siguiente manera: en la sección 2.2 se habla de la red de distribución radial, sus características en el tema de pérdidas de potencia activa, sus contribuyentes y su formación, la estabilidad de voltaje en operación normal o emergente y la calidad de servicio que se les brinda a los consumidores, mencionando además las normativas ecuatorianas que se tienen para las consideraciones en el aspecto de calidad; en la Sección 2.3 se menciona los tipos de reducciones de pérdidas de potencia que se pueden realizar utilizando diferentes alternativas como la operación de los intercambiadores de TAP bajo carga, de aquí en adelante (ULTC), de transformadores, utilizando bancos de capacitores en los alimentadores y con el uso de generación distribuida de forma que se tenga una minimización de pérdidas de potencia activa y se mantenga el perfil de voltaje dentro de la banda permitida por la regulación; en la Sección 2.4 se hace referencia a los métodos heurísticos y metaheurísticos de búsqueda óptima que se pueden aplicar a nuestros casos de estudios; en la Sección 2.5 se exhiben los métodos de optimización escogidos y que se van a aplicar para el dimensionamiento, instalación y ubicación óptima de banco de capacitores; en la Sección 2.6 se hace una breve introducción del lenguaje DlgSILENT Programming Language (DPL), el cual es usado para realizar la programación del código que servirá para evaluar las redes de distribución a estudiar.

Un sistema eléctrico de potencia está conformado por diferentes secciones que permiten proveer de energía eléctrica a los clientes, ya sean grandes, medianos o pequeños consumidores. En la Figura 2.1 se pueden observar las secciones de generación, representada por una planta; sección de elevación de voltaje, representado por un transformador; sección de transmisión, representado por torres y líneas de transmisión; sección de reducción de voltaje, representado por un transformador y sección de distribución, representada por postes de media y baja tensión para que finalmente toda esa energía que se genera y transporta llegue a los centros de consumo.

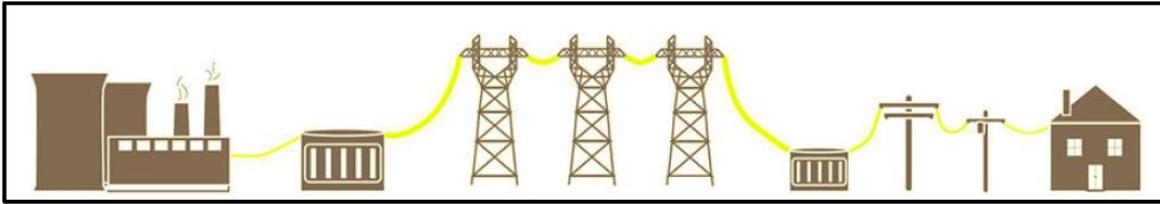


Figura 2.1: Generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, (ARCONEL, 2017).

En cada una de estas secciones se generan pérdidas de potencia, ya sea activa o reactiva, y en diferente magnitud, pero el sistema que contribuye con el mayor índice de pérdidas es el de distribución, tal como se observa en la Figura 2.2. En esta figura se muestra por medio de barras los diferentes tipos de pérdidas porcentuales con respecto a lo generado que tiene el sistema de transmisión como el de distribución.

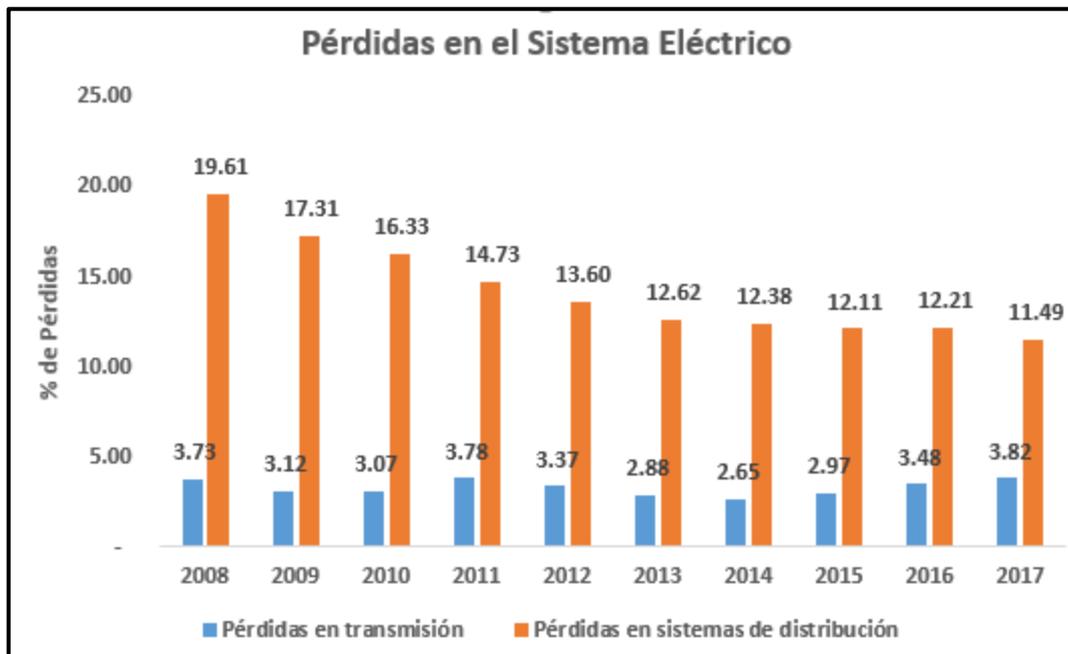


Figura 2.2: Porcentaje de pérdidas en el sistema eléctrico de transmisión y distribución, (ARCONEL, 2017).

En la Figura 2.2 se puede observar el porcentaje de pérdidas de potencia histórico desde el año 2008 hasta el 2017, en todos los años se observa que el porcentaje de pérdidas de potencia siempre ha sido mayor en el lado de distribución. Para el año 2017 se tiene que el mayor contribuyente recae en los sistemas de distribución con el 11.49% en contraste con el sistema de transmisión que tan solo se ve representado por el 3.82%.

Es de suma importancia establecer un mecanismo por el cual se puedan reducir esos índices de pérdidas de potencia, ya que la reducción de pérdidas se traduce

a su vez en una mayor disponibilidad de capacidad instalada (Vásquez Granda, 2013). El tener mayor disponibilidad implica tener menores gastos en la operación pues se obtiene una mayor utilización de energía primaria y una eventual disminución de inversiones en el sector, lo que conlleva a un mismo beneficio social y económico.

2.2 Red de Distribución Radial

En esta sección se enfoca el tema de las principales afectaciones por las que atraviesa una red de distribución radial, sin antes mencionar las características de un sistema de distribución y sus objetivos. Es importante tener en cuenta lo que se trata a continuación pues todo lo que respecta a pérdidas de potencia activa y desestabilización de voltaje guarda una estrecha relación, pues son variables que dependen una de la otra.

Un sistema eléctrico de potencia incluye las etapas de generación, transmisión, distribución y utilización de la energía eléctrica, y su función primordial es la de llevar esta energía desde los centros de generación hasta los centros de consumo y por último entregarla al usuario en forma segura y con los niveles de calidad exigidos. Aproximadamente las 2/3 partes de la inversión total del sistema de potencia están dedicados a la parte de distribución (Gigante Invisible) (Suárez, 2016), lo que implica necesariamente un trabajo cuidadoso en el planeamiento, diseño y construcción del sistema de distribución. Nótese que en esta parte del sistema de potencia es donde se presentan las mayores pérdidas de potencia, por la cantidad de quipos por lo que está compuesto y los bajos niveles de voltaje que se manejan.

Las pérdidas de energía eléctrica no pueden ser disminuidas por completo ya que en el proceso que lleva la energía desde las plantas generadoras hasta el cliente final, hay pérdidas por el calentamiento de conductores y otras en los núcleos ferromagnéticos, que pueden ser disminuidos, pero no eliminados. En el país los índices de pérdidas deben tener la meta de bajar para poder relacionarse con países industrializados, en los cuales sus índices de pérdidas totales son menores al 3%, con pérdidas no técnicas cercanas a cero (0%) (Apaza, 2017). Los ejecutivos e ingenieros de las empresas distribuidoras del país deben sentir la

preocupación que esto implica, para de esta manera llevar a cabo estudios y proyectos sobre el tema.

2.2.1 Pérdidas de potencia activa en redes de distribución radial

Las pérdidas de energía y potencia siempre han sido un problema que todas las empresas eléctricas han tenido (Apaza, 2017), las estadísticas de pérdidas eléctricas muestran un problema de suma importancia; los porcentajes de pérdidas son muy elevados, lo que implica un despilfarro de recursos incompatibles con la eficiencia requerida por la colectividad.

Las pérdidas de energía en las empresas distribuidoras se refieren a dos situaciones: a los fenómenos de disipación que suceden en los componentes físicos del sistema, y debido a la existencia de la información en los procesos de recaudo de la venta de energía, (Apaza, 2017). Debido a estas dos causas las pérdidas de energía eléctrica se han clasificado en dos: Pérdidas técnicas o físicas y pérdidas no técnicas o comerciales.

Realmente las pérdidas en los sistemas de distribución son la suma de las ineficiencias, que a lo largo de un periodo de tiempo se produjo y reflejan los errores en la aplicación de criterios desde sus bases de conceptualización y diseño, hasta su sistema operativo, la falta en el control de ingeniería permite que el avance de un sistema produzca más pérdidas de energía, debido a la falta de procedimientos y herramientas para el tratamiento de pérdidas (Apaza, 2017). Los índices de pérdidas miden el nivel de progreso de una empresa distribuidora y por consecuencia, el progreso de una comunidad.

2.2.2 Pérdida de estabilidad de voltaje en redes de distribución radial

Las pérdidas eléctricas causan variaciones de voltaje entre los nodos emisores y receptores, las cuales van aumentando a medida que se aleja de la fuente de generación y pueden llegar a ocasionar problemas de estabilidad (Pérez, 2016). Para reducir este efecto, son instalados equipos de compensación que pueden ser de naturaleza dinámica o estática, los cuales inyectan potencia reactiva al sistema y mejoran los perfiles de voltaje. No obstante realizar una correcta coordinación

entre todos estos elementos no resulta fácil y su dificultad aumenta en sistema eléctricos de gran magnitud debido al número de variables que se deben procesar.

Otro factor que está relacionado con este fenómeno es el comportamiento dinámico de la demanda del sistema, la cual tiende a ser periódica día tras día (Pérez, 2016). En países subdesarrollados con un alto porcentaje de demanda residencial se presentan picos de consumo muy altos generando cambios abruptos entre periodos de bajo consumo en comparación con periodos de consumo muy alto. Estas variaciones hacen que el voltaje sea difícil de controlar ya que en unos periodos por las líneas se encuentran atravesando altas corrientes y en otros se pasa a bajas corrientes, cambiando el comportamiento inductivo y capacitivo de estos elementos.

Para mantener una adecuada estabilidad de voltaje es necesario coordinar el comportamiento de los equipos que tienen la capacidad de compensar reactivos de forma que se pueda controlar las alteraciones que sufre en el tiempo. Un voltaje que supera el rango superior puede causar deterioro a los aislamientos de los equipos eléctricos de manera inmediatamente o afectar su vida útil, en cambio los bajos voltajes son peligrosos para la estabilidad del sistema, además que se aumentan las pérdidas debido a que es necesaria compensar con más corriente para mantener una misma potencia (Vanishree and Ramesh, 2014). El control de voltaje consiste en mantener el perfil de voltaje en todos los nodos del sistema dentro de los rangos establecidos, en condiciones de estado estable y bajo condiciones de perturbación.

2.2.3 Calidad del servicio eléctrico

La calidad de energía eléctrica incluye la calidad del suministro y la calidad de la atención al cliente. La calidad del suministro está caracterizada por cinco parámetros básicos: frecuencia, magnitud, forma de onda, desbalance y continuidad (Flóres and José, 2007). El parámetro que se nota en mayor escala en la afectación de la calidad del servicio eléctrico es la continuidad, pues es el recurrente en la mayor parte del manejo de la red de distribución debido a que determinar la localización exacta donde se genera una falla que se puede convertir en un problema muy complejo. La complejidad es debida principalmente a la

presencia de conductores no homogéneos, cargas intermedias, derivaciones laterales y desbalances en el sistema y la carga. Además, normalmente, en estos sistemas sólo se cuenta con medidas en la subestación y un modelo simplificado del circuito.

Aunque la continuidad es un aspecto fundamental en la calidad del servicio, cada vez toman más importancia las demás características de la onda de tensión debido a la presencia de perturbaciones transitorias o momentáneas (Ramírez and Cano, 2006). Disturbios e interrupciones siempre han existido en los sistemas de potencia, solo que hoy en día estas condiciones se ven agravadas por el hecho de la revolución de la electrónica que exhiben características altamente no lineales que ha incrementado considerablemente el deterioro de la tensión en la red.

Una buena calidad de potencia no es fácil de obtener ni definir, puesto que su medida depende de las necesidades del equipo que está alimentando (Ramírez and Cano, 2006). Los proyectos de energía con miras al siglo veintiuno deben ser concebidos bajo el ambiente de calidad de potencia, es por ello que la presentación de un proyecto debe realizarse con base en los lineamientos dados por las normas internacionales.

2.3 Reducción de pérdidas de potencia en una red de distribución

En esta sección se describirán los principales métodos o técnicas empleadas para la reducción de potencia activa y estabilización del voltaje dentro un margen de error establecido por la regulación ecuatoriana.

Los sistemas de distribución son normalmente operados como redes radiales (Zhang et al., 2007), sin embargo, durante la operación se modifica la configuración de los elementos que forman parte de la red con la finalidad de compensar anomalías dentro del sistema y evitar una pérdida de carga no deseada.

La característica radial de los sistemas de distribución también permite tener una coordinación efectiva de su sistema de protección. La condición operativa óptima del sistema de distribución se obtiene cuando el índice de equilibrio de carga se minimiza sin ninguna violación de los límites de carga y voltaje en la rama. Las

líneas de distribución o las secciones de línea muestran características diferentes, ya que cada una tiene una mezcla diferente de cargas de tipo residencial, comercial e industrial y sus horas picos no son coincidentes. Esto se debe al hecho de que algunas partes del sistema de distribución se cargan fuertemente en ciertos momentos del día y en otros momentos no (Prasad et al., 2007). En ese sentido, al cambiar las cargas en el sistema, la estructura radial del sistema de distribución puede modificarse de vez en cuando para reprogramar las cargas de manera más eficiente para minimizar el índice de equilibrio de carga.

2.3.1 Reducción de pérdidas usando los ULTC en transformadores y bancos de capacitores en un sistema de distribución

El objetivo principal de este método es resolver el problema de control de Voltaje y Potencia reactiva en un sistema de distribución. La idea es realizar un despacho apropiado del ULTC cambiador de tap bajo carga del transformador principal y los bancos de capacitores que se encuentren instalados a lo largo del alimentador principal basado en un pronóstico de carga horario de cada sección del alimentador y voltaje primario en las barras, de forma que el total de pérdidas pueda ser minimizados, se mejore el perfil de voltaje y se limite el flujo de potencia reactiva por el transformador principal, (Liang and Cheng, 2001). Este despacho permite la interacción del transformador principal con la red, la interacción entre ambas partes consiste en la toma de decisión de aumentar o no un TAP para mejorar el voltaje de acuerdo a las mediciones que se toman.

Las restricciones que deben ser consideradas incluyen: número máximo de operaciones del Switch del cambiador de tap bajo carga y capacitor en un día y el límite de voltaje en los alimentadores.

2.3.2 Reducción de pérdidas de potencia utilizando generación distribuida

La generación distribuida (Distributed Generation, DG) consiste en la utilización de pequeños generadores con capacidades de 15 a 25000 kW para alimentar cargas que se encuentran localizadas cerca de los puntos de consumo (Duque et al., 2004). La utilización de la DG se ha convertido en una solución viable técnica y económicamente para el consumidor porque mejora la confiabilidad del

suministro. Dentro de los beneficios que ofrece el uso de DG en las redes de distribución tenemos:

- Reducción de pérdidas en las líneas de transmisión.
- Fuentes de bajo costo para atender demandas durante periodos de precio pico.
- Mejoras en la calidad de la energía eléctrica (forma de onda de voltaje, frecuencia, estabilidad de la tensión, suministro de potencia reactiva y corrección del factor de potencia).
- Fuentes de alta confiabilidad para sistemas o usuarios sensibles a los que no se pueden interrumpir el suministro de energía.
- Reducción de emisiones atmosféricas (tecnología renovable).

Los beneficios que se tienen al usar DG son muy amplios, de hecho, se esperaría que en un futuro tengamos en nuestras redes un sin número de DG que permitan aliviar carga al sistema nacional interconectado (SNI) y podamos mejorar en el aspecto al compromiso de la utilización de generación limpia y libre de contaminación, sin embargo, en redes de distribución débiles la cantidad de DG usualmente es limitada debido al efecto de la caída de voltaje. Dicho efecto puede ser mitigado usando métodos pasivos como el incremento del tamaño del conductor; sin embargo, eso resulta bastante caro.

Otro método que puede ser usado para reducir el efecto de la caída de tensión en la red es la implementación de un control activo de voltaje (Kulmala et al., 2010). Dicho control puede incrementar la capacidad de conexión de una generación distribuida y puede mejorar significativamente los costos de conexión.

2.4 Métodos Aplicados a la Optimización

Esta parte de la revisión de la literatura describe los métodos de optimización que se van a emplear en el desarrollo de la búsqueda de la mejor solución para la ubicación y dimensionamiento óptimo de bancos de capacitores, en cuyo caso se pretende encontrar la mejor solución (el menor valor) de la función objetivo. El foco de aquello es reducir las pérdidas de energía eléctrica, mejorar el perfil de voltaje, aliviar la capacidad del sistema de distribución y aumentar su confiabilidad.

Estos tipos de problemas se los resuelve teniendo como objetivo encontrar la mejor solución para la combinación de bancos de capacitores a ser instalados de acuerdo a las necesidades y prestaciones que tenga el sistema de distribución, adicionalmente se precisa el dimensionamiento que cada banco de capacitor debe tener para alcanzar la mejor respuesta de la red, es decir reducir el mayor porcentaje de pérdidas y mejorar la calidad del servicio entregado. Dichas combinaciones serán realizadas empleando métodos heurísticos y metaheurísticos, los cuales son capaces de proporcionar soluciones satisfactorias en un tiempo de cálculo razonable.

2.4.1 Métodos heurísticos

Las dificultades a las que se enfrentan los métodos de optimización convencionales y exactos a menudo terminan impidiendo que estos determinen una solución al problema de optimización en un tiempo razonable (Gavrilas, 2010). Para evitar tales casos, se han propuesto métodos alternativos, que son capaces de determinar aproximaciones no perfectamente precisas, pero de buena calidad, a soluciones exactas, que tienen un real acercamiento a valores óptimos.

Estos métodos, llamados heurísticos, se basaban inicialmente en el conocimiento y la experiencia de los expertos y tenían como objetivo explorar el espacio de búsqueda de una manera particularmente. Básicamente, una heurística está diseñada para proporcionar un mejor rendimiento computacional en comparación con las técnicas de optimización convencionales, a costa de una menor precisión (Gavrilas, 2010). Sin embargo, las reglas generales que subyacen a una heurística suelen ser muy específicas del problema en cuestión. Además, dado que las heurísticas son técnicas de resolución de problemas basadas en la experiencia de los solucionadores, utilizan representaciones específicas del dominio y, por lo tanto, las heurísticas generales se pueden definir con éxito solo para los métodos fundamentales de resolución de problemas.

Las estrategias de búsqueda no informadas o ciegas se aplican sin información sobre el espacio de búsqueda, aparte de la capacidad de distinguir entre un estado intermedio y un estado objetivo. Las estrategias de búsqueda informadas utilizan el conocimiento específico del problema (Gavrilas, 2010). Por lo general, este

conocimiento se representa mediante una función de evaluación que evalúa la calidad de cada estado en el espacio de búsqueda o el costo de pasar del estado actual a un estado objetivo, utilizando varios caminos posibles. Una de las deficiencias de las estrategias de búsqueda es la ineficiencia numérica del proceso de búsqueda, especialmente para los problemas de alta dimensión. Por lo tanto, se dedicaron esfuerzos significativos para identificar nuevas heurísticas capaces de hacer frente con éxito a los problemas anteriores.

2.4.2 Métodos metaheurísticos

Los nuevos paradigmas se denominaron metaheurísticas y se introdujeron por primera vez a mediados de los años 80 como una familia de algoritmos de búsqueda capaces de abordar y resolver problemas complejos de optimización, utilizando un conjunto de varias heurísticas generales. El término metaheurístico se propuso en (Ramírez and Cano, 2006) para definir una heurística de alto nivel utilizada para guiar otras heurísticas para una mejor evolución en el espacio de búsqueda.

Aunque los métodos de búsqueda estocásticos tradicionales se guían principalmente por azar (las soluciones cambian aleatoriamente de un paso a otro), se pueden utilizar en combinación con algoritmos metaheurísticos para guiar el proceso de búsqueda y acelerar la convergencia (Gavrilas, 2010). La mayoría de los algoritmos metaheurísticos son solo algoritmos de aproximación, porque no siempre pueden encontrar la solución óptima global.

La característica más atractiva de una metaheurística es que su aplicación no requiere un conocimiento especial sobre el problema de optimización que debe resolverse, por lo que puede usarse para definir el concepto de modelo general de resolución de problemas para problemas de optimización (Gavrilas, 2010). Desde su introducción a mediados de los 80 hasta ahora, los métodos metaheurísticos para resolver problemas de optimización se han desarrollado continuamente, lo que permite abordar y resolver un número creciente de problemas de este tipo, que antes se consideraban difíciles o incluso imposibles de resolver. Estos métodos incluyen recocido simulado, búsqueda tabú, técnicas de computación evolutiva, sistemas inmunes artificiales, algoritmos genéticos, optimización de

enjambre de partículas, algoritmo de colonias de hormigas, evolución diferencial, búsqueda de armonía, optimización de colonias de abejas melíferas, etc.

2.5 Algoritmos de optimización

En el siguiente ítem se describe de forma general los algoritmos de optimización que se han contemplado utilizar para formular las funciones objetivos que permitan reducir las pérdidas de potencia activa, mejorar el perfil de voltaje y aumentar la calidad energética de las redes de distribución.

Los algoritmos que ayudaran a encontrar lo antes mencionado mostraran sus características principales, así como su modo de funcionamiento y operación. Dichas características que se resumen en una tabla donde se describen por medio de pseudocódigos los pasos que se deben seguir para la elaboración de los algoritmos de optimización.

2.5.1 Algoritmo Genético (GA)

Los AG son estrategias de búsqueda que se basan en mecanismos específicos de la genética y la selección natural, utilizando tres operadores básicos: selección, cruce y mutación. Para cada generación, la selección se utiliza para elegir a los padres individuales, según su función física. Después de seleccionar un par de cromosomas parentales, ingresan a la etapa de cruce para generar dos descendientes. El cruce es útil para crear nuevos individuos o soluciones que heredan buenas características de ambos padres. Los individuos de nueva creación serán alterados por cambios a pequeña escala en los genes, aplicando el operador de mutación. Las mutaciones aseguran la introducción de la "novedad" en el material genético. Después de completar la población de descendientes, esto reemplazará a los padres de la generación anterior y el proceso de selección-mutación-mutación se reanudará para una próxima generación. El pseudocódigo para el GA se muestra en la Tabla 2.1 (Gavrilas, 2010).

Datos: tamaño de la población N , tasa de cruce η_c y tasa de mutación η_m
Inicialización: crear población inicial $P=\{P_i\}$, $i=1\dots N$, e inicializar la mejor solución Best (vacío)
WHILE {no se cumpla el criterio de parada}

	Evaluar P y actualizar la mejor solución Best
	Inicializar población de descendientes: R (vacío)
	Crear descendientes:
	FOR k = 1 a N / 2 DO
	Etapa de selección: seleccione los padres Q₁ y Q₂ de P , según los valores de condición física.
	Etapa de cruce: use la tasa de cruce η_c y los padres (Q₁ ; Q₂) para crear descendientes (S₁ ; S₂).
	Etapa de mutación: use la tasa de mutación η_m para aplicar cambios estocásticos a S₁ y S₂ y cree descendientes mutados T₁ y T₂ .
	Agregar T₁ y T₂ a la población de descendientes.
	$R \leftarrow R \cup \{T_1, T_2\}$.
	Reemplazar la población actual P con la población de descendientes
	$\begin{array}{ccc} & \longleftarrow & \\ R: P & & R \end{array}$
	Elitismo: reemplace la solución más pobre en P con la mejor solución almacenada en Best .

Tabla 2.1: Pseudocódigo de la Optimización por Algoritmo Genético (Gavrilas, 2010).

2.5.2 Optimización por Colonia de hormigas (ACO)

El algoritmo clásico de optimización de colonias de hormigas (ACO), está inspirado en el comportamiento natural de las hormigas, que pueden encontrar su camino utilizando rastros de feromonas. Las hormigas viajan entre dos puntos fijos A y B en la ruta más corta, dejando atrás un rastro de feromonas que marcan los caminos elegidos. Después de que la primera hormiga alcanza el punto B, regresa en A siguiendo su propio camino de feromonas y duplicando la densidad de la capa de feromonas. Además, más hormigas probabilísticamente preferirán elegir un camino con mayor densidad de feromonas, y gradualmente un número creciente de hormigas seguirá el mismo camino. Para cada hormiga, se puede definir una lista tabú para memorizar su ruta. Las hormigas se mueven entre los componentes C_i y C_j con probabilidad P_{ij} , definida en función de la densidad de la feromona entre los componentes, la visibilidad entre los dos componentes y los dos factores de ponderación. Una vez que cada hormiga completa su ruta, la densidad de las feromonas para cada componente se actualiza según las

funciones de aptitud. El pseudocódigo de ACO se presenta en la Tabla 2.2 (Gavrilas, 2010).

Datos: tamaño de la población N , conjunto de componentes C = {C ₁ , ..., C _n } tasa de evaporación evap .	
Inicialización: conjunto de feromonas para cada componente PH = {PH ₁ , ..., PH _n }; mejor solución Best .	
WHILE {no se cumpla el criterio de parada}	
	Inicializar la población actual, P = vacío
	Crear la población actual de soluciones virtuales P :
	FOR i = 1 a N DO
	Crear una posible solución S .
	Actualizar la mejor solución, Best (vacío)
	Añadir solución S a P : P ← P U S
	Aplicar evaporización
	FOR j = 1 a n DO
	$PH_j = PH_j * (1 - \text{evap})$
	Actualizar feromonas para cada componente:
	FOR i = 1 a N DO
	FOR j = 1 a n DO
	Si el componente C _i es parte de la solución P _j , entonces actualice las feromonas para este componente: $PH_j = PH_j + \text{Fitness}(P_j)$

Tabla 2.2: Pseudocódigo para la Optimización por Colonia de Hormigas(Gavrilas, 2010).

2.6 Lenguaje DPL

El lenguaje de programación DPL sirve para ofrecer una interfaz para automatizar tareas en el Power Factory. El método DPL se diferencia del método de comando por lotes en varias formas.

- DPL ofrece comandos de flujo y decisión de programa.
- DPL ofrece la definición y el uso de variables definidas por usuario.
- DPL tiene una interfaz flexible para datos de entrada y objetos externos
- DPL ofrece expresiones matemáticas

El DPL agrega una nueva dimensión al programa PowerFactory de DIgSILENT al permitir la creación de nuevas funciones de cálculo. Dichos comandos de cálculo definidos por el usuario se pueden usar en todas las áreas de análisis del sistema de energía, tales como:

- Optimización de la red
- Análisis de estabilidad
- Coordinación de protecciones
- Análisis de contingencia
- Dimensionamiento del conductor
- Análisis de contingencia

Estas nuevas funciones de cálculo se escriben como scripts de programa que comprenden:

- Comandos de flujo como 'if – thene – else' y do-while'
- DigSilent commands (comando de flujo de carga o cortocircuito)
- Rutinas de entrada y salida
- Expresiones matemáticas
- Llamadas de procedimiento de objeto (Factory)
- Llamadas de subrutina

Capítulo 3. Metodología

Capítulo 3. Metodología

3.1	Introducción.....	31
3.2	Descripción de los sistemas simulados en PowerFactory.....	32
3.2.1	<i>Sistema de 33 barras.....</i>	<i>33</i>
3.2.2	<i>Sistema de 69 barras.....</i>	<i>34</i>
3.2.3	<i>Sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos.....</i>	<i>37</i>
3.3	Inicialización de variables del sistema.....	38
3.3.1	<i>Codificación de las variables mediante el lenguaje DPL.....</i>	<i>41</i>
3.4	Planteamiento inicial para la minimización de pérdidas de potencia.....	44
3.4.1	<i>Formulación de la Ubicación y despacho Óptimo de Bancos de Capacitores.....</i>	<i>44</i>
3.4.2	<i>Evaluación de la función objetivo y restricciones.....</i>	<i>47</i>
3.5	Planteamiento del Algoritmo ACO (Ant Colony Optimization).....	48
3.5.1	<i>Inicialización de parámetros.....</i>	<i>48</i>
3.5.2	<i>Construcción de soluciones mediante la probabilidad de selección.....</i>	<i>50</i>
3.5.3	<i>Regla de selección del objetivo.....</i>	<i>51</i>
3.5.4	<i>Actualización de feromonas.....</i>	<i>52</i>
3.6	Planteamiento del Algoritmo Genético.....	54
3.6.1	<i>Codificación de las variables de optimización de la red e inicialización de la población inicial.....</i>	<i>54</i>
3.6.2	<i>Estrategia de selección para la población inicial.....</i>	<i>55</i>
3.6.3	<i>Codificación de la población inicial.....</i>	<i>58</i>
3.6.4	<i>Evaluación de la primera generación y Selección natural.....</i>	<i>60</i>
3.6.5	<i>Cruce de individuos para la siguiente generación.....</i>	<i>60</i>
3.6.6	<i>Mutación del cromosoma.....</i>	<i>61</i>

3.1 Introducción

En este capítulo se presentará el procedimiento abarcado en detalle sobre todo lo correspondiente a los métodos heurísticos a utilizar (Algoritmo Genético y Optimización por Colonia de Hormigas) para la elaboración de los códigos de programación mediante el lenguaje DPL en DIgSILENT PowerFactory, de forma que se cumpla con el objetivo planteado que consiste en minimizar las pérdidas de potencia activa y a su vez mejorar el perfil del voltaje de una red de Distribución de energía eléctrica, cuyas características son radiales. Todo el procedimiento se lo realiza a partir de la búsqueda de una correcta ubicación y dimensionamiento óptimo de bancos de capacitores que serán los responsables principales del cumplimiento del objetivo antes mencionado. Para el desarrollo de este trabajo se utilizarán como caso de estudio las redes prototipo de la IEEE de 33 barras, IEEE 69 barras y Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos, las cuales serán elaboradas y simuladas en DIgSILENT PowerFactory.

Se describe, además, las características de los sistemas a utilizar de la IEEE de 33 barras, IEEE 69 barras y Alimentador Piñal – CNEL Guayas los Ríos, como datos de cargas, datos de líneas, datos de barra, entre otros. La ubicación preliminar de los bancos de capacitores y la inicialización de los parámetros son un punto importante que se los considera al inicio de la elaboración de los códigos de programación.

Finalmente se hará el planteamiento del algoritmo general para su respectiva programación en código DPL, la evaluación de la función objetivo y sus restricciones, y así minimizar las pérdidas de potencia activa de cada red propuesta.

A continuación, en la Figura 3.1 se observa el diagrama de flujo que especifica la secuencia que tendrá la solución del problema, iniciando con sistemas de distribución un poco inestables en el sentido de altos porcentajes de pérdidas, y al final mediante el empleo de los algoritmos se tendrá una solución idónea que permita reducir ese porcentaje de pérdidas y proveer de energía al consumidor de una manera más confiable y segura.

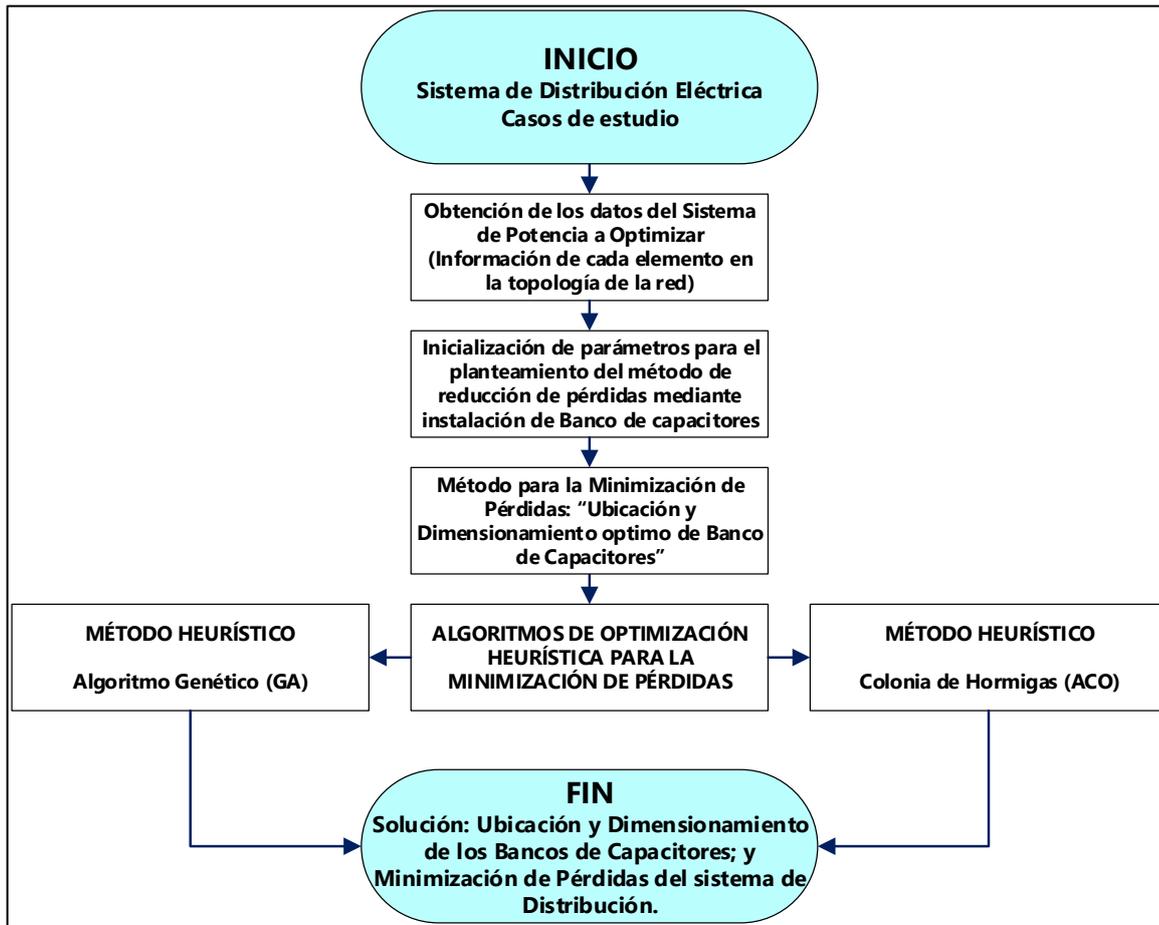


Figura 3.1: Diagrama de flujo del procedimiento para encontrar la solución al problema planteado.

3.2 Descripción de los sistemas simulados en PowerFactory

Los casos de estudio a utilizar son los sistemas de la IEEE de 33 barras, IEEE 69 barras y Alimentador Piñal – CNEL Guayas los Ríos, redes de un alimentador para sistemas de Distribución Radial, las redes de la IEEE son sistemas modelos para estudios puntuales y académicos, mientras que es caso del Alimentador Piñal es una de distribución real provista por la empresa de distribución CNEL Guayas los Ríos. Empezando por el sistema de la IEEE de 33 Barras, se tienen 32 líneas de Distribución, 32 cargas y una sola fuente de alimentación que se la denomina como Red Externa; para el otro sistema de la IEEE se tiene un total de 68 líneas de Distribución, 49 cargas y una sola fuente de alimentación como Red Externa, (Mithulananthan et al., 2016), para el caso del Alimentador Piñal, éste consta de 79 líneas de Distribución, 57 cargas y una sola fuente de alimentación que se la denomina como a la Red Externa.

Para la obtención del objetivo que consiste en la reducción de pérdidas de potencia mediante la ubicación y dimensionamiento óptimo de bancos de capacitores, se ubicaron dentro de la red, construida en DigSILENT PowerFactory, bancos de capacitores por cada barra a excepción de la Barra Slack, la cual fue asignada para la barra que se conecta a la Red Externa, por lo tanto, se ubicarán $N - 1$ Bancos de capacitores, donde N es el número de Barras del sistema. Esto se realizó con el fin de habilitar o deshabilitar los bancos de capacitores en tiempo real de simulación del código de programación, de tal forma que en cada iteración se evalúen pérdidas de potencia activa mediante el flujo de potencia, y se efectúen las diferentes combinaciones de bancos de capacitores en las barras evaluadas por los algoritmos heurísticos (AG y ACO).

3.2.1 Sistema de 33 barras

En la Figura 3.2 (Candelo-Becerra and Hernández-Riñao, 2015) se muestra el sistema de IEEE de 33 Barras de un solo alimentador para sistemas de Distribución Radial:

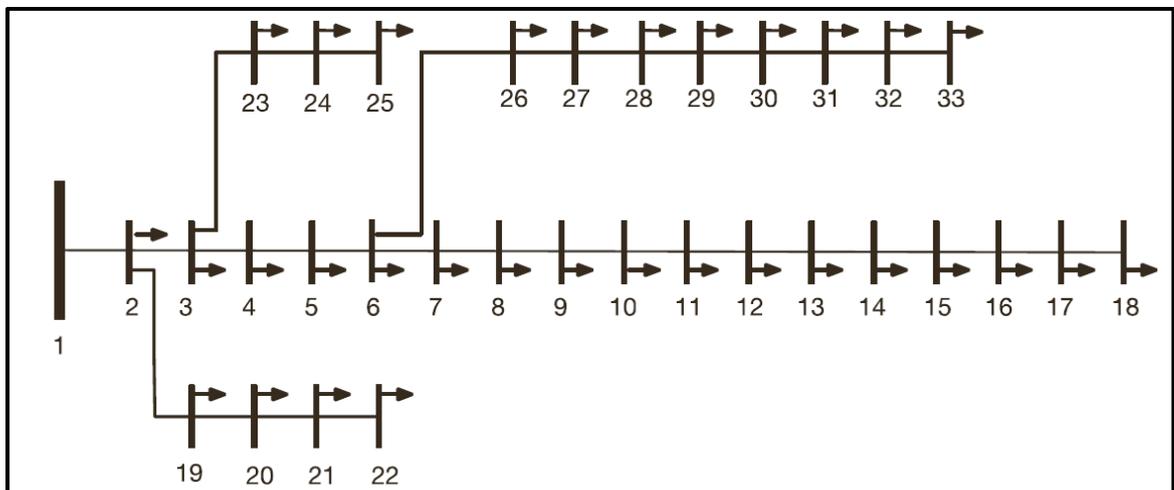


Figura 3.2: Red de distribución de la IEEE de 33 barras. Sistema de prueba 1 (Candelo-Becerra and Hernández-Riñao, 2015)

En la Figura 3.2 Se tiene el sistema de la IEEE de 33 Barras, la cual consta de 32 líneas de Distribución, 32 cargas y una sola fuente de alimentación que se la denomina como a la Red Externa. La misma que se encuentra conectada a un nivel de tensión de 12.66 kV, una carga pico de 3715 kW y 2300 kVAR, el total de pérdidas de potencia es de 211.2 kW (Mithulananthan et al., 2016).

En la Figura 3.3 se puede observar el sistema simulado en DigSILENT PowerFactory cuyas características consisten en el modelamiento de la red con los 32 Bancos de capacitores ubicados en todas las barras a excepción de la barra Slack, la cual mantiene su voltaje constante en magnitud y ángulo.

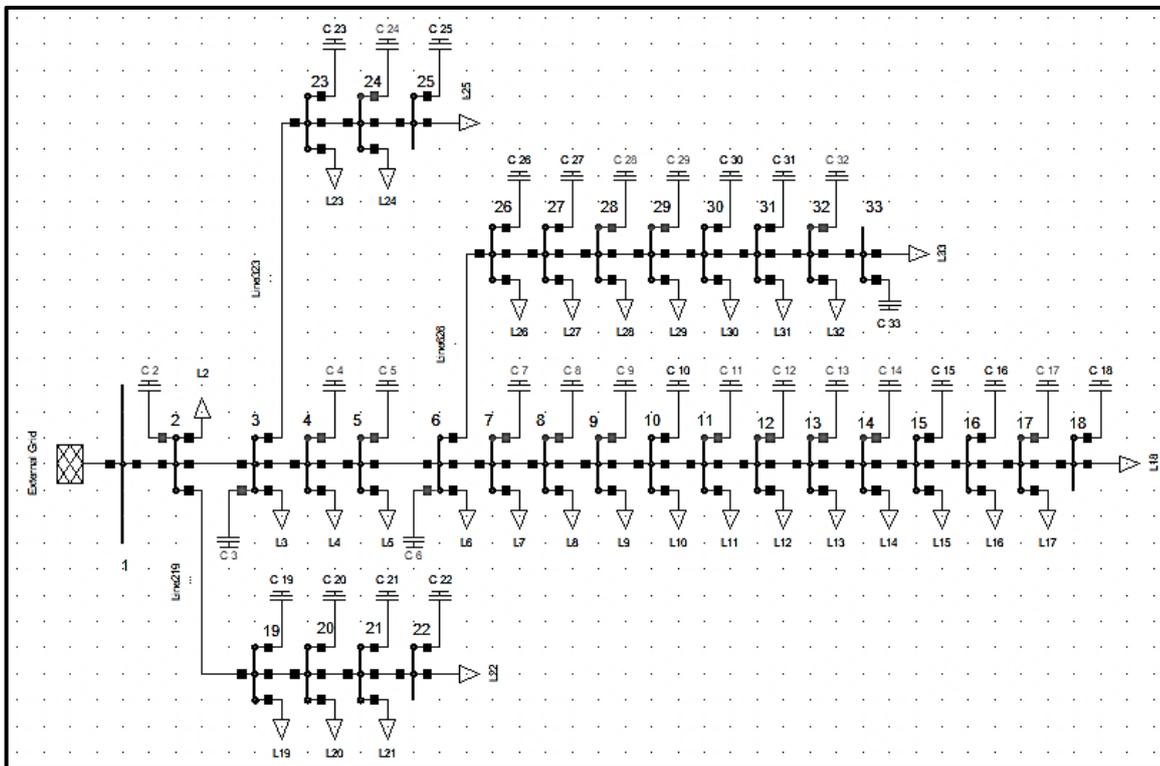


Figura 3.3: Sistema de la IEEE de 33 barras modelada en DigSILENT PowerFactory con los Bancos de Capacitores ubicados

Cada Banco de capacitor que se encuentra instalado en la red de distribución de la IEEE de 33 nodos (Figura 3.3) es trifásico balanceado, con una potencia reactiva que el algoritmo dimensionará de acuerdo a la mejor solución.

El sistema de IEEE de 33 Barras de un alimentador para sistemas de Distribución Radial presenta cargas concentradas en las barras del sistema, tal como se muestra en el Apéndice B, sección B.1, página 123.

3.2.2 Sistema de 69 barras

En la Figura 3.4 (Candelo-Becerra and Hernández-Riñao, 2015) se muestra el sistema de IEEE de 69 Barras de un solo alimentador para sistemas de Distribución Radial:

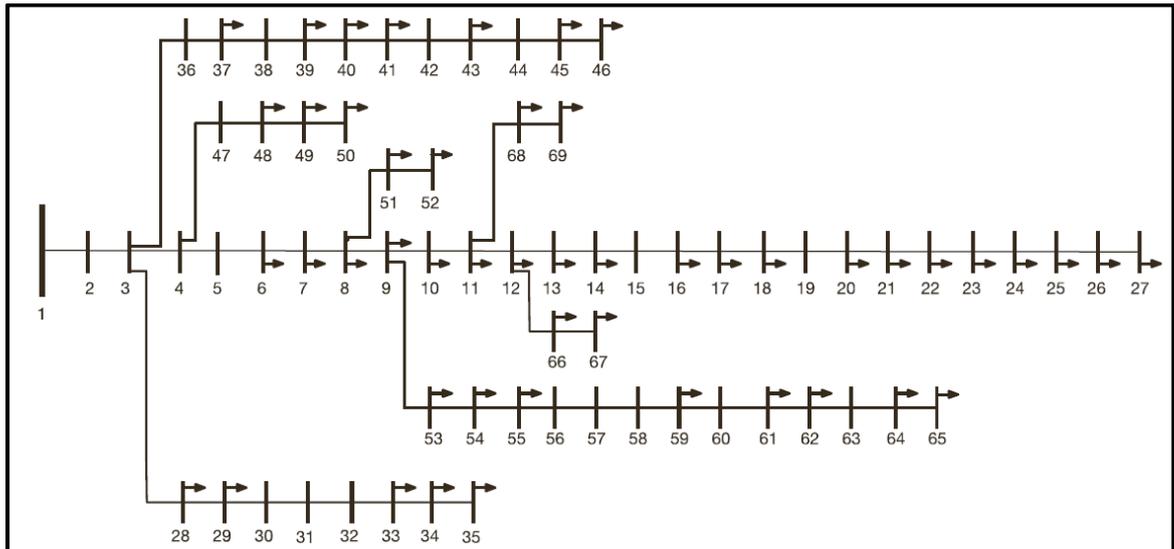


Figura 3.4: Red de distribución de la IEEE de 69 barras. Sistema de prueba 2 (Candelo-Becerra and Hernández-Riñao, 2015)

Se tiene el sistema de la IEEE de 69 Barras, la cual consta de 68 líneas de Distribución, 48 cargas y una sola fuente de alimentación que se la denomina como a la Red Externa. La misma que se encuentra conectada a un nivel de tensión de 12.66 kV, una carga pico de 3800 kW y 2690 kVAR, el total de pérdidas de potencia es de 227.53 kW (Mithulananthan et al., 2016).

En la Figura 3.5 se puede observar el sistema simulado en DIgSILENT PowerFactory cuyas características consisten en el modelamiento de la red con los 68 Bancos de capacitores ubicados en todas las barras a excepción de la barra Slack, la cual mantiene su voltaje constante en magnitud y ángulo.

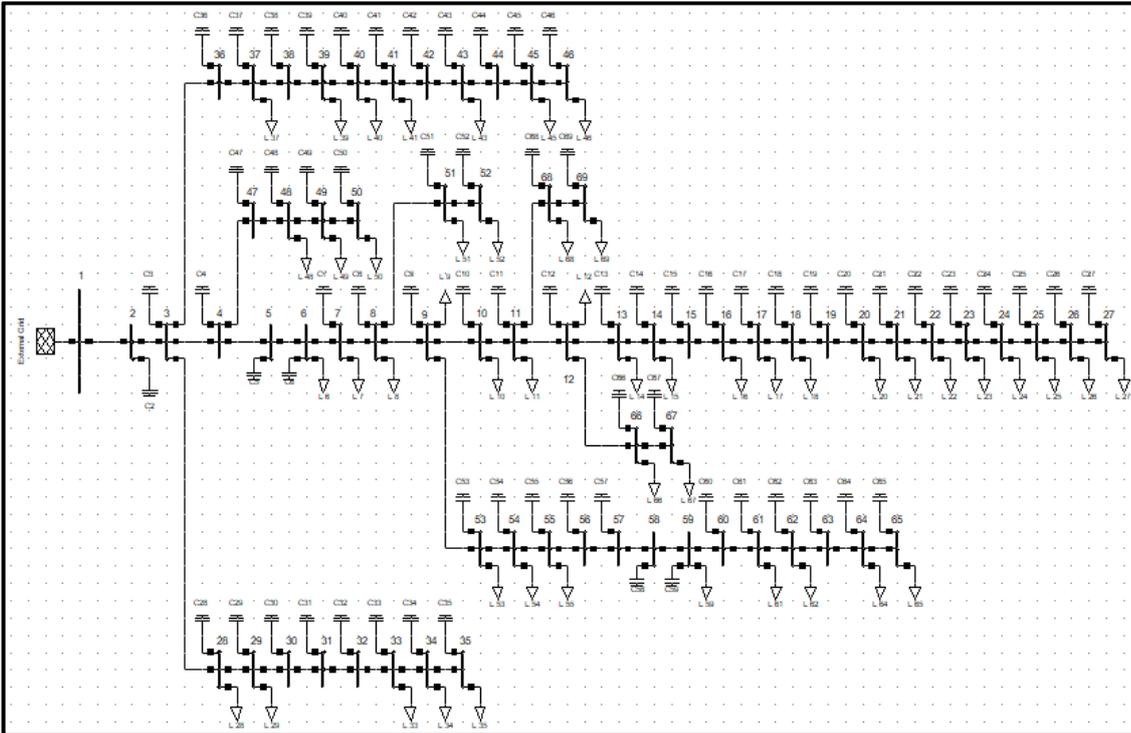


Figura 3.5: Sistema de la IEEE de 69 barras modelada en DigSILENT PowerFactory con los Bancos de Capacitores ubicados

El sistema de IEEE de 69 Barras de un alimentador para sistemas de Distribución Radial presenta las siguientes cargas concentradas (Trifásicas y balanceadas) en las siguientes barras del sistema, tal como se muestra en el Apéndice B, sección B.2, página 126.

3.2.3 Sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos

En la Figura 3.6 se muestra el sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos, que se encuentra plasmado en el programa CYME – CymDist:

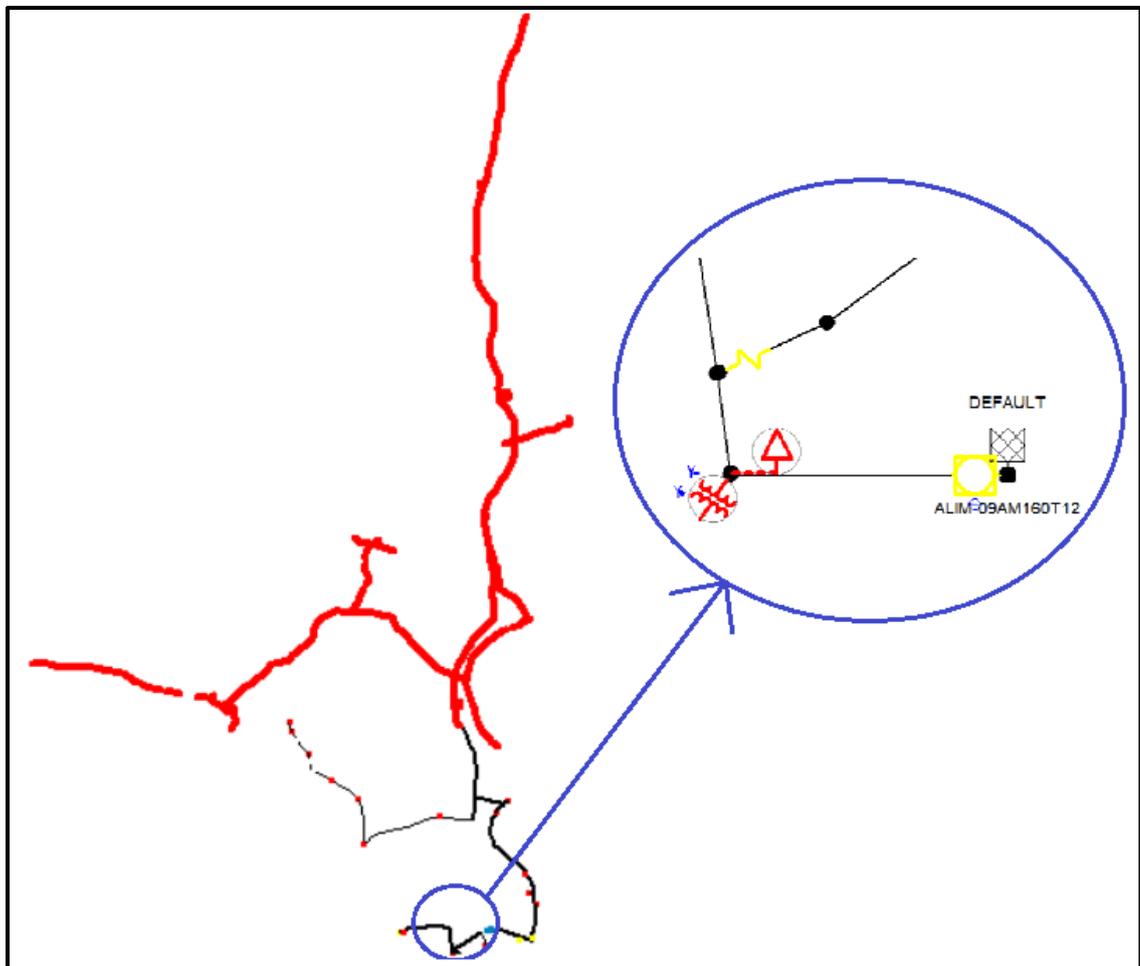


Figura 3.6: Red de distribución del Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos. Sistema de prueba 3

Se tiene el sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos, la cual consta de 79 líneas de Distribución, 57 cargas y una sola fuente de alimentación que se la denomina como a la Red Externa. La misma que se encuentra conectada a un nivel de tensión de 13.8 kV, el total de pérdidas de potencia es de 142.5086 kW.

En la Figura 3.7 se puede observar el sistema simulado en DigSILENT PowerFactory cuyas características consisten en el modelamiento de la red con los 79 Bancos de capacitores ubicados en todas las barras a excepción de la barra Slack, la cual mantiene su voltaje constante en magnitud y ángulo.

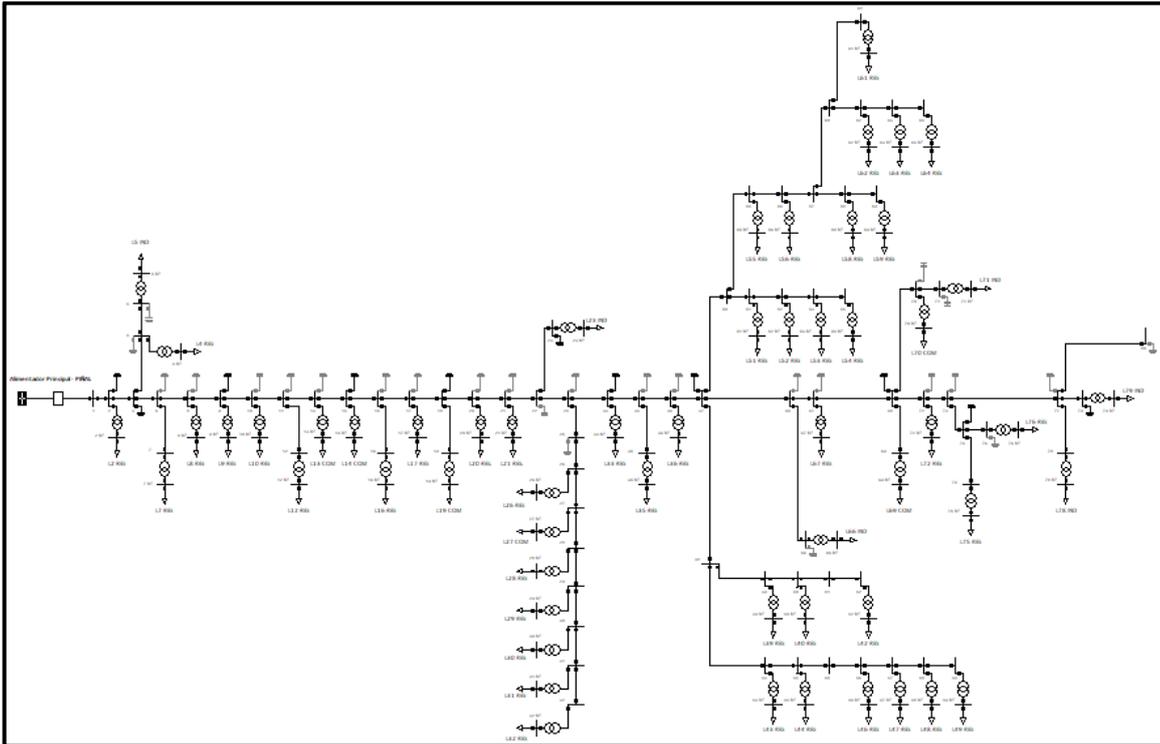


Figura 3.7: Sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos modelada en DigSILENT PowerFactory con los Bancos de Capacitores ubicados

El sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos presenta las siguientes cargas concentradas (Trifásicas y monofásicas) en las siguientes barras del sistema, tal como se muestra en el Apéndice B, sección B.3, página 129.

3.3 Inicialización de variables del sistema

Para el desarrollo de los métodos de optimización, es necesario definir todas las variables del sistema de tal forma que se puedan procesar en el algoritmo de programación que se implementa en el lenguaje DPL de DigSILENT.

A continuación, en la Figura 3.8 se definen las variables del sistema de potencia que se necesitan inicializar mediante la declaración de variables Objects en el algoritmo en DPL.

```
!Inicializacion de variables Objects:  
Barras=AllRelevant('* .ElmTerm');  
S_cargas=AllRelevant('* .ElmLod');  
C_banks=AllRelevant('* .ElmShnt');  
Lines=AllRelevant('* .ElmLne');  
Red=AllRelevant('* .ElmNet');
```

Figura 3.8 Asignación de variables a los objetos seleccionados del Sistema de Potencia en DPL.

Como se muestra en la declaración de las variables: Barras, S_cargas, C_banks, Lines y Red, se llaman todos los elementos relevantes que contienen dichas variables Objects, las cuales almacenan un conjunto completo de todas las variables que puede contener en el caso de las Barras, cargas, bancos de capacitores, las líneas de distribución y los datos generales de la Red, de los cuales el valor de pérdidas totales es de suma importancia para su obtención mediante el flujo de potencia a realizar por cada iteración a través de los algoritmos heurísticos. Todas las variables tipo objects nos proporcionan datos de los elementos que se encuentran en servicio dentro del sistema de potencia.

Una vez obtenido los elementos principales del sistema como variables Objects, se procede a obtener la información necesaria para el algoritmo, empezando por el número de barras que contiene el sistema de potencia de la siguiente manera en la Figura 3.9.

```
!Conteo del Numero de Barras:  
NBarras=Barras.Count();  
printf('N_Barras= %d',NBarras);
```

Figura 3.9 Obtención del número de Barras del sistema.

Mediante la variable de tipo entero, se realiza el conteo de objetos que contiene la variable Object “Barras”, y de esta manera se obtiene el número de barras que es fundamental para la inicialización y dimensionamiento de las matrices y vectores que son utilizados para procesar las variables del algoritmo.

Posterior a este paso, se procede a la inicialización de las matrices y vectores que se manejarán, tal como se muestra a continuación en la Figura 3.10:

sus variables de iteraciones y de soluciones, para esto, se utilizan las siguientes matrices y vectores:

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Inicializacion de Matrices y Vectores para las iteraciones del algoritmo:

!Vector de Funcion Fitness (Objetivo)
Fitness.Resize(Generations);

!Vector de los valores de solucion obtenidos por cada iteracion
Memory_Iter.Resize(Generations);

N_Step.Resize(NBarras-1);!Vector de pasos de cap para todos los Bancos de cap del sistema
N_Step.Init(NBarras-1);

!Resultantes de la solucion obtenida por cada iteracion:
Memory_Cap.Resize(NBarras-1,Generations);
Memory_Cap.Init(NBarras-1,Generations,1);!Inicializacion de la matriz con unos. (1 -> Off)

!Matriz de memoria de los pasos de cada Banco de cap por cada iteracion
Memory_Step.Resize(NBarras-1,Generations);
Memory_Step.Init(NBarras-1,Generations,0);

P_Acum.Resize(Population);!Vector de probabilidades acumuladas por cada solucion
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

Figura 3.11 Inicialización de vectores y matrices para el registro y manejo de los resultados de las iteraciones.

Los vectores `Fitness` y `Memory_Iter`, como se muestra en la Figura 3.11 tomada del código en DPL, son utilizados para registrar los valores de las soluciones de la función objetivo, tal como se detalla en los comentarios del código, mientras que la matriz `Memory_Cap` y `Memory_Step`, registran las soluciones del estado de los capacitores y los pasos de capacitancia por cada Banco de capacitores para cada iteración. Finalmente, los vectores `N_Step` registra los valores de pasos de capacitancia de la mejor solución de la ejecución final del algoritmo y `P_Acum` almacena las probabilidades acumuladas para su uso en el método de la ruleta rodante para la selección aleatoria basada en la mayor densidad de probabilidades situada en la ruleta rodante, método a utilizar en ambos algoritmos heurísticos.

3.3.1 Codificación de las variables mediante el lenguaje DPL

Para codificar las variables del sistema de potencia estudiado, es necesario enumerar tanto las cargas y bancos de capacitores, como las líneas y barras del sistema. Por lo tanto, se definieron e inicializaron las matrices que identificarán las barras a las que se conectan los distintos elementos del sistema.

elementos de la matriz, donde cada fila y columna representa las barras que se encuentran codificadas, el elemento con valor igual a “uno” indica que las filas i y j , las cuales representan las barras de manera codificada están conectadas.

3.4 Planteamiento inicial para la minimización de pérdidas de potencia

Para el desarrollo y la obtención de los resultados, se procede a la formación y planteamiento de la metodología de la optimización a partir de los algoritmos heurísticos mencionados. Por ende, se plantea y formula el método del ubicación y dimensionamiento óptimo de Bancos de capacitores en una red de distribución radial.

Los algoritmos heurísticos son planteados en base a la formulación del problema de optimización y de cómo se modelará en el software de PowerFactory, considerando las que se utilizarán, inicializarán y codificarán.

3.4.1 Formulación de la Ubicación y despacho Óptimo de Bancos de Capacitores

Para optimizar la red y minimizar las pérdidas mediante bancos de capacitores instalados en la red, es crucial conocer el comportamiento de los flujos de potencia y pérdidas de las líneas de la red. En la Figura 3.14 se muestra un esquema modelo de lo que comprende una red convencional radial.

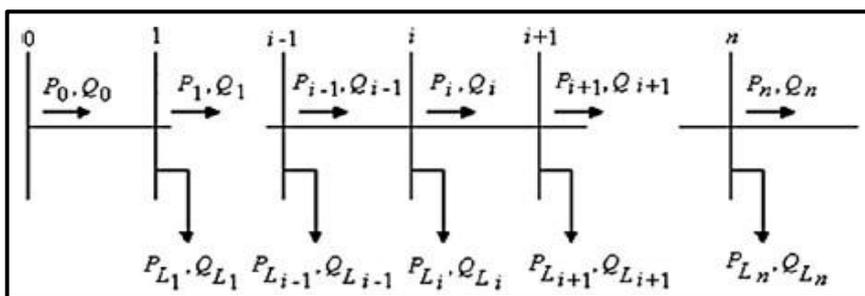


Figura 3.14 Diagrama unifilar de una Red de distribución radial convencional de un solo alimentador (Nikoukar and Gandomkar, 2005)

La expresión general de las pérdidas en una línea de transmisión de la red se expresa como:

$$P_{Loss}(i,j) = R_{ij} \left[\frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \right] \quad (3.1)$$

Donde:

- R_{ij} representa la resistencia de la línea $i - j$.
- P_i representa el flujo de potencia activa de la línea $i - j$.
- Q_i representa el flujo de potencia reactiva de la línea $i - j$.
- V_i representa el voltaje de la barra i que conecta la línea $i - j$.

Se tiene que las pérdidas totales manejan la siguiente expresión:

$$PTLoss(i, j) = \sum_{i=0}^{\#líneas} R_{ij} \left[\frac{P_i^2 + Q_i^2}{|V_i|^2} \right] = \sum_{i=0}^{\#líneas} PLoss(i, j) \quad (3.2)$$

Finalmente, la función objetivo es la siguiente:

$$Min: PTLoss(i, j) = \sum_{i=0}^{\#líneas} PLoss(i, j) \quad (3.3)$$

Una vez conocida los objetivos de la optimización, se procede a considerar las restricciones del sistema.

Sujeto a:

$$\sum Q_{cap} \leq \sum Q_{load} \quad (3.4)$$

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad (3.5)$$

$$P_{ij \min} \leq P_{ij} \leq P_{ij \max} \quad (3.6)$$

Dentro del software de PowerFactory se definen estos límites mediante el software DPL, donde se evaluarán las mismas variables por cada iteración para evitar converger una solución fuera de los límites.

La ubicación y el dimensionamiento óptimo de los bancos de capacitores debe ser evaluado tomando como posibilidades todas las barras de la red, por lo tanto,

como se muestra en la Figura 3.15, se ubicaron Bancos de capacitores en todas las barras de la red, de tal forma que se habiliten y deshabiliten según la iteración y respuesta del algoritmo heurístico.

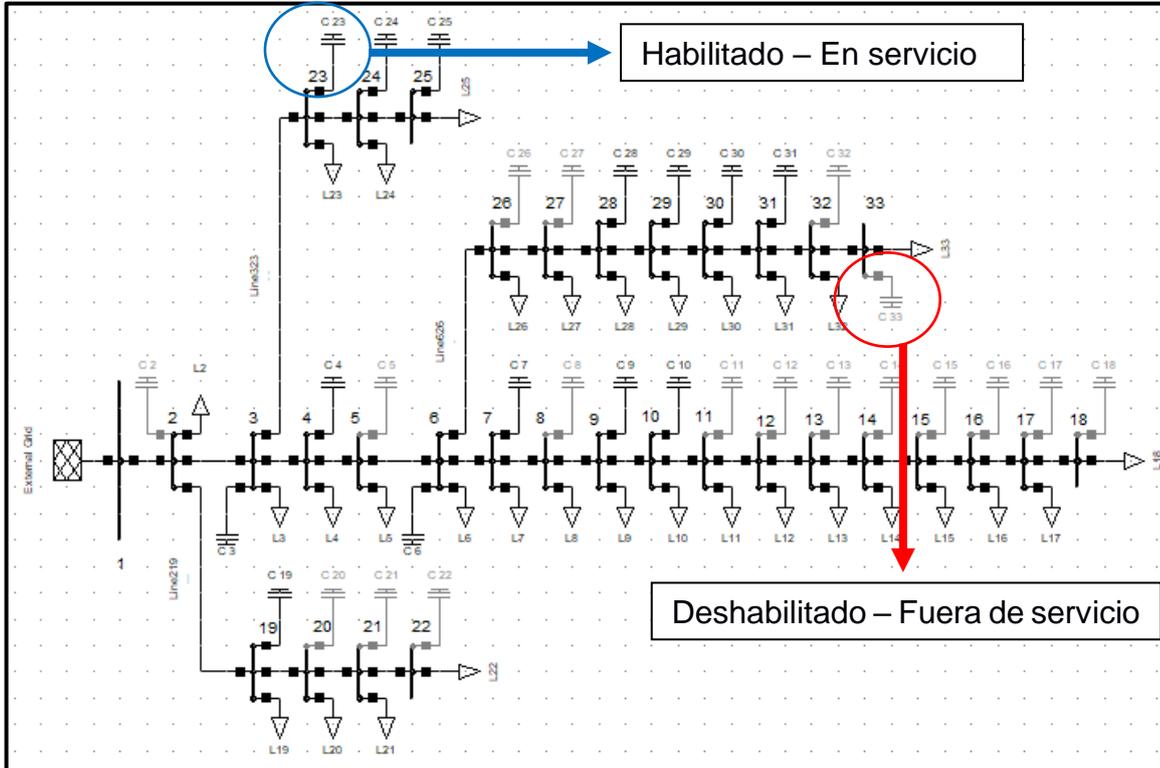


Figura 3.15: Estado de servicio de los capacitores en el sistema de potencia

Tal y como se muestra, dentro de la consola de PowerFactory el sistema de potencia en el transcurso de las iteraciones y evaluación de las pérdidas para su minimización mediante la habilitación óptima de los bancos de capacitores instalados, se aprecia como en una iteración determinada los bancos de capacitores están habilitados en las barras donde el banco tiene un color negro asentado en comparación a los capacitores deshabilitados, y esto se debe a la respuesta del algoritmo heurístico en operación una vez que la selección basada en probabilidades se haya efectuado.

Tomando en cuenta la ubicación óptima de los Bancos de capacitores, también es primordial considerar el dimensionamiento que estos tendrán, y para se plantea lo siguiente. Se define un paso de capacitancia y límite de pasos de capacitancia para todos los posibles Bancos de capacitores a instalar y dimensionar.

Filas: Pasos de capacitancia de cada Banco (Total = 21) - Columnas: Bancos de capacitores (Total = 9)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010	0,010
3	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
4	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030	0,030
5	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040	0,040
6	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050	0,050
7	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060	0,060
8	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070	0,070
9	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080	0,080
10	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090	0,090
11	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
12	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110	0,110
13	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120	0,120
14	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130	0,130
15	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140	0,140
16	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150	0,150
17	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160	0,160
18	0,170	0,170	0,170	0,170	0,170	0,170	0,170	0,170	0,170
19	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180	0,180
20	0,190	0,190	0,190	0,190	0,190	0,190	0,190	0,190	0,190
21	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200

Tabla 3.1: Matriz de valores de potencias reactivas para el dimensionamiento de cada Banco de capacitor

En la Tabla 3.1 se muestra un ejemplo del planteamiento de la selección del dimensionamiento tanto para el algoritmo ACO como el Algoritmo genético. Cada elemento de la matriz es una posible solución, la cual será el objetivo de la búsqueda exhaustiva que se realizará en cada algoritmo heurístico.

3.4.2 Evaluación de la función objetivo y restricciones

Para esta sección es necesario conocer la función de evaluación dentro de la programación en lenguaje DPL de DIgSILENT, que este caso será la función de flujo de potencia para cada conjunto de estados de servicio de los bancos de capacitores, por lo tanto, para cada iteración se realizará el flujo de potencia y se obtendrán las pérdidas de potencia activa de cada línea y las pérdidas de potencia activa totales de la red.

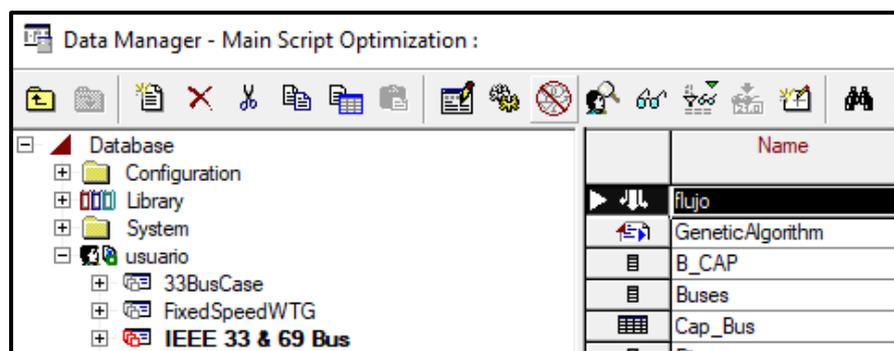


Figura 3.16: Función de flujo de potencia, llamada la forma de onda externa en el script en DPL

En la venta de objetos y elementos externos del script, tal como se muestra en la Figura 3.16, se encuentra la función del flujo de potencia, como también se encuentran los vectores, matrices y subrutinas que serán utilizados en el script principal.

Dentro del script principal, Figura 3.17, se ejecuta la función del flujo de potencia para la obtención de las pérdidas tal y como se muestra en la siguiente figura:

```
for(i=1;i<=MaxIter;i=i+1){  
    flujo.Execute();!Ejecucin del flujo de potencia.  
    oRed=Red.First();!Obtencion de los elementos de la red mediante el object Red.
```

Figura 3.17: Ejecución del flujo de potencia y obtención de las pérdidas en el cálculo de la información heurística

Se muestra la obtención de las pérdidas de potencia activa a partir del flujo de potencia (flujo.Execute()). Además, se observa como adelanto, el cálculo de la variable heurística para el método de Optimización por Colonia de Hormigas, el cual se detallará en la sección 3.5.

3.5 Planteamiento del Algoritmo ACO (Ant Colony Optimization)

Con la aplicación del método de Colonia de hormigas, se busca replicar el comportamiento de las hormigas ante su objetivo, usando las reglas probabilísticas que rigen sus comportamientos, esto ayudará a optimizar la red de distribución, logrando que los bancos de capacitores sigan los movimientos y reglas heurísticas que componen al algoritmo.

Para iniciar, es de mucha importancia conocer los parámetros del algoritmo, los cuales se describen a continuación mediante el siguiente procedimiento y planteamiento.

3.5.1 Inicialización de parámetros

El algoritmo inicia con la configuración de parámetros e inicialización de la feromona en cada camino, luego, en un ciclo iterativo, cada hormiga encuentra una solución, generando un recorrido completo eligiendo los lugares cubiertos de acuerdo a una regla probabilística.

Se deben inicializar el algoritmo con los siguientes parámetros:

- Iteraciones [n].
- Población de hormigas [Ant: $k \in m$].
- Feromonas [τ_{ij}].
- Variable de información heurística [η_{ij}].
- Parámetros de influencia [α, β].
- Evaporación de las Feromonas [ρ].

El número de iteraciones se debe definir según la complejidad del problema de optimización. Para el caso estudiado, con pocas iteraciones es posible que el algoritmo no logre hallar la convergencia de la optimización.

La población de hormigas ayuda considerablemente a la convergencia del algoritmo, obteniendo más probabilidades de convergencia en menor cantidad de iteraciones, pero podría provocar problemas de tiempo de procesamiento de los computadores.

Los valores de Feromonas indican que tanta concentración de movimiento de hormigas existen en un camino o ruta hacia al objetivo de estas, dado que cada banco de capacitores (representación de las hormigas), se ubican a una barra determinada, y mediante el rastro de feromonas que estos dejan, la ubicación del banco de capacitores es capaz de identificar las mejores probabilidades generadas proporcionalmente por la cantidad de las feromonas depositadas por cada barra del sistema.

La información heurística nos ayudará a definir las probabilidades de cada barra con información de la calidad de cada ruta óptima o ruta objetivo, es decir, el valor calculado en base a las pérdidas del sistema y obteniendo la proporción de las pérdidas hacia cada barra (valor asignado a la variable η_{ij}), nos dará información de la calidad de cada barra para ubicar un banco de capacitores.

Los parámetros de influencia α y β , ayudan a indicar la intensidad en que las Feromonas y las variables de información heurística correspondientemente, los cuales se presentan en los cálculos de las probabilidades de selección.

Por último, el valor de la evaporación de la feromona ayuda a emular la volatilidad que presenta una feromona en la naturaleza de las hormigas. Con esto se evitan las convergencias locales, es decir, valores que convergen para una sola hormiga como la mejor solución, y no para todas las hormigas en cada iteración, dado que evita que los valores de una iteración “i” de las feromonas se mantenga y se sume con los valores de cambios de feromonas (depósitos de feromonas de cada hormiga) en la iteración “i+1”, así mismo, evitando que su valor crezca permanentemente.

Con la definición de las representaciones de cada parámetro en el problema actual de optimización, podemos definir e inicializar sus valores para proceder a las iteraciones del algoritmo ACO. De lo realizado en la programación en DPL, se utilizarán los siguientes parámetros para un mejor funcionamiento y convergencia del algoritmo, Figura 3.18.

```
!Parametros del algoritmo ACO (Ant Colony Optimization)
N_Ants=1*(NBarras-1); !Numero de Capacitores
MaxIter=30; !Numero de iteraciones
alpha=1.5; !Factor exponente del aporte de feromonas
beta=0.5; !Factor exponente del aporte de informacion heuristica
rho=0.05; !Factor de evaporizacion de feromonas
tao_o=1; !Feromona inicial
BestSol=1e20; !Mejor solucion inicial (Valor muy elevado)
Q=10; !Factor del cambio de feromona insertado por cada hormiga
```

Figura 3.18: Inicialización de parámetros, matrices y vectores para el desarrollo del Algoritmo ACO

En base a pruebas y referencias, se determinó que los siguientes parámetros ayudan al algoritmo a tener una mejor convergencia y obtención de resultados.

3.5.2 Construcción de soluciones mediante la probabilidad de selección

Matemáticamente, la probabilidad $(p^{(h)}_{(i,j)})$ con la que una hormiga h elige moverse desde una ubicación *i* a otra *j* es:

$$P_i = \frac{(\tau_i)^\alpha * (\eta_i)^\beta}{\sum_{i=1}^{N_{cap}} [(\tau_i)^\alpha * (\eta_i)^\beta]} \quad (3.7)$$

Como se muestra en la función de probabilidad, la ecuación depende únicamente de las feromonas “τi” depositadas por cada hormiga o Banco de capacitores en

una barra “i”, esto indica que la hormiga seleccionaría una barra en base a que otra o varias hormigas han seleccionado la misma barra previamente, y también depende de la variable de información heurística la cual es predefinida por cada iteración indicando la mejor ruta para la selección de cada barra.

3.5.3 Regla de selección del objetivo

Para la selección que hormiga tiene de trasladarse de barra “p” hacia una barra “q”, se considera una probabilidad “qo” de que la hormiga siga fijamente al producto entre la feromona con su valor de influencia exponencial α y la información heurística de la barra con su influencia exponencial β , tal como se muestra en la siguiente expresión para la selección “j”. Por ende, si una variable q aleatoria cumple con la condición $q \leq qo$ de la expresión, entonces es posible elegir la primera alternativa, caso contrario, se elige el traslado a una siguiente barra con la emulación de la rueda de la ruleta, seleccionando una de las barras en base a sus probabilidades “Pi” previamente calculadas, la Figura 3.19 ilustra la dicho el texto previo.

$$j = \begin{cases} \max \{(\tau_i)^\alpha * (\eta_i)^\beta\}; & \text{si } q \leq qo \\ J & ; \text{si } q > qo \end{cases} \quad (3.8)$$

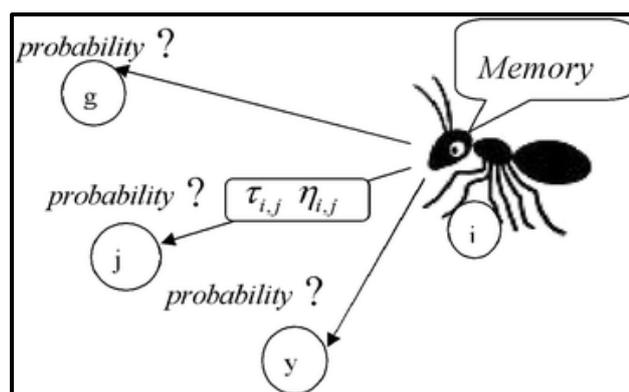


Figura 3.19: Ilustración de una hormiga con sus respectivas alternativas y selección en base a sus probabilidades (Rukundu and Cao, 2016)

Se muestra el ejemplo, Figura 3.20, en el cual una hormiga (Representación de los bancos de capacitores) tiene las distintas alternativas para su selección en base a la regla de selección de un sistema de colonia de hormigas.

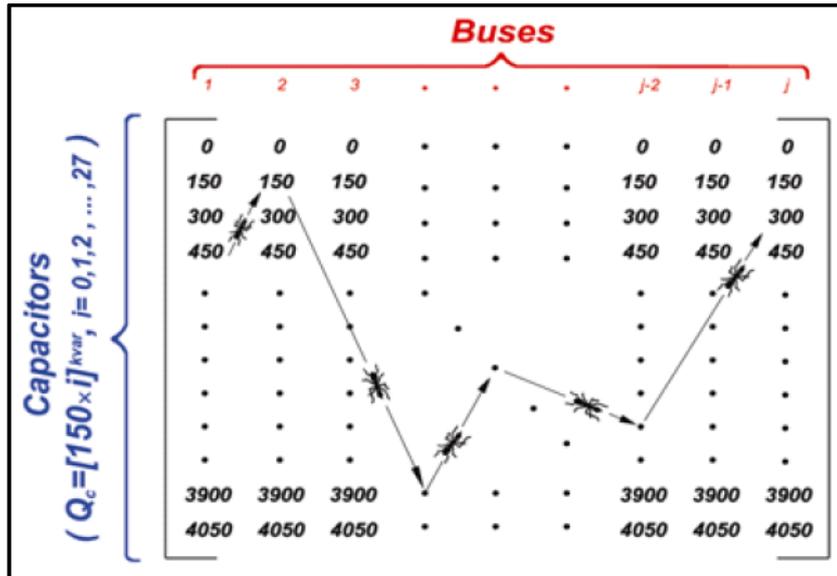


Figura 3.20: Ilustración de los resultados mediante el algoritmo ACO basado en el planteamiento para el dimensionamiento de cada Banco de capacitor (Sirjani and Hassanpour, 2012)

Una vez realizada la selección de la hormiga hacia una barra, se procede a la evaluación de la función objetivo mediante la ejecución de un flujo de potencia, obteniendo los valores de las pérdidas para la siguiente iteración del algoritmo.

3.5.4 Actualización de feromonas

Para finalizar la iteración del algoritmo, se procede a realizar una actualización para las feromonas del sistema tomando en cuenta dos factores, la evaporización de las feromonas y los depósitos de feromonas realizado por cada hormiga del sistema. Por lo tanto, se tiene la siguiente expresión para la actualización de la feromona.

$$Tj^{(i+1)} = (1 - \rho) * Tj^{(i)} + \rho * \Delta\tau_j \quad (3.9)$$

Para una feromona de la iteración "i+1" se tiene la dependencia del factor de volatilidad "ρ", y se tiene el cambio de feromona o depósito de feromona que inserta una hormiga en una determinada barra.

Se tiene que la expresión para el cambio de feromona está dada por:

$$\Delta\tau_j = \begin{cases} \frac{Q * F_{best}}{F_{worst}} & ; \text{Si } (i, j) \text{ pertenece al conjunto de la mejor solución} \\ 0 & ; \text{Si } (i, j) \text{ no pertenece al conjunto de mejor solución} \end{cases} \quad (3.10)$$

Se observa la presencia del factor constante Q , el cual representa la intensidad con el cual se deposita la feromona por cada hormiga que deja su rastro hacia la mejor solución.

Con las feromonas actualizadas, se procede a una siguiente iteración hasta llegar a la convergencia de la optimización, ubicando los bancos de capacitores en las barras con mejor solución de pérdidas (Minimización de las pérdidas).

En el siguiente flujograma, Figura 3.21, se muestra en resumen el procedimiento a seguir del algoritmo por Colonia de Hormigas para el caso de estudio a optimizar.

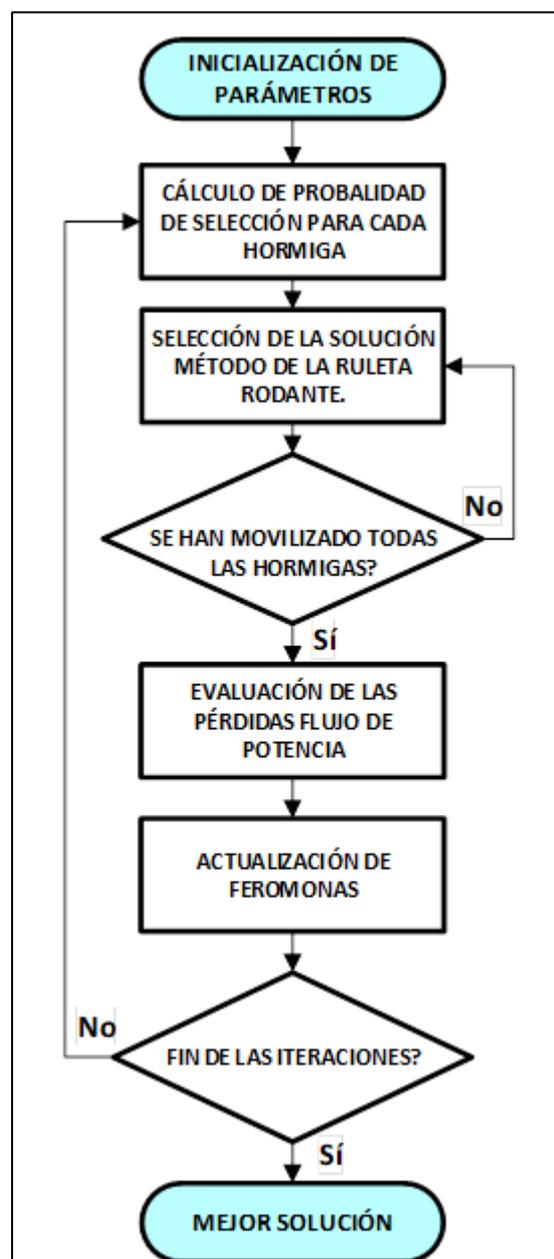


Figura 3.21: Diagrama de flujo para el algoritmo por Colonia de Hormigas.

3.6 Planteamiento del Algoritmo Genético

Mediante el método de Algoritmo Genético, se buscará replicar los mecanismos de Selección Natural de la teoría de la evolución de Charles Darwin, aplicándolo al problema de Optimización de una red de Distribución mediante la ubicación y dimensionamiento óptimo de bancos de capacitores.

Los bancos de capacitores deben ser análogos a la variable que se desea optimizar para minimizar las pérdidas de potencia activa, por ende, en base al Algoritmo Genético, se utilizará el siguiente procedimiento y planteamiento del problema de optimización.

3.6.1 *Codificación de las variables de optimización de la red e inicialización de la población inicial.*

El algoritmo se inicia con los parámetros de cada operador utilizado dentro del Algoritmo genético, los cuales son los procesos de Selección natural, Cruce de reproducción y Mutación. Estos son los operadores que utilizará la Población de soluciones, la cual será definida con un tamaño (Cantidad de individuos) constante a lo largo del algoritmo, es decir, mantendrá la misma dimensión para todas las Generaciones predefinidas inicialmente.

Se debe iniciar el algoritmo con los siguientes parámetros:

- Número de Generaciones.
- Tamaño de la Población.
- Probabilidad de Cruce de reproducción (Crossover).
- Probabilidad de Mutación.

El número de generaciones nos ayudará a tener una mejor calidad de solución a lo largo del algoritmo, debido a que cada iteración del Algoritmo genético busca mejorar la solución a partir de sus tres operadores principales.

El tamaño de la población es primordial, ya que mientras mayor sea la dimensión de la población, mayor será la gama de posibles soluciones dentro de la población

y se tendrán mejores probabilidades de converger a una solución global en menos cantidad de Generaciones.

Las probabilidades de Cruce de reproducción y Mutación ayudarán a controlar la cantidad de posibles cruces y mutaciones que se efectuarán a lo largo de las Generaciones, debido a que no siempre se cumple el caso de una mejora de soluciones ante la ejecución de estos operadores. Para el problema de optimización actual, un cambio aleatorio basado en los operadores de Cruce y Mutación tienen altas probabilidades de no mejorar la solución para la siguiente generación, por ende, brindarían soluciones que deberán ser descartadas, lo cual provocará que el algoritmo tarde más o posiblemente nunca halle una solución global para el problema planteado. Por lo tanto, para evitar este problema de convergencia, se inicializan los parámetros de ambos operadores con probabilidades relativamente bajas.

En la siguiente imagen, Figura 3.22, se muestra el script realizado en DPL, se muestran los valores de los parámetros mencionados.

```
!Parametros iniciales del Algoritmo Genetico
Generations=200;!Numero de iteraciones
Population=1000;!Cantidad de Cromosomas o individuos (Posibles soluciones)
P_mutation=0.05;!Probabilidad de mutacion del individuo (Cromosoma)
P_crossover=0.1;!Probabilidad de cruce de reproduccion de un individuo con otros
```

Figura 3.22: Inicialización de parámetros constantes para el desarrollo del Algoritmo Genético

Los valores mostrados pueden diferir según la complejidad del problema. Posterior a esta inicialización de parámetros del algoritmo, se dimensionan e inicializan los vectores y matrices que se utilizarán para el desarrollo adecuado del Algoritmo genético.

3.6.2 Estrategia de selección para la población inicial

Para la creación de la población inicial, se tienen tres posibles alternativas para su generación aleatoria de individuos o cromosomas.

- Para la primera alternativa, que se muestra en la Figura 3.23, se tiene la generación aleatoria de cada bit del cromosoma codificado en binario.

CROMOSOMA														
GEN 1					GEN 2					GEN 3				
0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0

Figura 3.23: Cromosoma generado aleatoriamente por cada Bit de un Gen de números binarios (Cadena de Bits)

El bit o Alelo marcado fue elegido aleatoriamente con un 50% de probabilidad, esta estrategia no fue seleccionada, debido a que en base a las pruebas se determina la baja probabilidad de generar soluciones eficaces, debido a que la distribución de probabilidad de soluciones no es uniforme y concentra las probabilidades en ciertos valores numéricos, lo cual no es lo deseable para la generación de una población de soluciones. La probabilidad de selección aleatoria para este caso se puede representar como:

$$P_{Gen} = (0,5)^{NBits} * 100 = (0,5)^5 * 100 = 3,125\% \quad (3.11)$$

- Para la segunda alternativa, Figura 3.24, se tiene la generación aleatoria de cada Gen en números enteros, sin ser codificados a códigos binarios.

CROMOSOMA														
7	20	5	16	10	8	1	4	25	30	4	11	31	7	5

Figura 3.24: Cromosoma generado aleatoriamente por cada Gen con números enteros

El Gen marcado fue elegido aleatoriamente con una probabilidad dependiente del número de pasos de capacitancia que se definen como parámetro inicial del sistema de distribución. La probabilidad de selección aleatoria se puede representar como:

$$P_{Gen} = \frac{1}{STEPS + 1} \quad (3.12)$$

En el ejemplo mostrado, STEPS es igual a 30, por ende, si un Gen tiene un valor de 31, el paso real de capacitancia es igual de 30 (STEP - 1).

Esta estrategia tampoco fue seleccionada, debido a que las soluciones obtenidas de la población inicial eran obviamente aberrantes y de baja calidad. Este resultado poco prometedor resulta de la muy baja probabilidad de generar un Gen con un valor igual a uno (uno \equiv OFF), donde uno representa el estado de

desconexión del Banco de capacitores. En el caso de que se tengan 30 pasos máximos de capacitancia, la probabilidad de generar un Gen = uno es de:

$$P_{Gen} = \frac{1}{STEPS + 1} = \frac{1}{30 + 1} * 100 = 3,226 \% \quad (3.13)$$

Entonces, teniendo en cuenta la baja probabilidad de tener un Banco de capacitores desconectado en una barra, la solución de cada cromosoma tendrá muy bajas probabilidades de estar cercano al mínimo global.

Finalmente, para la tercera alternativa se tienen dos pasos para la generación de cada individuo de la población inicial. El primer paso consiste en generar aleatoriamente un número igual a cero o uno con 50% de probabilidad de generación para cada uno, tal como se muestra en la Figura 3.25, donde uno representa al Banco de capacitores en estado de conexión (ON), mientras que cero implica estado de desconexión (Suárez Goffe).

SELECCIÓN ALEATORIA	
ON - 50%	OFF - 50%
1	0

Figura 3.25: Probabilidades de generar un número igual a 0 o 1 (Estado de servicio de un Banco de Capacitores).

Si el número generado es igual a uno, se procede a generar una dimensión aleatoria de capacidad del Banco de capacitores con un rango de generación de (1, STEPS +1), donde la probabilidad de generar un número dentro de ese rango es igual a 1/(STEPS+1), de esta forma darle un valor entero a cada Gen. En caso de que el número generado sea igual a cero, el valor del Gen es igual 1 (1 ≡ OFF), tal como se ilustra en la Figura 3.26.

IF = 1	GEN = RANDOM (1, STEP MÁXIMO + 1)
IF = 0	GEN = 1 -> (1 = OFF)

Figura 3.26: Algoritmo de selección aleatoria de la capacidad del Banco de Capacitores.

Se selecciona esta alternativa por dar mejores probabilidades de generar una solución de buena calidad para la población inicial, brindando una mayor gama de soluciones. La razón de los buenos resultados de esta alternativa se debe a la capacidad de deshabilitar y habilitar el estado de desconexión de cada Banco de

Capacitores con una probabilidad de 50%, mucho mayor a las dos alternativas iniciales, esto mejora sustancialmente las soluciones producidas en la población inicial, ya que se tiene la posibilidad de instalar menos Bancos de capacitores en el sistema de distribución y aun así tener una mejor solución.

3.6.3 Codificación de la población inicial.

Como ya se ha mencionado, los bancos de capacitores son las variables a optimizar, por lo tanto, según el algoritmo, se deben codificar. La codificación a utilizar será una codificación Binaria, el cual indicará el valor del paso de potencia reactiva del conjunto de Bancos de capacitores y, por ende, su estado de servicio si se da el caso de que su valor sea cero, toda la codificación y decodificación representa un CROMOSOMA, el cual contiene una solución para la reducción de pérdidas, entonces la población de cromosomas o individuos contiene un conjunto de soluciones el cual será evaluado a lo largo de las generaciones del algoritmo.

La introducción del Cromosoma es crucial para el procedimiento del algoritmo, debido a que es la variable que seguirá paso a paso cada iteración. Las características principales de un Cromosoma es el Gen, el cual representa el estado de servicio de un banco de capacitores de forma implícita. Cada Gen contiene un Alelo, el cual representa el valor numérico de la dimensión del Banco de capacitores mediante un número entero, el cual también debe codificarse a un vector binario, lo que resultará en un vector cromosoma con una dimensión de N Banco de capacitores por la Longitud del vector binario resultante del paso de capacitancia máximo de todos los Bancos de capacitores.

En el caso de tener 31 pasos de capacitancia posibles a seleccionar para todos los Bancos de capacitores, la codificación binaria, como se muestra en la Figura 3.27, daría como resultado un vector binario por cada Gen con una longitud de cinco bits.



Figura 3.27: Dimensión y valor codificado en Binario de un Gen con un valor de 31 Pasos de capacitancia

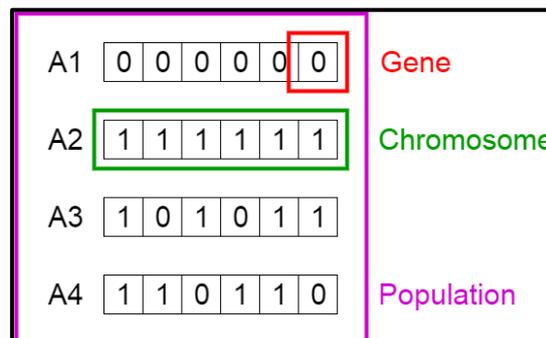


Figura 3.28 Estructura de una población de Cromosomas codificados en Binario (Liu, 2014)

La Figura 3.28 se muestra la estructura del cromosoma o individuo de la población de soluciones, donde cada cromosoma representa una posible solución de la Generación actual.

Tomando en cuenta la dimensión de cada Gen codificado en binario y el total de barras del sistema para la cantidad de posibles Bancos de capacitores a instalar y dimensionar en base al algoritmo genético, se tiene lo siguiente:

$$ChromSize = (GenSize) * (NBarras - 1) \tag{3.13}$$

Donde:

- ChromSize representa la dimensión total del cromosoma.
- GenSize representa la dimensión de un solo Gen en base a la cantidad total de pasos de capacitancia.
- NBarras representa el número de barras total del sistema de distribución.

En el algoritmo genético, las generaciones representan el número de iteraciones, en el cual se maneja el proceso de selección natural al inicio de cada nueva iteración.

3.6.4 Evaluación de la primera generación y Selección natural

Cada cromosoma es evaluado en la función objetivo mediante el algoritmo de programación en DPL, a partir del flujo de potencia y la obtención de las pérdidas de potencia activa, de esta manera se conoce que tan buena es cada solución producida por cada cromosoma (Conjunto de estados de los bancos de capacitores) de la población inicial. De esta manera se puede conocer mediante el proceso de Selección, quienes podrán seguir a la siguiente generación.

Chromosome Number	Initial Population	x Value	Fitness Value f(x)	Selection Probability
1	0 1 0 1 1	11	20.9	0.1416
2	1 1 0 1 0	26	10.4	0.0705
3	0 0 0 1 0	2	5.6	0.0379
4	0 1 1 1 0	14	22.4	0.1518
5	0 1 1 0 0	12	21.6	0.1463
6	1 1 1 1 0	30	0	0
7	1 0 1 1 0	22	17.6	0.1192
8	0 1 0 0 1	9	18.9	0.128
9	0 0 0 1 1	3	8.1	0.0549
10	1 0 0 0 1	17	22.1	0.1497
		Sum	147.6	
		Average	14.76	
		Max	22.4	

Tabla 3.2: Ejemplo de la evaluación de la población inicial

En la Tabla 3.2 se muestra la codificación de los individuos (cromosomas) de la población inicial. Para el ejemplo se utiliza codificación binaria de variables enteras que evalúan la función objetivo. Los valores de la suma de la función objetivo, valores promedio y valor máximo nos indica la calidad de las soluciones de la iteración actual en base a la población de dicha generación.

3.6.5 Cruce de individuos para la siguiente generación

Una reproducción entre individuos ayuda a mejorar las características de la siguiente generación, dando paso a los hijos de los individuos de la generación

previo. Existen diferentes tipos de cruce entre individuos, de los cuales se eligen desde 2, 3 o más secciones para intercambiar los genes del cromosoma y mejorar la siguiente generación.

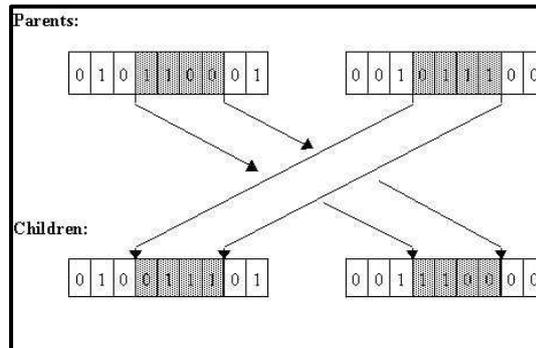


Figura 3.29: Cruce entre individuos y resultado de la siguiente población (Liu, 2014)

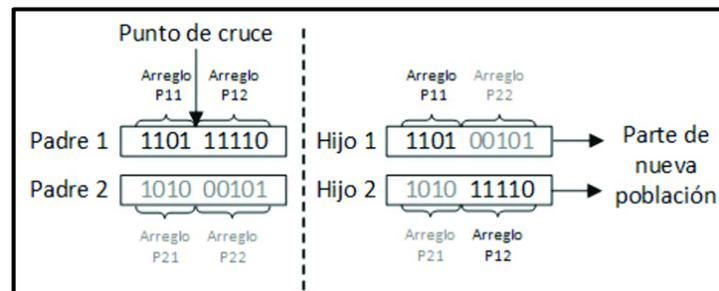


Figura 3.30: Ejemplo del punto de cruce, para 1 sola sección (Troncoso and Suárez, 2017)

En el punto de cruce, Figura 3.29 y Figura 3.30, se realiza bajo una probabilidad de cruce predefinida, de tal forma que no todos los individuos serán capaces de realizar el cruce de genes. Finalmente, en el cruce de genes, la posición de partida de cruce se realiza en una posición aleatoria del arreglo. Es decir, se altera la combinación de estados de servicio y valores de potencia reactiva de los Bancos de capacitores para mejorar la solución en la siguiente generación o iteración, con las mejores cualidades o mejores estados de cada individuo.

3.6.6 Mutación del cromosoma

Una vez creada la nueva población para la siguiente generación o iteración, existe una probabilidad de que cada individuo que contenga una determinada combinación de estados de servicio mute en uno de sus genes, es decir, uno de los genes del cromosoma tiene una probabilidad de cambiar su valor de paso de capacitancia y, por ende, es posible que cambie su estado de servicio, lo cual modificaría la solución ante ese cromosoma.

Esto se realiza cumpliendo con la regla de la evolución por generación de un sistema genético real, por lo tanto, se simula una adaptación por cada individuo para hallar la mejor solución.

Para finalizar, se realiza la siguiente iteración con la nueva población de cromosomas, los cuales contienen el conjunto de bancos de capacitores en servicio, productos de la generación anterior y de la mutación que podría efectuarse antes de procesar la nueva población.

En el siguiente flujograma, Figura 3.31, se tiene en detalle el proceso y planteamiento del Algoritmo Genético.

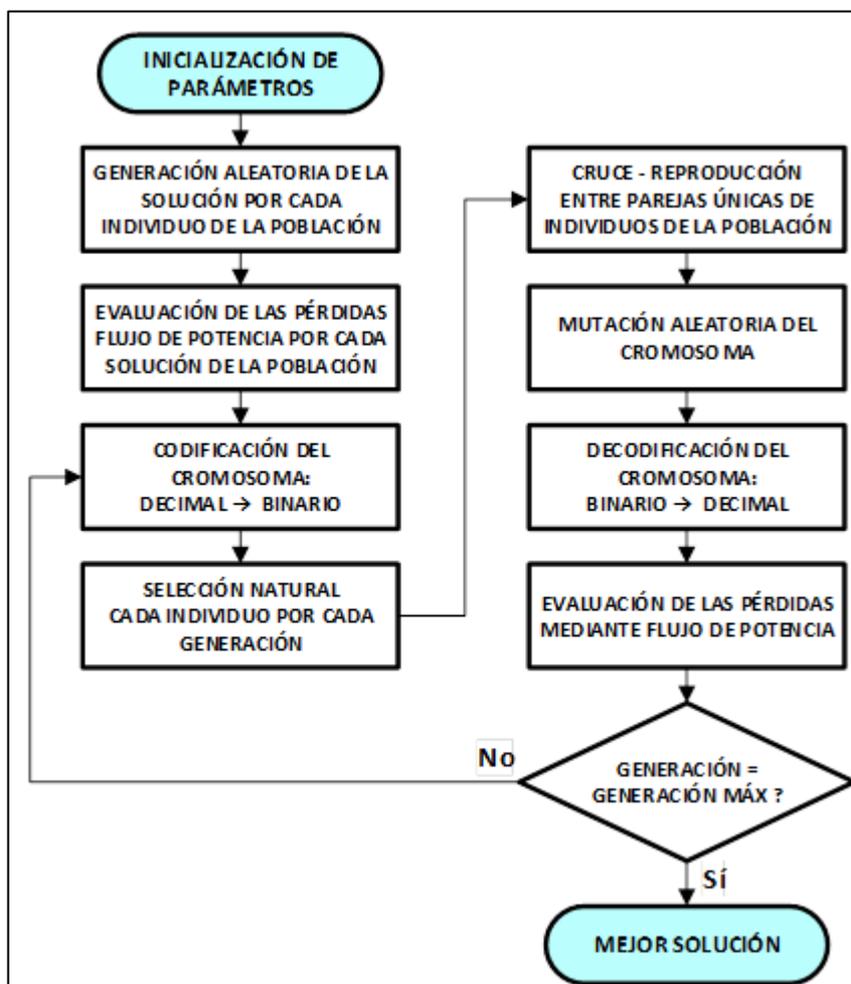


Figura 3.31: Flujograma del Algoritmo Genético para la Optimización de la Red mediante Bancos de Capacitores.

Capítulo 4. Resultados

Capítulo 4. Resultados

4.1	Introducción.....	67
4.2	Topología final de los casos de estudio con las pérdidas reducidas mediante la ubicación óptima de bancos de capacitores utilizando el método de Colonia de hormigas.....	67
4.2.1	<i>Sistema IEEE 33 barras.....</i>	68
4.2.2	<i>Sistema IEEE 69 barras.....</i>	68
4.3	Topología final de los casos de estudio con las pérdidas reducidas mediante la ubicación óptima de bancos de capacitores utilizando el método de Algoritmo genético.....	69
4.3.1	<i>Sistema IEEE 33 barras.....</i>	69
4.3.2	<i>Sistema IEEE 69 barras.....</i>	70
4.4	Resultados de la convergencia de la Función objetivo utilizando el método de Colonia de hormigas.....	71
4.4.1	<i>Convergencia de la función objetivo para el sistema IEEE 33 barras..</i>	72
4.4.2	<i>Convergencia de la función objetivo para el sistema IEEE 69 barras..</i>	72
4.4.3	<i>Convergencia de la función objetivo para el sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos.....</i>	73
4.5	Resultados de la convergencia de la Función objetivo utilizando el método de Algoritmo genético.....	74
4.5.1	<i>Convergencia de la función Fitness y función objetivo para el caso IEEE 33 barras.....</i>	75
4.5.2	<i>Convergencia de la función Fitness y función objetivo para el caso IEEE 69 barras.....</i>	76

4.5.3	<i>Convergencia de la función Fitness y función objetivo para el caso Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos</i>	77
4.6	Perfiles de voltaje por barra: Sin compensación reactiva y con compensación reactiva mediante los Bancos de capacitores utilizando el método de colonia de hormigas	78
4.6.1	<i>Perfil de voltajes para el caso IEEE 33 barras</i>	78
4.6.2	<i>Perfiles de voltaje para el caso IEEE 69 barras</i>	79
4.6.3	<i>Perfil de voltajes para el caso Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos</i>	80
4.7	Perfiles de voltaje por barra: Sin compensación reactiva y con compensación reactiva mediante los Bancos de capacitores utilizando el método de Algoritmo genético	82
4.7.1	<i>Perfil de voltajes para el caso IEEE 33 barras</i>	83
4.7.2	<i>Perfiles de voltaje para el caso IEEE 69 barras</i>	84
4.7.3	<i>Perfiles de voltaje para el caso Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos</i>	85
4.8	Resumen de los resultados con Algoritmo Colonia de Hormigas y Algoritmo genético	87
4.8.1	<i>Resumen de resultados para el caso IEEE de 33 barras</i>	88
4.8.2	<i>Resumen de resultados para el caso de IEEE de 69 barras</i>	88
4.8.3	<i>Resumen de resultados para el caso de estudio real del Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas Los Ríos</i>	89
4.9	Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados utilizando el Algoritmo ACO	89
4.9.1	<i>Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso IEEE de 33 barras</i>	89

4.9.2	<i>Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso IEEE de 69 barras.....</i>	90
4.9.3	<i>Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso de estudio del Alimentador Piñal CNEL EP Guayas Los Ríos.....</i>	92
4.10	<i>Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados utilizando el Algoritmo Genético</i>	93
4.10.1	<i>Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso IEEE de 33 barras.....</i>	93
4.10.2	<i>Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso IEEE de 69 barras.....</i>	94
4.10.3	<i>Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso de estudio del Alimentador Piñal CNEL EP Guayas Los Ríos.....</i>	95

4.1 Introducción

En este capítulo presentaremos los resultados de las simulaciones realizadas para obtener la máxima reducción de pérdidas de potencia mediante la ubicación y dimensionamiento óptimo de banco de capacitores en las redes de distribución modelo de la IEEE y del caso de estudio realizado en el Alimentador Piñal de CNEL EP Guayas Los Ríos.

Luego de haber llevado a cabo las simulaciones, se han ubicado y dimensionado los bancos de capacitores en las diferentes barras de la red de distribución de tal forma se cumpla la función objetivo con sus respectivas restricciones.

Así mismo, se muestran las gráficas correspondientes a las simulaciones que se realizaron, las gráficas más relevantes son las de convergencia y las de perfiles de voltajes, la cual se compara con el resultado del sistema no compensado y el sistema compensado.

4.2 Topología final de los casos de estudio con las pérdidas reducidas mediante la ubicación óptima de bancos de capacitores utilizando el método de Colonia de hormigas

Las topologías que se van a mostrar a continuación son el resultado de la ejecución de los algoritmos de optimización. La idea principal consiste en ubicar bancos de capacitores en todas las barras, menos la Slack, a lo largo de la red de distribución de forma que el algoritmo, basado en colonia de hormigas, vaya determinando qué capacitor y en qué capacidad debe quedarse; este algoritmo toma datos del flujo de potencia que se va ejecutando en cada iteración, cuya finalidad es verificar si la respuesta mejora o no y así ir mejorando la capacidad probabilística del método de optimización.

4.2.1 Sistema IEEE 33 barras

La Figura 4.1 muestra el resultado de correr el algoritmo de colonia de hormigas en la red de distribución IEEE 33 Barras. En la imagen se puede observar la ubicación de los bancos de capacitores en donde aquellos que se encuentran más remarcados son los que se eligieron para que sean parte de la red, aquellos capacitores que no están remarcados, es decir, los encerrados en el círculo, son los que no se eligieron para que formen parte de la red ya que la solución para ellos no permite tener una reducción de potencia adecuada.

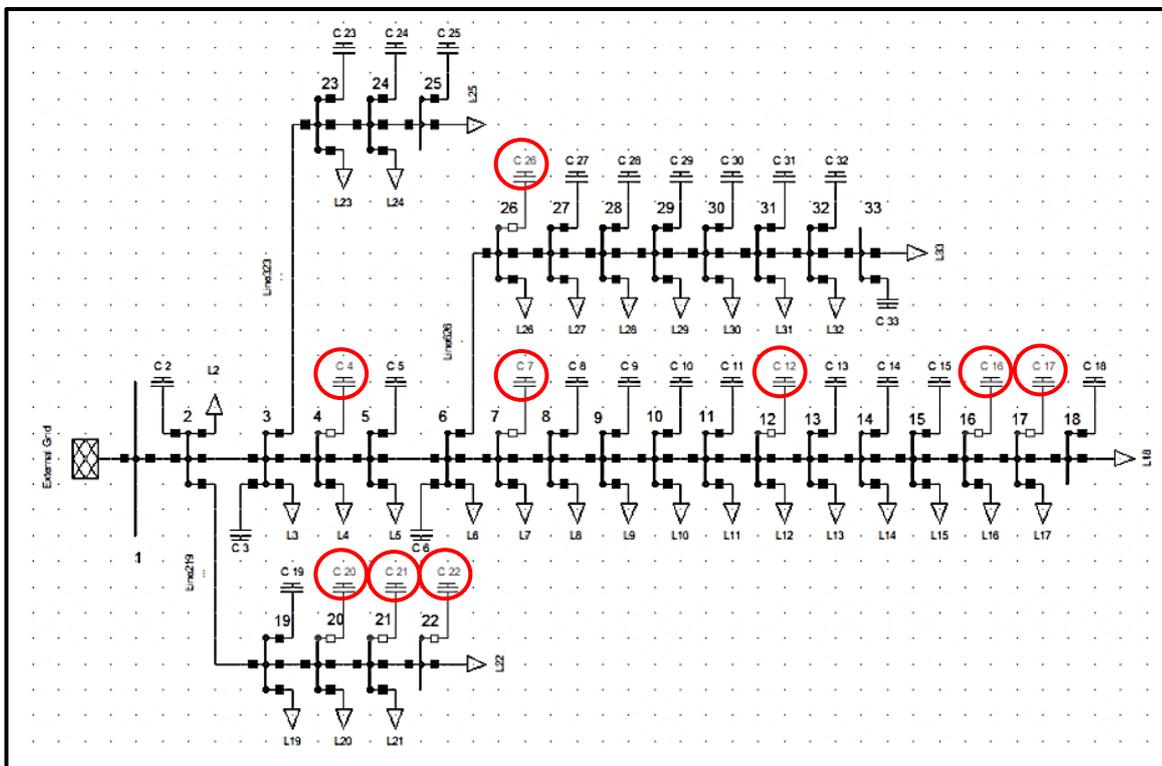


Figura 4.1: Topología de la red IEEE 33 Barras con la ubicación óptima de banco de capacitores mediante ACO

4.2.2 Sistema IEEE 69 barras

La Figura 4.2 muestra el resultado de correr el algoritmo de colonia de hormigas en la red de distribución IEEE 69 Barras. En la imagen se puede observar la ubicación de los bancos de capacitores en donde aquellos que se encuentran más remarcados son los que se eligieron para que sean parte de la red, aquellos capacitores que no están remarcados, es decir, los encerrados en el círculo, son los que no se eligieron para que formen parte de la red ya que la solución para ellos no permite tener una reducción de potencia adecuada.

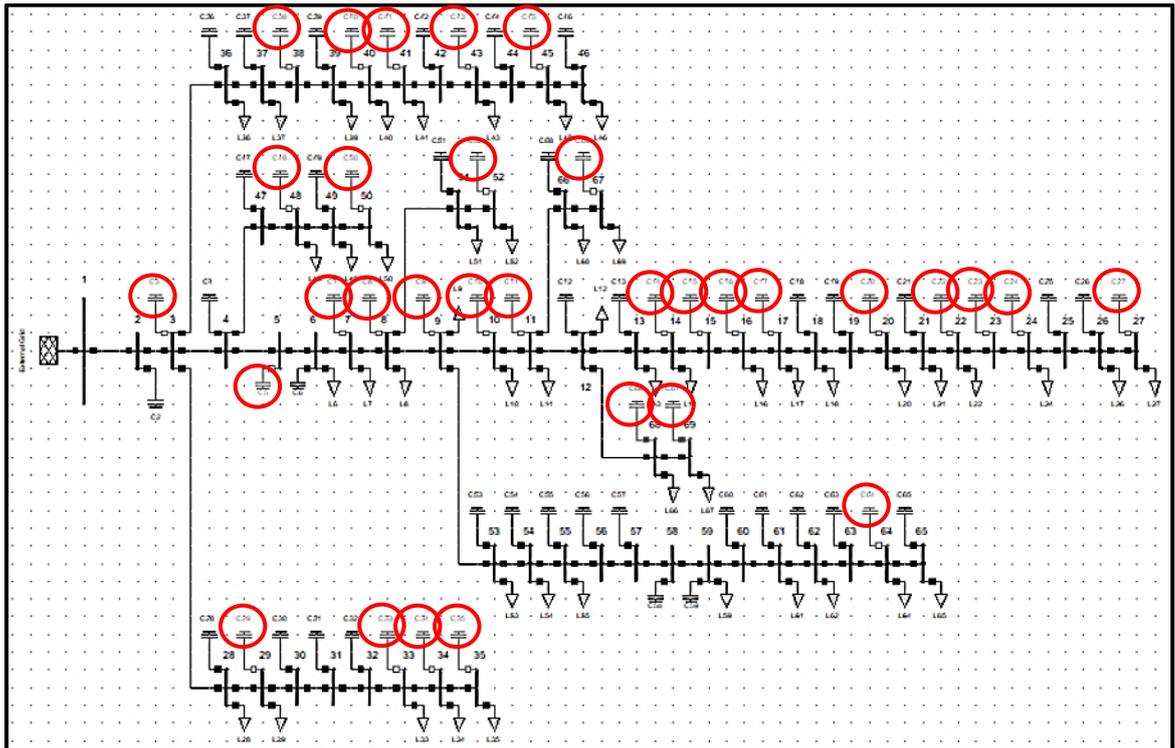


Figura 4.2: Topología de la red IEEE 69 Barras con la ubicación óptima de banco de capacitores mediante ACO

4.3 Topología final de los casos de estudio con las pérdidas reducidas mediante la ubicación óptima de bancos de capacitores utilizando el método de Algoritmo genético

Las topologías que se van a mostrar a continuación son el resultado de la ejecución de los algoritmos de optimización. La idea principal consiste en ubicar bancos de capacitores en todas las barras, menos la Slack, a lo largo de la red de distribución de forma que el algoritmo genético vaya determinando qué capacitor y en qué capacidad debe quedarse; estos algoritmos toman datos del flujo de potencia que se va ejecutando en cada iteración, cuya finalidad es verificar si la respuesta mejora o no y así ir mejorando la capacidad probabilística del método de optimización.

4.3.1 Sistema IEEE 33 barras

La Figura 4.3 muestra el resultado de correr el algoritmo genético en la red de distribución IEEE 33 Barras. En la imagen se puede observar la ubicación de los bancos de capacitores en donde aquellos que se encuentren más remarcados son los que se eligieron para que sean parte de la red, aquellos capacitores que no

están remarcados, es decir, los encerrados en el círculo, son los que no se eligieron para que formen parte de la red ya que la solución para ellos no permite tener una reducción de potencia adecuada.

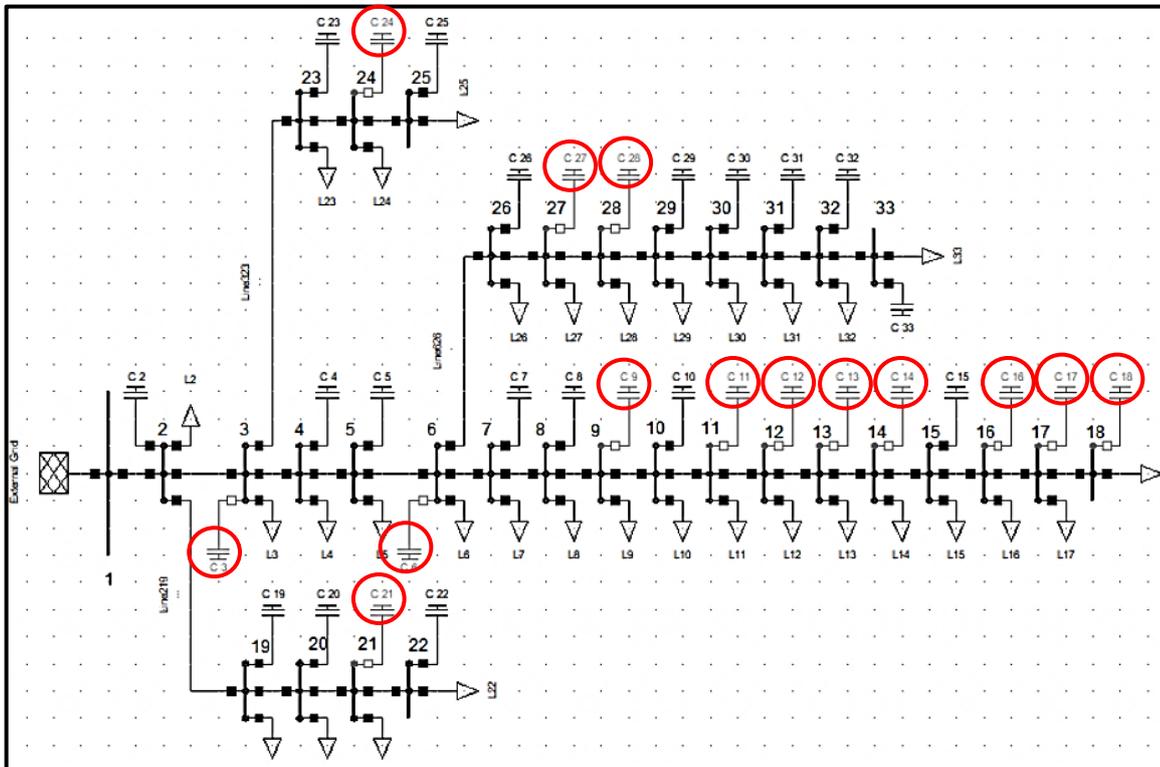


Figura 4.3: Topología de la red IEEE 33 Barras con la ubicación óptima de banco de capacitores mediante GA

4.3.2 Sistema IEEE 69 barras

La Figura 4.4 muestra el resultado de correr el algoritmo genético en la red de distribución IEEE 69 Barras. En la imagen se puede observar la ubicación de los bancos de capacitores en donde aquellos que se encuentren más remarcados son los que se eligieron para que sean parte de la red, aquellos capacitores que no están remarcados, es decir, los encerrados en el círculo, son los que no se eligieron para que formen parte de la red ya que la solución para ellos no permite tener una reducción de potencia adecuada.

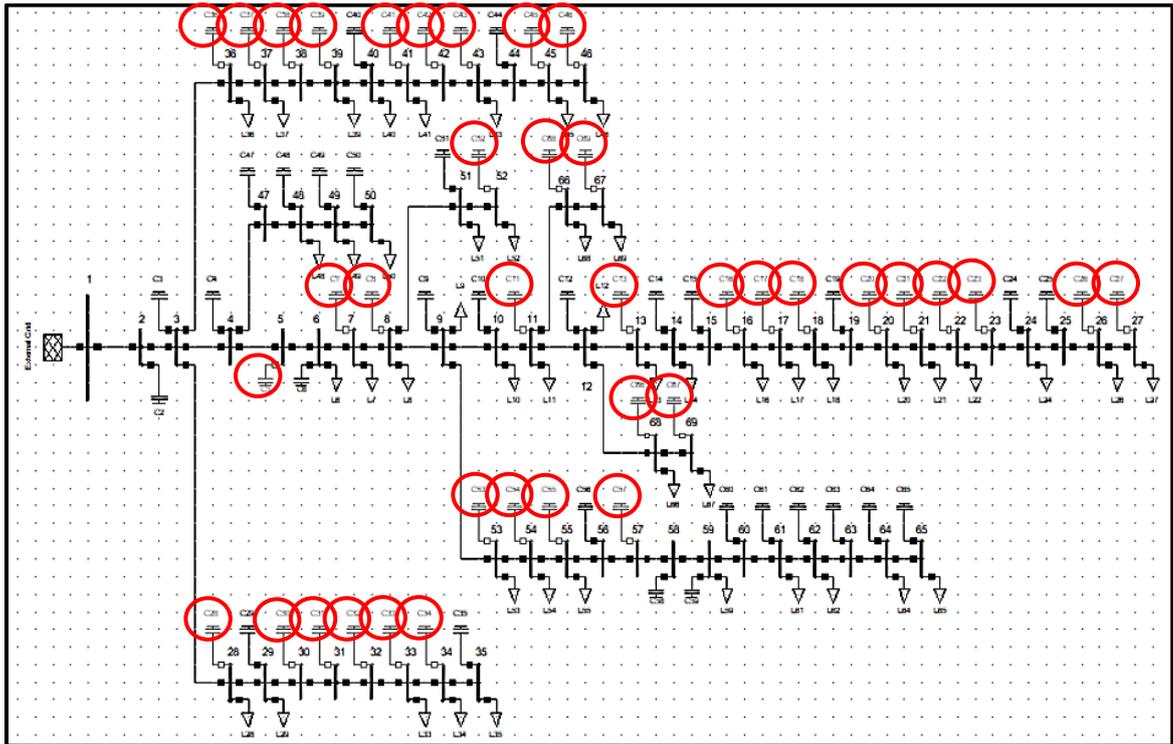


Figura 4.4: Topología de la red IEEE 69 Barras con la ubicación óptima de banco de capacitores mediante GA

4.4 Resultados de la convergencia de la Función objetivo utilizando el método de Colonia de hormigas

Las gráficas que se muestran a continuación son el resultado de la convergencia de la función objetivo que tienen como finalidad mostrar la capacidad de solución del algoritmo de colonia de hormiga. Se muestra además como la reducción de pérdidas va cambiando de acuerdo al paso de la iteración.

4.4.1 Convergencia de la función objetivo para el sistema IEEE 33 barras

El resultado de la función objetivo de la red de distribución de la IEEE 33 barras se muestra en la Figura 4.5.



Figura 4.5: Convergencia ACO IEEE 33 Barras

Los ejes de la gráfica representan las pérdidas de potencia en [kW] versus el número de la iteración. Se puede observar el establecimiento de las pérdidas de potencia en el sistema, el cual al inicio empieza con un valor alto de pérdidas, pero conforme van pasando las iteraciones se estabiliza en un valor mínimo que corresponde a 130.2382 [kW]. Para este caso, red IEEE 33 barras, el algoritmo muestra una tendencia positiva pues a la iteración veinte ya converge, lo que implica que los tiempos de simulación son bajos.

4.4.2 Convergencia de la función objetivo para el sistema IEEE 69 barras

El resultado de la función objetivo de la red de distribución de la IEEE 69 barras se muestra en la Figura 4.6.

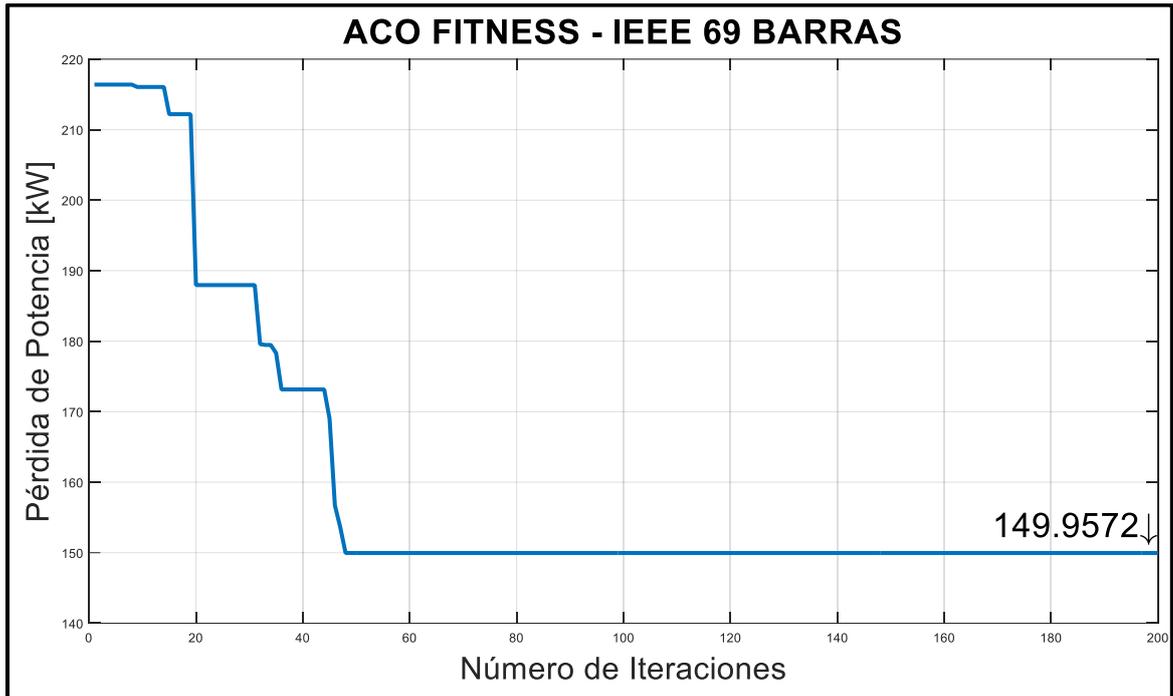


Figura 4.6: Convergencia ACO 69 Barras

Los ejes de la gráfica representan las pérdidas de potencia en [kW] versus el número de la iteración. Se puede observar el establecimiento de las pérdidas de potencia en el sistema, el cual al inicio empieza con un valor alto de pérdidas, pero conforme van pasando las iteraciones se estabiliza en un valor mínimo que corresponde a 149.9572 [kW]. Para este caso, red IEEE 69 barras, el algoritmo muestra una tendencia positiva pues a la iteración 50 ya converge, lo que implica que los tiempos de simulación son bajos.

4.4.3 Convergencia de la función objetivo para el sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos

El resultado de la función objetivo de la red de distribución del Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos se muestra en la Figura 4.7.

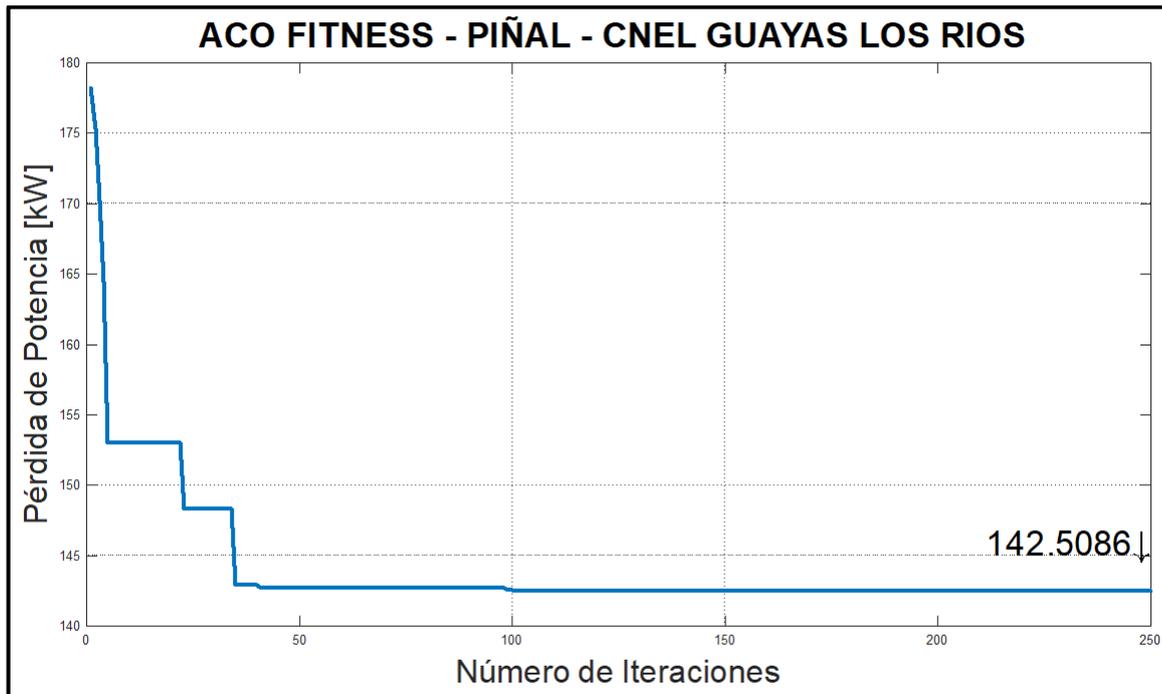


Figura 4.7: Convergencia ACO Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos

Los ejes de la gráfica representan las pérdidas de potencia en [kW] versus el número de la iteración. Se puede observar el establecimiento de las pérdidas de potencia en el sistema, el cual al inicio empieza con un valor alto de pérdidas, pero conforme van pasando las iteraciones se estabiliza en un valor mínimo que corresponde a 142.5086 [kW]. Para este caso, Alimentador Piñal, el algoritmo muestra una tendencia positiva pues a la iteración 50 ya converge, lo que implica que los tiempos de simulación son bajos.

4.5 Resultados de la convergencia de la Función objetivo utilizando el método de Algoritmo genético

Las gráficas que se muestran a continuación son el resultado de la convergencia de la función objetivo que tienen como finalidad mostrar la capacidad de solución del algoritmo genético. Se muestra además como la reducción de pérdidas va cambiando de acuerdo al paso de la iteración.

4.5.1 Convergencia de la función Fitness y función objetivo para el caso IEEE 33 barras

El resultado de la función objetivo de la red de distribución de la IEEE 33 barras se muestra en la Figura 4.8.

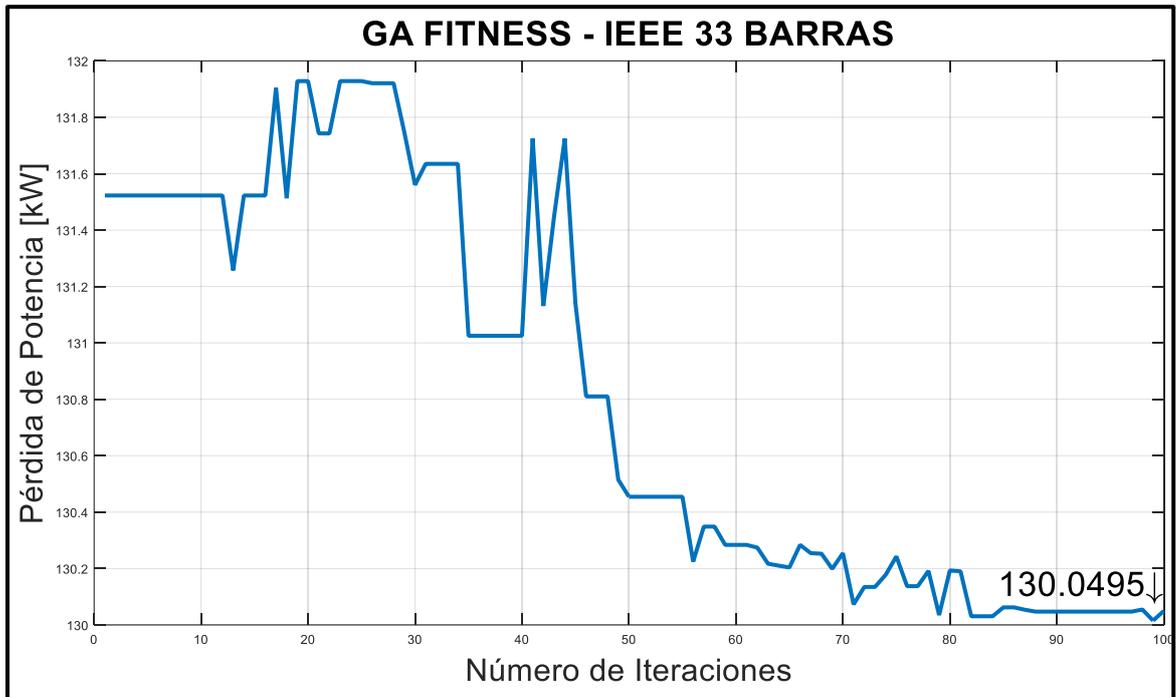


Figura 4.8: Convergencia GA IEEE 33 Barras

Los ejes de la gráfica representan las pérdidas de potencia en [kW] versus el número de la iteración. Se puede observar el establecimiento de las pérdidas de potencia en el sistema, el cual varía aleatoriamente pues este algoritmo se caracteriza por escoger sus mejores soluciones basadas en mutaciones y en reproducciones, y por cada iteración la solución que toma no es necesariamente la mejor. Razón por la cual la gráfica presenta esa forma en particular, bastante esporádica; teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se observa que este método toma más iteraciones en converger con respecto al anterior, para este caso se tiene una convergencia en la iteración 89 con una reducción de pérdidas de 130.0152 [kW], a pesar de que este método tome un poco más de tiempo, es importante recalcar que la solución es ligeramente mejor al método anterior.

4.5.2 Convergencia de la función Fitness y función objetivo para el caso IEEE 69 barras

El resultado de la función objetivo de la red de distribución de la IEEE 33 barras se muestra en la Figura 4.9.

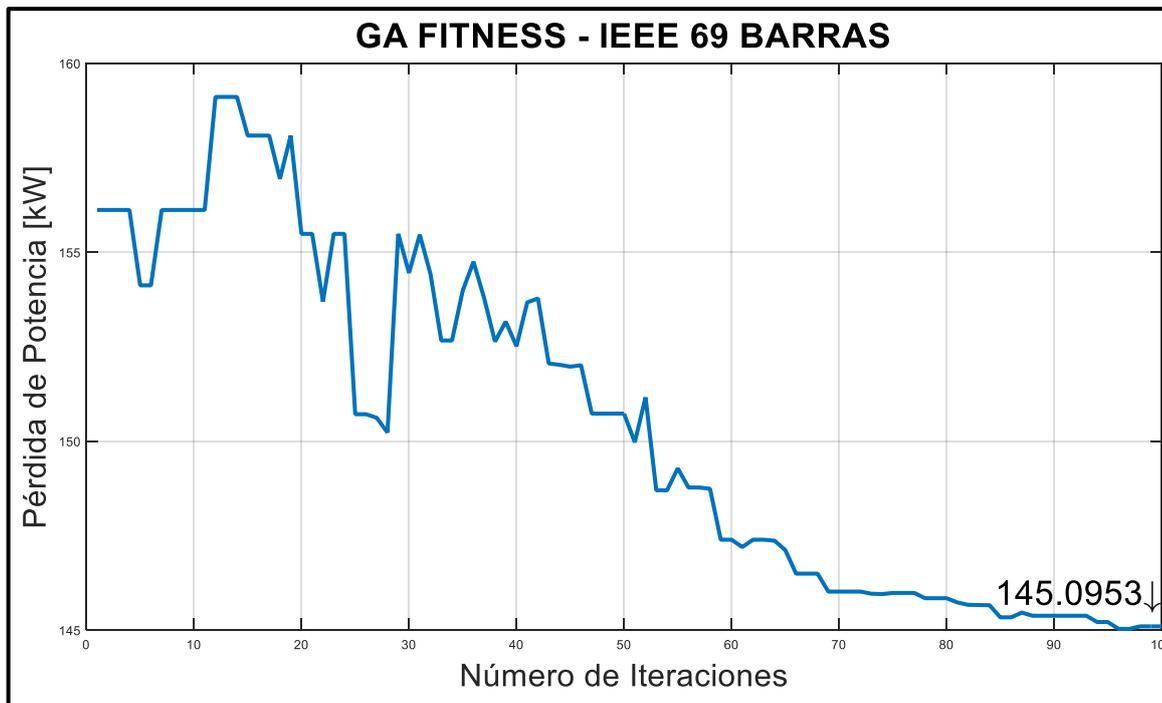


Figura 4.9: Convergencia GA IEEE 69 Barras

Los ejes de la gráfica representan las pérdidas de potencia en [kW] versus el número de la iteración. Se puede observar el establecimiento de las pérdidas de potencia en el sistema, el cual varía aleatoriamente pues este algoritmo se caracteriza por escoger sus mejores soluciones basadas en mutaciones y en reproducciones, y por cada iteración la solución que toma no es necesariamente la mejor. Razón por la cual la gráfica presenta esa forma en particular, bastante esporádica; teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se observa que este método toma más iteraciones en converger con respecto al anterior, para este caso se tiene una convergencia en la iteración 89 con una reducción de pérdidas de 145.0953 [kW], a pesar de que este método tome un poco más de tiempo, es importante recalcar que la solución es notablemente mejor al método anterior, mostrando un resultado contundente en comparación al algoritmo ACO.

4.5.3 Convergencia de la función Fitness y función objetivo para el caso Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos

El resultado de la función objetivo de la red de distribución de la IEEE 33 barras se muestra en la Figura 4.10.

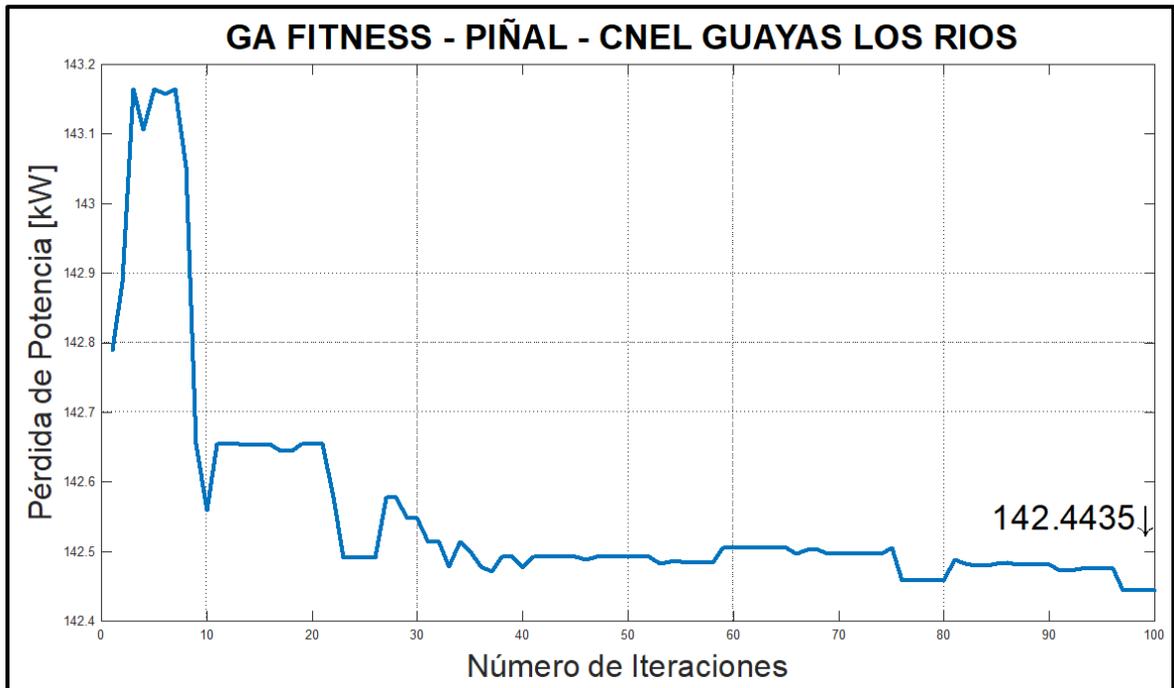


Figura 4.10: Convergencia GA Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos

Los ejes de la gráfica representan las pérdidas de potencia en [kW] versus el número de la iteración. Se puede observar el establecimiento de las pérdidas de potencia en el sistema, el cual varía aleatoriamente pues este algoritmo se caracteriza por escoger sus mejores soluciones basadas en mutaciones y en reproducciones, y por cada iteración la solución que toma no es necesariamente la mejor. Razón por la cual la gráfica presenta esa forma en particular, bastante esporádica; teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado se observa que este método toma más iteraciones en converger con respecto al anterior, para este caso se tiene una convergencia en la iteración 89 con una reducción de pérdidas de 142.4435 [kW], a pesar de que este método tome un poco más de tiempo, es importante recalcar que la solución es ligeramente mejor al método anterior.

4.6 Perfiles de voltaje por barra: Sin compensación reactiva y con compensación reactiva mediante los Bancos de capacitores utilizando el método de colonia de hormigas

Para esta sección se muestran los perfiles de voltaje de las redes de distribución de la IEEE 33 barras, IEEE 69 barras, y red del Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos con o sin compensación reactiva que proporcionan los bancos de capacitores que fueron instalados y dimensionados con el algoritmo de optimización colonia de hormigas ACO, cabe recalcar que para el Alimentador Piñal se tienen los perfiles de voltaje por fase desbalanceados.

4.6.1 Perfil de voltajes para el caso IEEE 33 barras

Los perfiles de voltaje de cada una de las barras de la red de distribución se muestran a continuación. En la Figura 4.11 se muestra el perfil de voltaje de la red IEEE 33 barras la cual se le aplicó el método de colonia de hormigas.

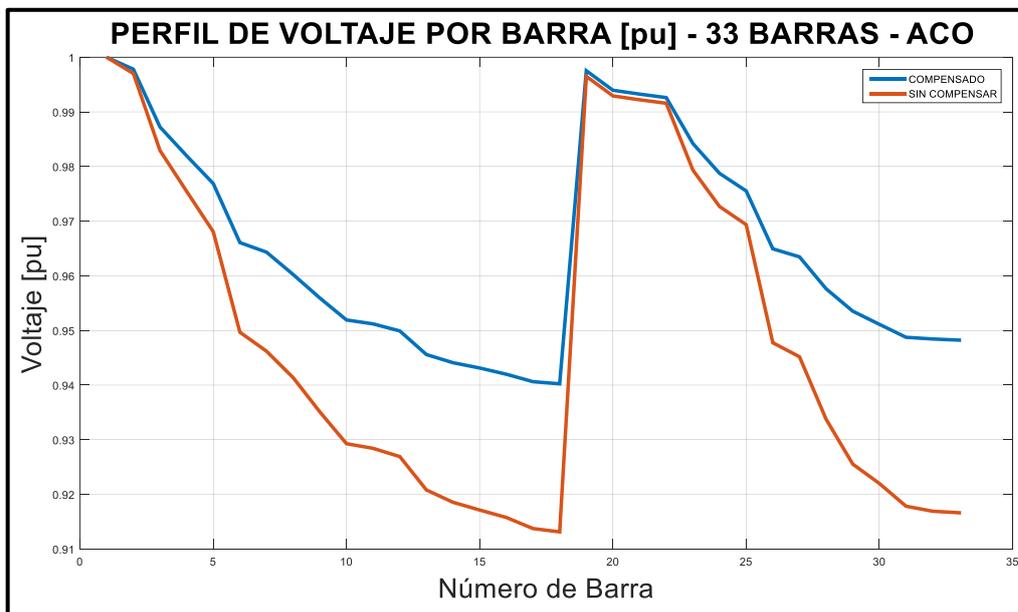


Figura 4.11: Perfil de tensión ACO IEEE 33 Barras

Se puede observar que hay una mejora en el perfil de voltaje con respecto a los valores iniciales que no se encuentran compensados. Entre las barras seis y dieciocho se encuentra el mayor porcentaje de compensación pues son las barras que se encuentran más alejadas a la fuente externa.

Se aprecia que, además, los mínimos valores de voltaje en p.u. luego de la compensación reactiva, superan aproximadamente el valor de 0.94 en p.u. de voltaje, considerando que ningún nivel de tensión supera el 1 p.u., lo cual nos asegura que el perfil de voltaje se encuentra dentro de los rangos admisibles del +/- 10%.

4.6.2 Perfiles de voltaje para el caso IEEE 69 barras

Los perfiles de voltaje de cada una de las barras de la red de distribución se muestran a continuación. En la Figura 4.12 se muestra el perfil de voltaje de la red IEEE 33 barras la cual se le aplicó el método de colonia de hormigas.

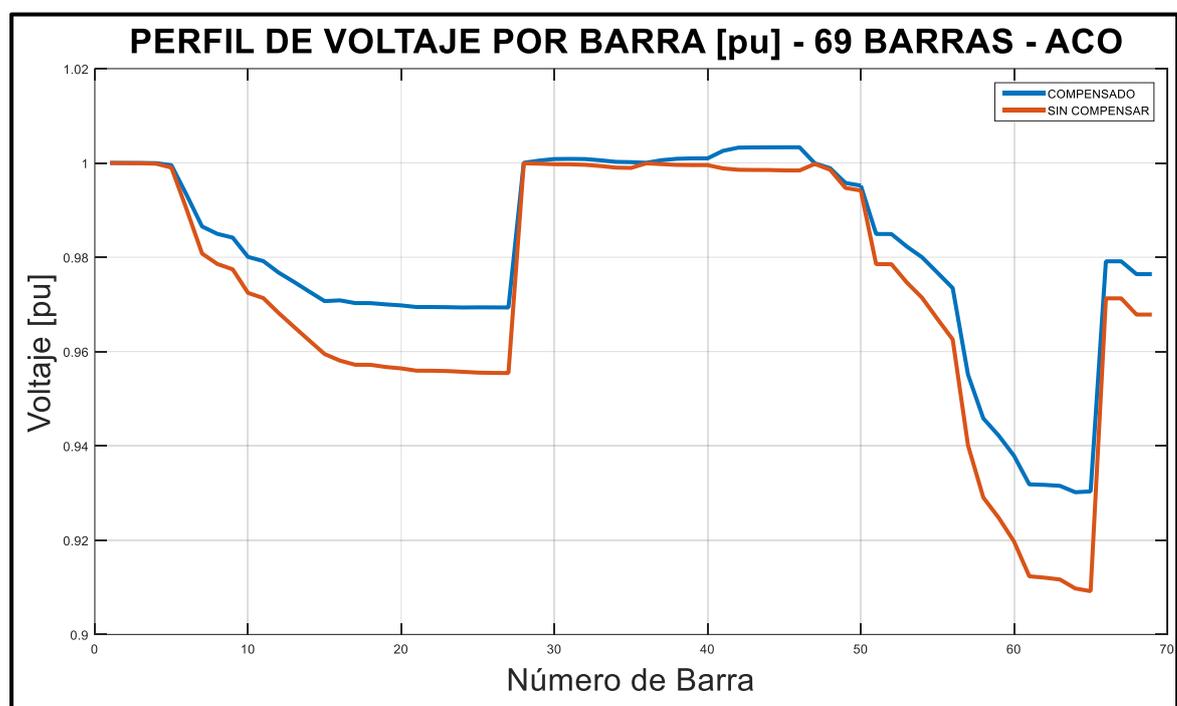


Figura 4.12: Perfil de tensión ACO IEEE 69 Barras

En este caso, en cambio, se observa una mejora en el perfil de voltaje con respecto a los valores iniciales que no se encuentran compensados. Entre las barras 57 y 66 se encuentra el mayor porcentaje de compensación pues en el ramal donde se encuentran esas barras se conectan el mayor número de capacitores.

Se aprecia que, además, los mínimos valores de voltaje en p.u. luego de la compensación reactiva, superan aproximadamente el valor de 0.93 en p.u. de voltaje, considerando que ningún nivel de tensión supera el 1.01 p.u., lo cual nos

asegura que el perfil de voltaje se encuentra dentro de los rangos admisibles del +/- 10%.

4.6.3 Perfil de voltajes para el caso Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos

Los perfiles de voltaje, mostrados en la Figura 4.13, Figura 4.14 y Figura 4.15, representan el voltaje por fase de cada una de las barras de la red de distribución, las cuales se muestran a continuación.

- Perfil de voltaje de la fase A

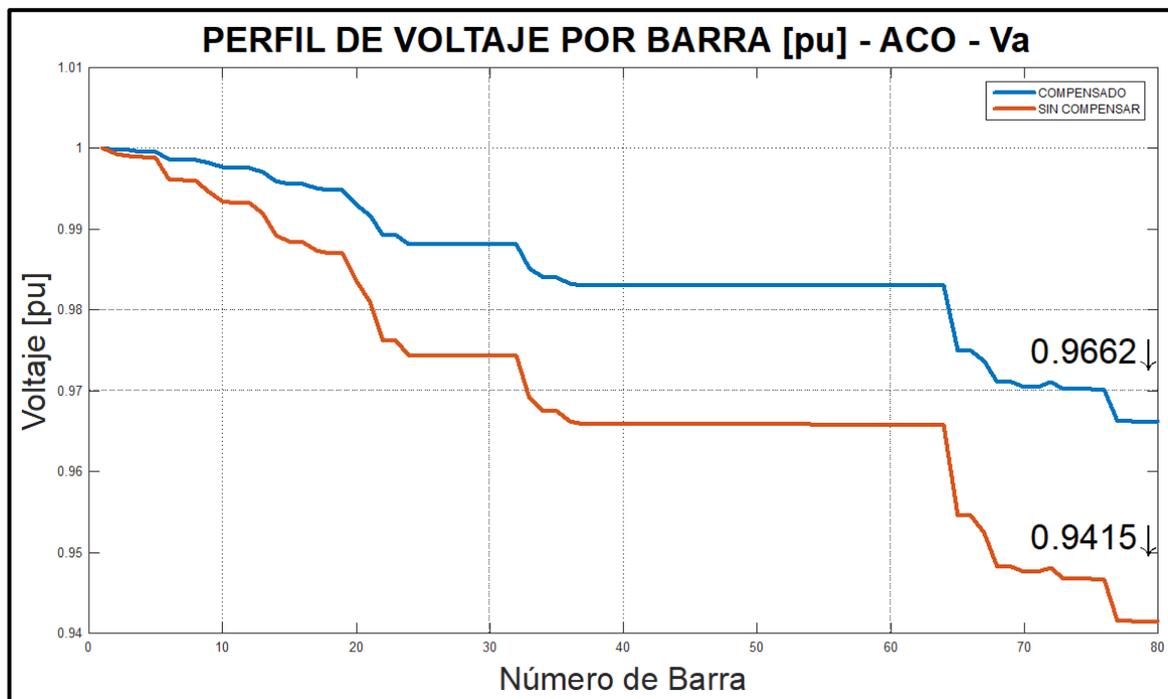


Figura 4.13: Perfil de tensión Fase A con ACO Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos

Se puede observar que hay una mejora en el perfil de voltaje con respecto a los valores iniciales que no se encuentran compensados para la Fase A, llegando a valores mínimos de 0.9662 en p.u. con compensación reactiva.

Se observa, además, que el valor mínimo de voltaje en p.u. se hallaba en un valor de 0.9415 en la barra trifásica más lejana del alimentador, que si bien, haciendo una comparación técnica, no tiene una mala calidad de servicio, aunque más adelante, se podrá notar el desbalance que presenta el sistema en las demás

fases, tal y como se muestra en la Figura 4.14 para la fase B y en la Figura 4.15 para el caso de la fase C.

- Perfil de voltaje de la fase B

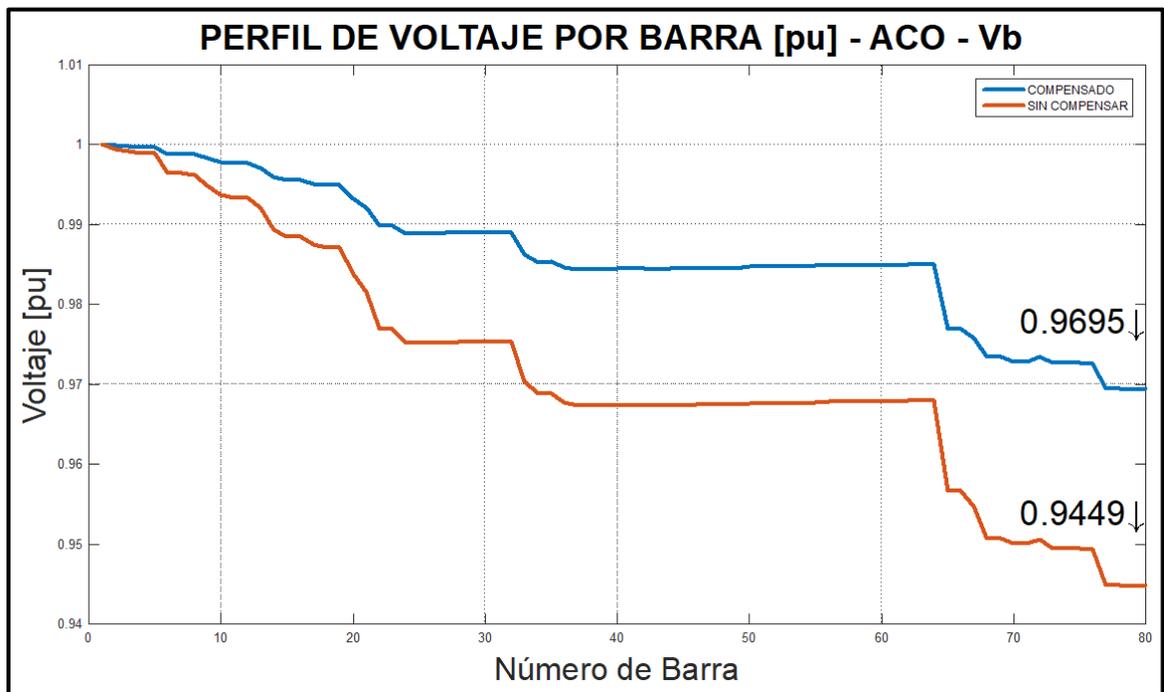


Figura 4.14: Perfil de tensión Fase B con ACO Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos

Se puede observar que hay una mejora en el perfil de voltaje con respecto a los valores iniciales que no se encuentran compensados para la Fase A, llegando a valores mínimos de 0.9695 en p.u. con compensación reactiva.

Se observa, además, que el valor mínimo de voltaje en p.u. se hallaba en un valor de 0.9449 en la barra trifásica más lejana del alimentador, que si bien, haciendo una comparación técnica, no tiene una mala calidad de servicio.

- Perfil de voltaje de la fase C

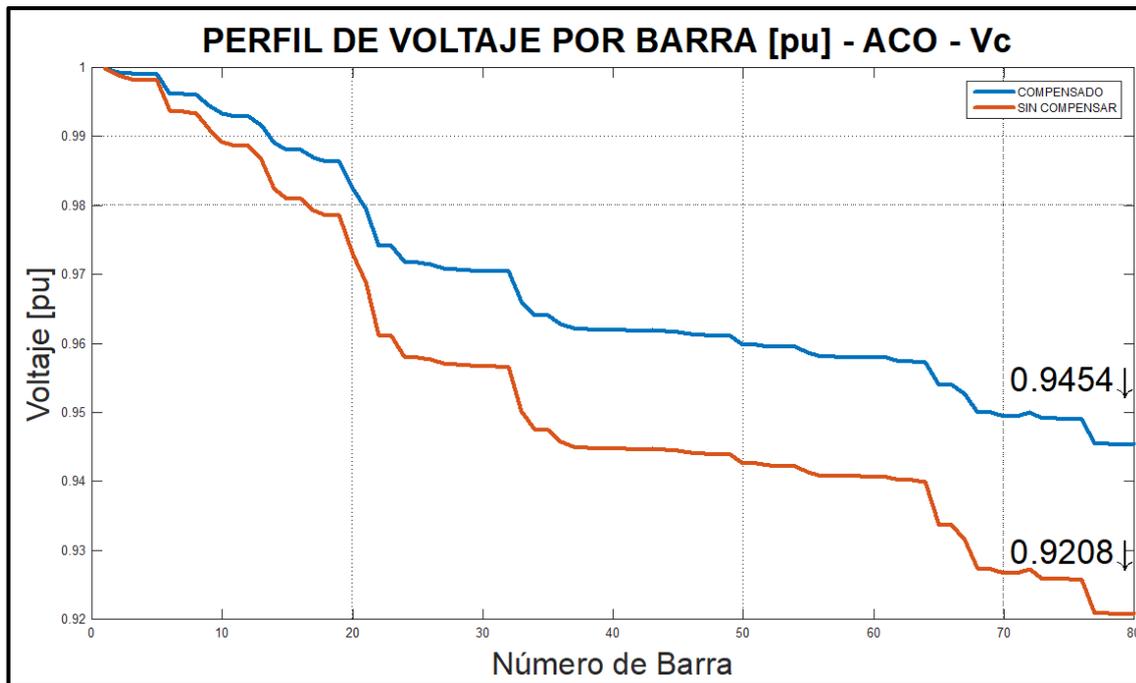


Figura 4.15: Perfil de tensión Fase C con ACO Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos

Se puede observar que hay una mejora en el perfil de voltaje con respecto a los valores iniciales que no se encuentran compensados para la Fase A, llegando a valores mínimos de 0.9454 en p.u. con compensación reactiva.

Se observa, además, que el valor mínimo de voltaje en p.u. se hallaba en un valor de 0.9208 en la barra trifásica más lejana del alimentador.

Una clara diferencia en este caso es que, como muestra la Figura 4.15, la Fase C muestra la mayor cantidad de desbalance del sistema, debido a su mayor cargabilidad en las líneas provocado por la concentración de demanda monofásica en la Fase C.

4.7 Perfiles de voltaje por barra: Sin compensación reactiva y con compensación reactiva mediante los Bancos de capacitores utilizando el método de Algoritmo genético

Para esta sección se muestran los perfiles de voltaje de las redes de distribución de la IEEE 33 barras, IEEE 69 barras, y red del Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos con o sin compensación reactiva que proporcionan los bancos de capacitores que fueron instalados y dimensionados con el algoritmo genético

GA, cabe recalcar que para el Alimentador Piñal se tienen los perfiles de voltaje por fase desbalanceados.

4.7.1 Perfil de voltajes para el caso IEEE 33 barras

Los perfiles de voltaje de cada una de las barras de la red de distribución se muestran a continuación. En la Figura 4.16 se muestra el perfil de voltaje de la red IEEE 33 barras la cual se le aplicó el método de colonia de hormigas.

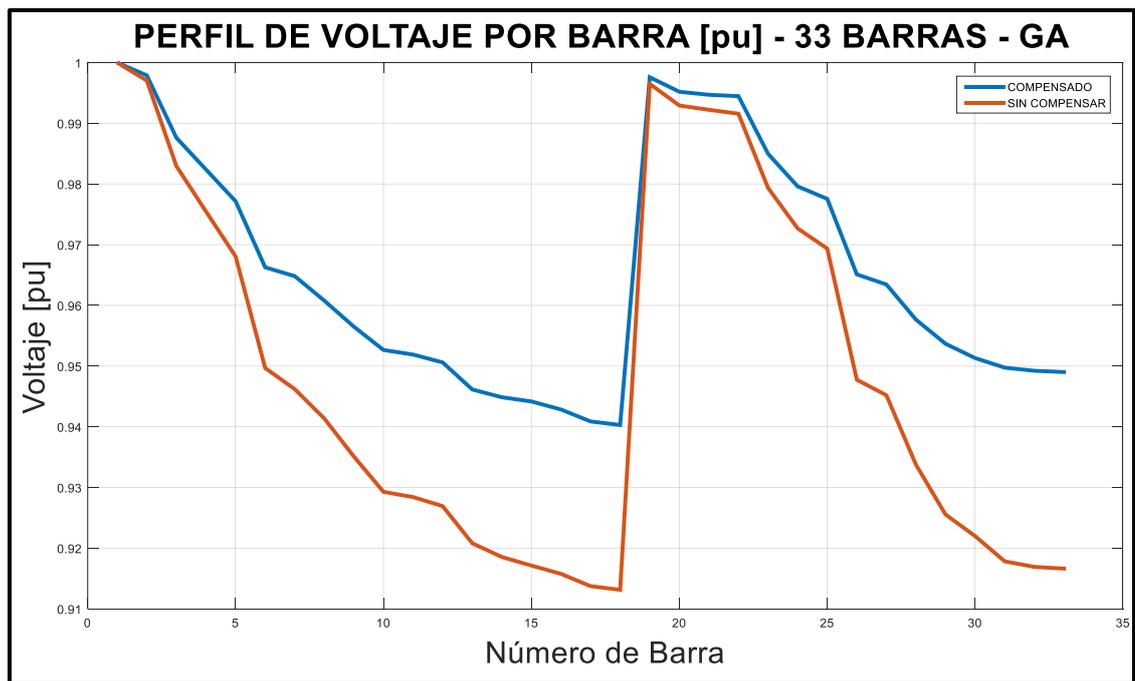


Figura 4.16: Perfil de tensión GA IEEE 33 Barras

Se puede observar que hay una mejora en el perfil de voltaje con respecto a los valores iniciales que no se encuentran compensados. Entre las barras seis y dieciocho se encuentra el mayor porcentaje de compensación pues son las barras que se encuentran más alejadas a la fuente externa.

Se aprecia que, además, los mínimos valores de voltaje en p.u. luego de la compensación reactiva, superan aproximadamente el valor de 0.94 en p.u. de voltaje, considerando que ningún nivel de tensión supera el 1 p.u., lo cual nos asegura que el perfil de voltaje se encuentra dentro de los rangos admisibles del +/-10%.

4.7.2 Perfiles de voltaje para el caso IEEE 69 barras

Los perfiles de voltaje de cada una de las barras de la red de distribución se muestran a continuación. En la Figura 4.17 se muestra el perfil de voltaje de la red IEEE 33 barras la cual se le aplicó el método de colonia de hormigas

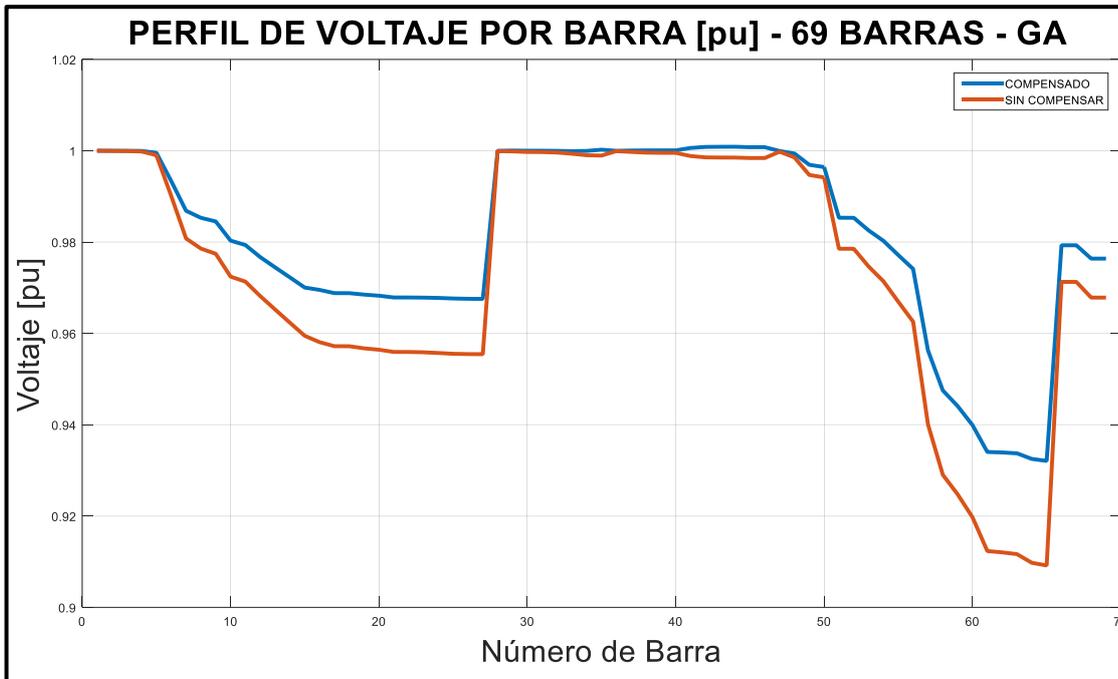


Figura 4.17: Perfil de tensión GA IEEE 69 Barras

En este caso, en cambio, se observa una mejora en el perfil de voltaje con respecto a los valores iniciales que no se encuentran compensados. Entre las barras 57 y 66 se encuentra el mayor porcentaje de compensación pues en el ramal donde se encuentran esas barras se conectan el mayor número de capacitores.

Se aprecia que, además, los mínimos valores de voltaje en p.u. luego de la compensación reactiva, superan aproximadamente el valor de 0.93 en p.u. de voltaje, considerando que ningún nivel de tensión supera el 1.005 p.u., lo cual nos asegura que el perfil de voltaje se encuentra dentro de los rangos admisibles del +/-10%.

4.7.3 Perfiles de voltaje para el caso Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos

Los perfiles de voltaje, mostrados en la Figura 4.18, Figura 4.19 y Figura 4.20, representan el voltaje por fase de cada una de las barras de la red de distribución, las cuales se muestran a continuación.

- Perfil de voltaje de la fase A

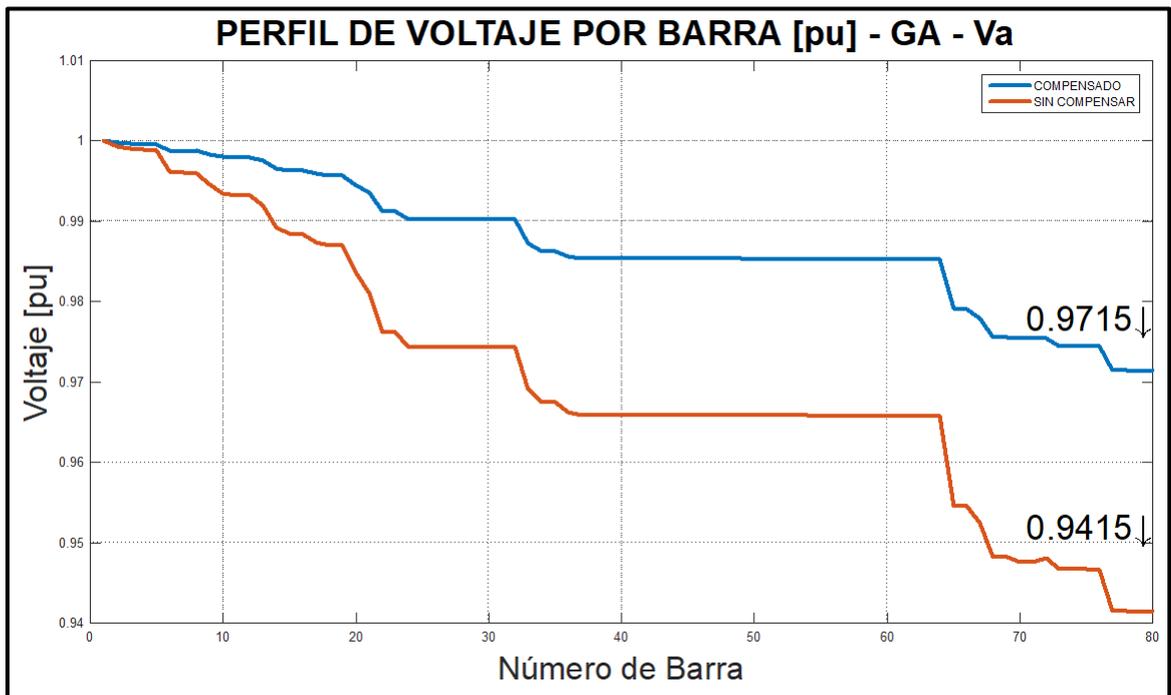


Figura 4.18: Perfil de tensión Fase A con GA Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos

Para este caso, con Algoritmo genético, se puede observar que hay una mejora en el perfil de voltaje con respecto a los valores iniciales que no se encuentran compensados para la Fase A, llegando a valores mínimos de 0.9715 en p.u. con compensación reactiva, mostrando mejoras significativas en comparación al algoritmo ACO.

Se observa, además, que el valor mínimo de voltaje en p.u. se hallaba en un valor de 0.9415 en la barra trifásica más lejana del alimentador, que si bien, haciendo una comparación técnica, no tiene una mala calidad de servicio, aunque más adelante, se podrá notar el desbalance que presenta el sistema en las demás fases, tal y como se muestra en la Figura 4.19 para la fase B y en la Figura 4.20 para el caso de la fase C.

- Perfil de voltaje de la fase B

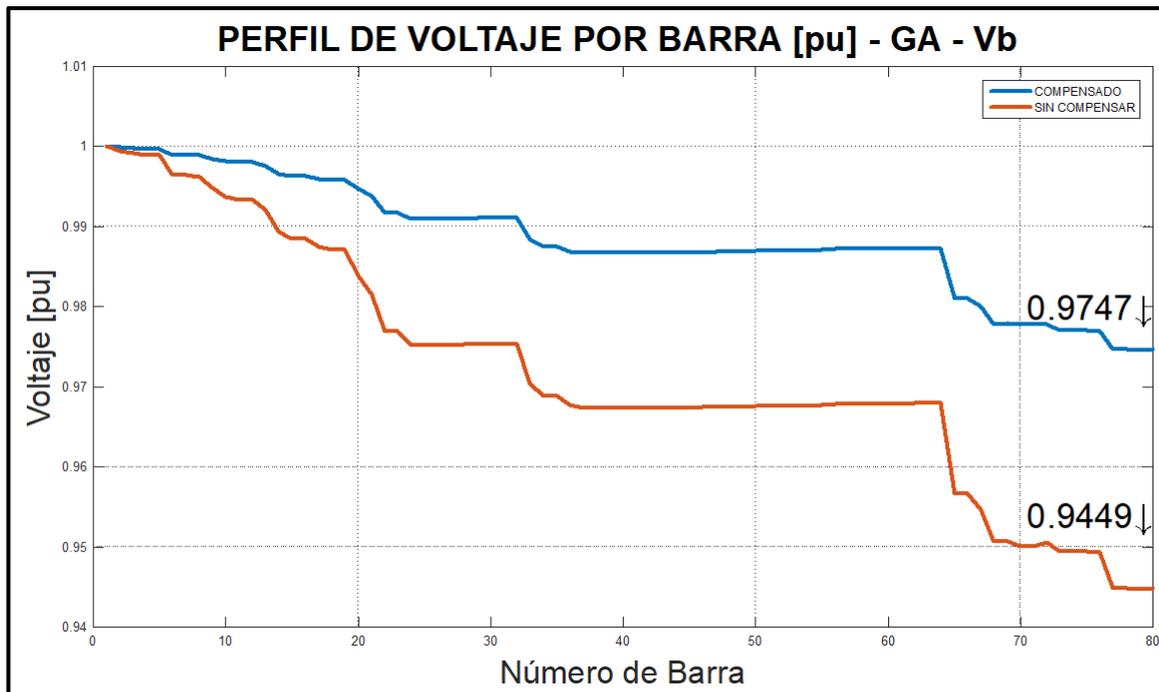


Figura 4.19: Perfil de tensión Fase B con GA Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos

Para el caso de la Fase B, se observa una mejora en el perfil de voltaje con respecto a los valores iniciales que no se encuentran compensados para la Fase B mostrada en la Figura 4.19, llegando a valores mínimos de 0.9747 en p.u. con compensación reactiva, mostrando mejoras significativas en comparación al algoritmo ACO.

Se observa, además, que el valor mínimo de voltaje en p.u. se hallaba en un valor de 0.9449 en la barra trifásica más lejana del alimentador, que si bien, haciendo una comparación técnica, no tiene una mala calidad de servicio.

- Perfil de voltaje de la fase C

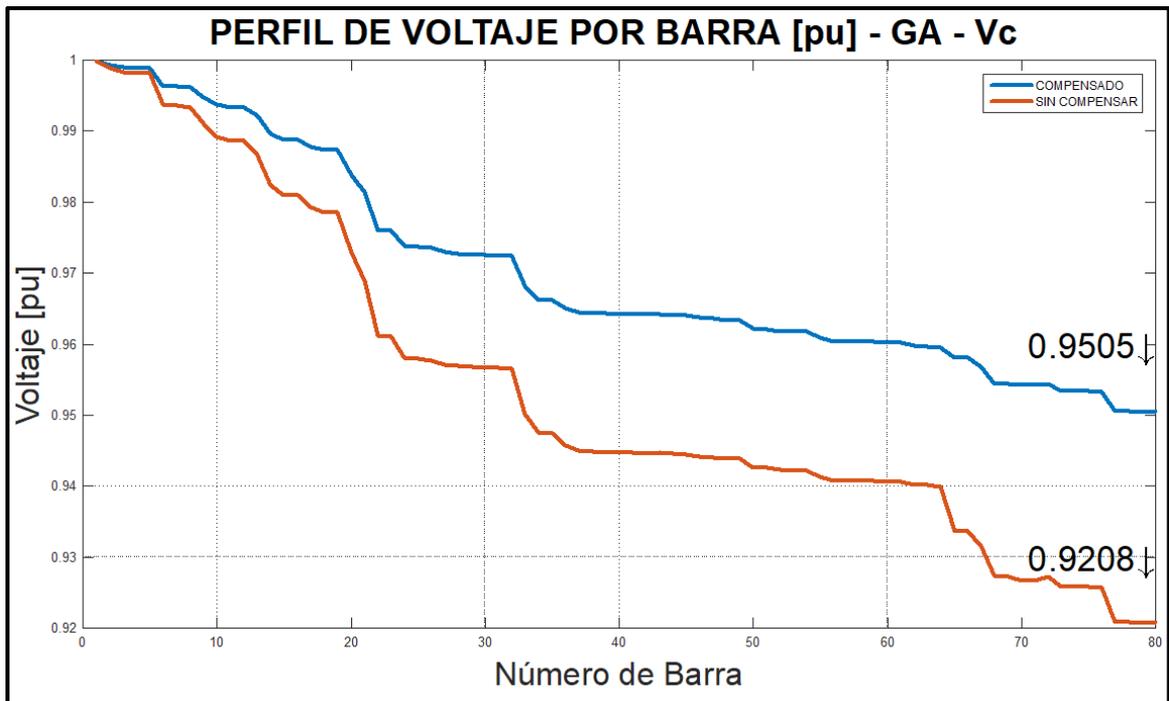


Figura 4.20: Perfil de tensión Fase C con GA Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos

Finalmente, se observa que para la Fase C también hay una mejora en el perfil de voltaje con respecto a los valores iniciales que no se encuentran compensados para la Fase C como muestra la Figura 4.20, llegando a valores mínimos de 0.9505 en p.u. con compensación reactiva.

Se observa, además, que el valor mínimo de voltaje en p.u. se hallaba en un valor de 0.9208 en la barra trifásica más lejana del alimentador.

Al igual que el caso del algoritmo ACO, se nota la clara diferencia en el perfil de tensión de la Fase C en comparación con las otras fases como muestra la Figura 4.18 y la Figura 4.19.

4.8 Resumen de los resultados con Algoritmo Colonia de Hormigas y Algoritmo genético

La reducción de pérdidas por cada algoritmo difiere en cada caso de estudio, y presentan diferentes soluciones en base a los Bancos de capacitores instalados y su dimensionamiento.

4.8.1 Resumen de resultados para el caso IEEE de 33 barras

La reducción de pérdidas obtenidas para el caso de IEEE de 33 barras se muestra en la Tabla 4.1, con una reducción final de más del 38%, lo cual se considera como un resultado prometedor para este sistema, pero se puede apreciar, además, que con el algoritmo ACO se instalan 18 Bancos de capacitores, mientras que con el Algoritmo genético (GA) se instalan 23 con una ligera diferencia en la reducción de pérdidas, siendo menor en comparación al algoritmo ACO. Estos resultados son cruciales para la toma de decisiones en la empresa eléctrica considerando el respectivo análisis económico.

RESULTADOS	Sin Optimizar	ACO	GA
Pérdidas [kW]	211,2000	130,3282	130,0152
Reducción [%]	0%	38,29%	38,44%
Bancos de Capacitores	0	18	23

Tabla 4.1: Resumen de la reducción de pérdidas y Bancos de capacitores Instalados - Caso IEEE 33 barras

4.8.2 Resumen de resultados para el caso de IEEE de 69 barras

La reducción de pérdidas obtenidas para el caso de IEEE de 69 barras se muestra en la Tabla 4.2 con una reducción final de más del 38%, lo cual se considera como un resultado prometedor para este sistema, pero se puede apreciar, además, que con el algoritmo ACO se instalan 36 Bancos de capacitores, mientras que con el Algoritmo genético (GA) se instalan 30 con una diferencia contundente en la reducción de pérdidas en comparación al algoritmo ACO. Estos resultados son cruciales para la toma de decisiones en la empresa eléctrica considerando el respectivo análisis económico.

RESULTADOS	Sin Optimizar	ACO	GA
Pérdidas [kW]	224,9300	149,9572	145,0953
Reducción [%]	0%	33,33%	35,49%
Bancos de Capacitores	0	36	30

Tabla 4.2: Resumen de la reducción de pérdidas y Bancos de capacitores Instalados - Caso IEEE 69 barras

4.8.3 Resumen de resultados para el caso de estudio real del Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas Los Ríos

La reducción de pérdidas obtenidas para el caso de IEEE de 69 barras se muestra en la Tabla 4.3 con una reducción final menor al 5%, lo cual se considera como un resultado poco prometedor para este sistema, pero se puede apreciar, además, que con el algoritmo ACO se instalan once Bancos de capacitores, mientras que con el Algoritmo genético (GA) se instalan catorce con una diferencia despreciable en la reducción de pérdidas en comparación al algoritmo ACO. Estos resultados son cruciales para la toma de decisiones en la empresa eléctrica considerando el respectivo análisis económico.

RESULTADOS	Sin Optimizar	ACO	GA
Pérdidas [kW]	149,3297	142,5086	142,4435
Reducción [%]	0%	4,57%	4,61%
Bancos de Capacitores	0	11	14

Tabla 4.3: Resumen de la reducción de pérdidas y Bancos de capacitores Instalados - Alimentador Piñal CNEL EP Guayas Los Ríos

4.9 Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados utilizando el Algoritmo ACO

En esta sección se presentarán los resultados de los Bancos de capacitores dimensionados e instalados para la minimización de las pérdidas en cada caso de estudio, pero mediante el uso del algoritmo Colonia de hormigas.

4.9.1 Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso IEEE de 33 barras

La información que se mostrará a continuación detalla los bancos de capacitores que se necesitaron instalar en la red de distribución IEEE 33 barras, para la cual se tiene la reducción de pérdidas y mejoramiento del perfil de voltaje.

CAPACITOR BARRA	ESTADO	DIMENSIÓN x10 KVAR	CAPACITOR BARRA	ESTADO	DIMENSIÓN x10 KVAR
32	1	2	26	1	4
31	0	0	25	1	4
30	1	24	24	1	7
29	1	2	23	1	7
5	1	25	22	0	0
4	1	39	20	1	7
3	1	2	19	1	4
2	1	25	17	1	7
9	1	2	16	0	0
10	1	25	28	0	0
11	1	2	15	1	6
1	1	21	14	1	7
8	1	5	13	1	25
7	0	0	12	0	0
6	1	16	21	0	0
27	0	0	18	0	0
			TOTAL	23	268

Tabla 4.4: Valores de estado de servicio y dimensión de reactivos por cada Banco de capacitores para el caso de 33 barras utilizando el algoritmo ACO

Se aprecia en la Tabla 4.4 los valores de reactiva de cada capacitor, el cual se encuentra en estado de servicio conectado a la barra que indica en la fila “CAPACITOR BARRA”, el resultado final muestra la cantidad total de Bancos de capacitores instalados y su total de reactivo que inyecta a la red, valores los cuales son 23 Bancos de capacitores instalados y 2680 [kVAR].

4.9.2 Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso IEEE de 69 barras

La información que se mostrará a continuación detalla los bancos de capacitores que se necesitaron instalar en la red de distribución IEEE 69 barras, para la cual se tiene la reducción de pérdidas y mejoramiento del perfil de voltaje.

CAPACITOR BARRA	ESTADO	DIMENSIÓN x10 KVAR	CAPACITOR BARRA	ESTADO	DIMENSIÓN x10 KVAR
10	0	0	41	0	0
11	0	0	42	1	14
12	1	4	43	0	0
13	1	6	44	1	16
14	0	0	45	0	0
15	0	0	46	1	13
16	0	0	47	1	14
17	0	0	48	0	0
18	1	10	49	1	16
19	1	10	5	0	0
2	1	9	50	0	0
20	0	0	51	1	3
21	1	6	52	0	0
22	0	0	53	1	16
23	0	0	54	1	13
24	0	0	55	1	14
25	1	3	56	1	4
26	1	10	57	1	16
27	0	0	58	1	3
28	1	10	59	1	3
29	0	0	6	1	4
3	0	0	60	1	16
30	1	19	61	1	13
31	1	26	62	1	24
32	1	10	63	1	16
33	0	0	64	0	0
34	0	0	65	1	24
35	0	0	68	0	0
36	1	19	69	0	0
37	1	14	66	1	4
38	0	0	67	0	0
39	1	16	7	0	0
4	1	10	8	0	0
40	0	0	9	0	0
			TOTAL	36	428

Tabla 4.5: Valores de estado de servicio y dimensión de reactivos por cada Banco de capacitores para el caso de 69 barras utilizando el algoritmo ACO

Se aprecia en la Tabla 4.5 los valores de reactiva de cada capacitor, el cual se encuentra en estado de servicio conectado a la barra que indica en la fila

“CAPACITOR BARRA”, el resultado final muestra la cantidad total de Bancos de capacitores instalados y su total de reactivo que inyecta a la red, valores los cuales son 36 Bancos de capacitores instalados y 4280 [kVAR].

4.9.3 Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso de estudio del Alimentador Piñal CNEL EP Guayas Los Ríos

La información que se mostrará a continuación detalla los bancos de capacitores que se necesitaron instalar en la red Alimentador Piñal CNEL EP Guayas Los Ríos, para la cual se tiene la reducción de pérdidas y mejoramiento del perfil de voltaje.

CAPACITOR BARRA	ESTADO	DIMENSIÓN x10 KVAR	CAPACITOR BARRA	ESTADO	DIMENSIÓN x10 KVAR
2	1	9	13	0	0
3	1	19	14	1	10
4	0	0	15	0	0
5	0	0	17	0	0
22	0	0	18	1	10
23	1	10	20	0	0
25	0	0	21	0	0
66	0	0	24	0	0
70	0	0	33	1	10
71	0	0	34	0	0
76	0	0	36	0	0
77	0	0	37	1	10
79	1	10	65	0	0
80	0	0	67	0	0
6	0	0	68	1	10
8	0	0	72	0	0
9	1	10	73	0	0
10	0	0	74	1	10
11	0	0	TOTAL	11	118

Tabla 4.6: Valores de estado de servicio y dimensión de reactivos por cada Banco de capacitores para el caso del Alimentador Piñal CNEL EP Guayas Los Ríos utilizando el algoritmo ACO

Se aprecia en la Tabla 4.6 los valores de reactiva de cada capacitor, el cual se encuentra en estado de servicio conectado a la barra que indica en la fila “CAPACITOR BARRA”, el resultado final muestra la cantidad total de Bancos de capacitores instalados y su total de reactivo que inyecta a la red, valores los cuales son 11 Bancos de capacitores instalados y 1180 [kVAR].

4.10 Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados utilizando el Algoritmo Genético

En esta sección se presentarán los resultados de los Bancos de capacitores dimensionados e instalados para la minimización de las pérdidas en cada caso de estudio, pero mediante el uso del Algoritmo genético.

4.10.1 Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso IEEE de 33 barras

La información que se mostrará a continuación detalla los bancos de capacitores que se necesitaron instalar en la red de distribución IEEE 33 barras, para la cual se tiene la reducción de pérdidas y mejoramiento del perfil de voltaje.

CAPACITOR BARRA	ESTADO	DIMENSIÓN x10 KVAR	CAPACITOR BARRA	ESTADO	DIMENSIÓN x10 KVAR
9	0	0	23	1	21
8	1	8	24	0	0
10	1	20	25	1	29
11	0	0	26	1	20
12	0	0	27	0	0
13	0	0	28	0	0
14	0	0	29	1	25
15	1	22	3	0	0
16	0	0	30	1	28
17	0	0	31	1	26
18	0	0	32	1	15
19	1	9	33	1	2
2	1	29	4	1	15
20	1	7	5	1	6
21	0	0	6	0	0
22	1	7	7	1	4
			TOTAL	18	293

Tabla 4.7: Valores de estado de servicio y dimensión de reactivos por cada Banco de capacitores para el caso de 33 barras utilizando el Algoritmo genético

Se aprecia en la Tabla 4.7 los valores de reactiva de cada capacitor, el cual se encuentra en estado de servicio conectado a la barra que indica en la fila "CAPACITOR BARRA", el resultado final muestra la cantidad total de Bancos de capacitores instalados y su total de reactivo que inyecta a la red, valores los cuales son 18 Bancos de capacitores instalados y 2930 [kVAR].

4.10.2 Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso IEEE de 69 barras

La información que se mostrará a continuación detalla los bancos de capacitores que se necesitaron instalar en la red de distribución IEEE 69 barras, para la cual se tiene la reducción de pérdidas y mejoramiento del perfil de voltaje.

CAPACITOR BARRA	ESTADO	DIMENSIÓN x10 KVAR	CAPACITOR BARRA	ESTADO	DIMENSIÓN x10 KVAR
10	1	12	41	0	0
11	0	0	42	0	0
12	1	2	43	0	0
13	0	0	44	1	23
14	1	3	45	0	0
15	1	7	46	0	0
16	0	0	47	1	23
17	0	0	48	1	22
18	0	0	49	1	27
19	1	9	5	0	0
2	1	9	50	1	4
20	0	0	51	1	16
21	0	0	52	0	0
22	0	0	53	0	0
23	0	0	54	0	0
24	1	10	55	0	0
25	1	3	56	1	17
26	0	0	57	0	0
27	0	0	58	1	4
28	0	0	59	1	19
29	1	2	6	1	6
3	1	4	60	1	19
30	0	0	61	1	27
31	0	0	62	1	20
32	0	0	63	1	12
33	0	0	64	1	26
34	0	0	65	1	4
35	1	11	68	0	0
36	0	0	69	0	0
37	0	0	66	0	0
38	0	0	67	0	0
39	0	0	7	0	0
4	1	2	8	0	0
40	1	1	9	1	20
			TOTAL	30	364

Tabla 4.8: Valores de estado de servicio y dimensión de reactivos por cada Banco de capacitores para el caso de 69 barras utilizando el Algoritmo genético

Se aprecia en la Tabla 4.8 los valores de reactiva de cada capacitor, el cual se encuentra en estado de servicio conectado a la barra que indica en la fila “CAPACITOR BARRA”, el resultado final muestra la cantidad total de Bancos de capacitores instalados y su total de reactivo que inyecta a la red, valores los cuales son 30 Bancos de capacitores instalados y 3640 [kVAR].

4.10.3 Ubicación y dimensión de los Bancos de capacitores instalados para el caso de estudio del Alimentador Piñal CNEL EP Guayas Los Ríos

La información que se mostrará a continuación detalla los bancos de capacitores que se necesitaron instalar en la red Alimentador Piñal CNEL EP Guayas Los Ríos, para la cual se tiene la reducción de pérdidas y mejoramiento del perfil de voltaje.

CAPACITOR BARRA	ESTADO	DIMENSIÓN x10 KVAR	CAPACITOR BARRA	ESTADO	DIMENSIÓN x10 KVAR
2	1	14	13	0	0
3	0	0	14	0	0
4	0	0	15	1	5
5	0	0	17	0	0
22	0	0	18	1	3
23	1	5	20	1	2
25	0	0	21	1	15
66	1	10	24	1	8
70	1	16	33	1	2
71	0	0	34	0	0
76	0	0	36	0	0
77	1	17	37	0	0
79	0	0	65	1	5
80	0	0	67	0	0
6	0	0	68	0	0
8	0	0	72	0	0
9	0	0	73	0	0
10	1	4	74	0	0
11	1	7	TOTAL	14	113

Tabla 4.9: Valores de estado de servicio y dimensión de reactivos por cada Banco de capacitores para el caso del Alimentador Piñal CNEL EP Guayas Los Ríos utilizando el Algoritmo genético

Se aprecia en la Tabla 4.9 los valores de reactiva de cada capacitor, el cual se encuentra en estado de servicio conectado a la barra que indica en la fila “CAPACITOR BARRA”, el resultado final muestra la cantidad total de Bancos de capacitores instalados y su total de reactivo que inyecta a la red, valores los cuales son 14 Bancos de capacitores instalados y 1130 [kVAR].

En esta tabla podemos contrastar los resultados obtenidos en el caso de utilizar el algoritmo ACO, en el cual obtenemos valores de 11 Bancos de capacitores instalados obteniendo un total de 1180 kVAR instalados, por lo cual, si se realiza un análisis de costo beneficio tomando en cuenta la cantidad y la capacidad total instalada, es posible tener una determinación en la selección de una solución para el problema de caso real que se tiene como estudio de esta investigación, ya que este proyecto, deja en libertad el análisis económico de la empresa eléctrica.

Capítulo 5. Discusión

Capítulo 5. Discusión

5.1	Introducción.....	99
5.2	Datos de entrada.....	99
5.3	Datos de salida	102
5.4	Elección de los Métodos de solución.....	103
5.5	Contrastes de los dos métodos heurísticos seleccionados.....	104
5.6	Reconciliación con otros métodos heurísticos.....	105

5.1 Introducción

En este capítulo se realizará una discusión detallada de los datos de entrada, datos de salida producto de la metodología aplicada a los casos de estudio, y se realizará la discusión crítica de la selección de los métodos heurísticos para la solución del problema en conjunto con una discusión crítica y técnica del contraste entre ambos métodos seleccionados. En base a lo mencionado, se realizarán los respectivos análisis y las respectivas reflexiones de lo comprobado y obtenido en el capítulo de resultados, tomando en consideración la respuesta del sistema de distribución para cada caso de estudio, analizando la eficiencia y eficacia de cada método heurístico seleccionado (Optimización por Colonia de Hormigas y Algoritmo genético).

Para finalizar el capítulo de discusión, se hará una mención crítica de ciertas sugerencias propuestas que pueden seguirse para realizar mejoras futuras en los contenidos principales de la metodología para obtener resultados con mayor gama de aplicaciones, con mayor eficiencia y mayor eficacia.

En la Sección 5.2 correspondiente a los datos de entrada, se explica la confiabilidad de los datos obtenidos de las fuentes utilizadas; la Sección 5.3 correspondiente a los datos de salida, discute los resultados obtenidos en los casos de estudio en relación a otros estudios pertinentes ya realizados, las posibles limitantes que posteriormente serán concluidas en el Capítulo 6, y la coherencia general de todos los datos resultados; la Sección 5.4 discute la selección crítica de los dos métodos heurísticos para las soluciones del problema de forma detallada en distintos aspectos (Aspectos matemáticos, computaciones, etc); finalmente, la Sección 5.5 discute el contraste entre ambos métodos, dando una comparación crítica constructiva entre ellos.

5.2 Datos de entrada

Entre los datos de entrada obtenidos, se tienen dos casos de estudio, los cuales son sistemas de prueba propuestos por la IEEE; están los sistemas de distribución radial con un solo alimentador de 33 y 69 Barras de la IEEE, sistemas los cuales son dedicados para estudios enfocados en los sistemas de distribución eléctrica,

y dado que son ejemplos propuestos, sus valores de demanda eléctrica, impedancias de las líneas de distribución del sistema, entre otros, se encuentran totalmente disponibles en la red de internet, en información oficial de la IEEE y/o en otros estudios e investigaciones realizados con los mismos casos.

Adicionalmente, se tiene un caso de estudio real conocido como el Alimentador Piñal, ubicado de la provincia Guayas como una red de distribución radial, su estudio fue realizado en el mismo software (DIgSILENT PowerFactory), pero en este caso, se obtuvo de forma muy diferente a los casos de estudio de la IEEE, para este sistema, mediante la Unidad de negocio CNEL EP Guayas Los Ríos, se obtuvieron los datos directamente de las redes SCADA de las unidades de planificación de la Subestación Durán; estos datos fueron dispuestos a través del software CYME como una Red de distribución realizada en un diagrama esquemático unifilar geo-referenciado, el software CYME se especializa para el estudio, análisis y monitoreo a tiempo real de redes de distribución eléctrica, por ende, fue necesario migrar todos los datos del sistema para la respectiva construcción de la Red de distribución radial del Alimentador Piñal. Se tienen como ejemplo las referencias en la Sección 3.2.

Los datos de los sistemas ejemplares de la IEEE, consta de cargas y líneas de transmisión balanceadas, que no es el caso del caso de estudio real, en el cual los datos obtenidos por CNEL EP Guayas Los Ríos, son datos de demanda y líneas de transmisión reales, los cuales describen un sistema de potencia totalmente desbalanceado, por ende, la metodología varía en comparación a los casos de estudio de la IEEE, debido a que se debe evaluar los objetivos a partir del flujo de potencia, el cual es muy diferente cuando se realizada para sistemas desbalanceados, para lo cual se introdujo el método de flujo de potencia desbalanceado para la solución a cualquier sistema de distribución.

Los datos de entrada para los algoritmos heurísticos realizados en el lenguaje DPL en conjunto con el sistema de potencia modela en la consola de PowerFactory, han sido establecidos mediante ensayos previos dependiendo de la complejidad del caso estudio seleccionado para su evaluación. Estos datos de entrada son básicamente parámetros utilizados para la resolución de los algoritmos realizados

en códigos de programación. Los datos de entradas característicos de ambos métodos son:

- El valor de los pasos de capacitancia máximos para cada Banco de capacitores, el cual se define en ambos algoritmos como la variable “Steps”, y que depende del valor de cada paso de capacitancia definido.
- El valor del paso individual de capacitancia definido para obtener la capacidad máxima del Banco de capacitores, el cual se define en ambos algoritmos como la variable “MVAR”.
- Para el algoritmo Colonia de Hormigas, se debe definir un parámetro de alto grado de importancia para su efectiva convergencia, el cual es el parámetro de Evaporización de feromonas, el cual es factor numérico tipo entero real (int) con valores entre cero y uno, y que se define en este algoritmo como la variable “rho”, usualmente la variable “rho” tiende a tener valores pequeños (Entre 0,10 y 0,30) para sistemas de baja complejidad, que se caracterizan por ser sistemas con un número de barras candidatas a instalar Bancos de capacitores relativamente pequeños; en el caso de un sistema de alta complejidad, que se caracteriza por tener un número de barras candidatas relativamente elevado, la variable “rho” tiende tomar valores relativamente elevados (Entre 0,3 y 1).
- El número de iteraciones, el cual es un factor crítico para la convergencia de los algoritmos; para el caso del Algoritmo genético el número iteraciones se define como la variable “Generations”, el cual debe tener al menos 100 iteraciones para la obtención de una buena solución, que puede tener un valor mayor a 100 dependiendo de la complejidad del sistema de potencia; para el caso de Colonia de Hormigas el número de iteraciones se define como la variable “MaxIter”, el cual varía su convergencia en cantidad de iteraciones dependiendo de la complejidad del sistema, pero se recomienda que tenga mínimo 200 iteraciones, y mayor a 200 en caso de una mayor complejidad en el sistema de potencia.

5.3 Datos de salida

Los datos de salida obtenidos de los sistemas de distribución son los resultados obtenidos y analizados a lo largo del Capítulo 4. Estos resultados fueron contrastados entre ambos métodos utilizados para solución al problema, debido a sus diferencias en sus datos de salida, lo cual se basa en la estructura del algoritmo, que, además, repercute en la eficacia y la eficiencia de cada uno.

Los datos de salida obtenidos y relevantes para el desarrollo final del proyecto de investigación fueron los siguientes:

- Convergencia de la función objetivo (Pérdidas de potencia activa del sistema), mediante un gráfico mostrando el valor de la función objetivo por cada iteración hasta la convergencia, esto se realiza para cada método heurístico que posteriormente será una de las herramientas principales para el desarrollo de una comparación técnica entre ambos.
- Sistema de potencia resultante mostrando los Bancos de capacitores instalados y dimensionados en las barras designadas por cada algoritmo heurístico, sistema el cual se registra para realizar los respectivos análisis.
- Perfiles de tensión del sistema de distribución tomando cada barra como un punto del dominio de la gráfica de perfil de tensión, este resultado se obtiene para las 3 fases del sistema, ya que se consideran generalmente sistemas desbalanceados, por lo cual es altamente probable que se obtengan tensiones desequilibradas por cada fase. Únicamente en los casos de prueba de la IEEE de 33 y 69 barras se obtuvieron resultados balanceados del sistema, debido a su topología ideal para realizar estudios básicos y validación de métodos, pero para el caso de estudio real, el alimentador Piñal de CNEL EP Guayas Los Ríos, dieron resultados desbalanceados en todo el sistema, debido a su topología variada entre circuitos trifásicos, bifásicos y monofásicos, tal como se mostraría cualquier sistema de distribución real; esta diferencia en la topología de la red provocaría un alto nivel de desbalance en las variables del sistema, por ende, se hizo la obtención y análisis de las 3 fases en términos de perfil de voltajes mediante el flujo de potencia desequilibrado.

- Finalmente, un resumen de resultados, mostrando en detalle la reducción de las pérdidas de potencia activa, el número de Bancos de capacitores instalados por cada resultado en cada método heurístico utilizado y las dimensiones en [MVAR] por cada Banco de capacitores instalado, indicando la barra donde se realizó la ubicación y dimensionamiento. Esto nos permite concluir varios aspectos y diferencias entre los resultados de ambos métodos, y nos permitirá introducir un posible análisis costo – beneficio en base al análisis de costos tomando en cuenta la tasa de interés y el factor de recuperación de capital, variables las cuales obtendría la empresa eléctrica de distribución para la decisión más económica y segura para el sistema de distribución.

5.4 Elección de los Métodos de solución

Los algoritmos heurísticos disponibles para la solución a este problema eran numerosos y variados. La elección para estos 2 algoritmos heurísticos se realizó en base a su baja complejidad en comparación a los otros algoritmos heurísticos disponibles, ambos métodos han sido ampliamente utilizados para la realización de la Minimización de pérdidas en una red de distribución radial, por lo tanto, analizando la complejidad de los otros métodos y la eficacia de cada uno, decidimos utilizar el algoritmo Colonia de hormigas o más conocido como el algoritmo ACO (Ant colony optimization) y el Algoritmo genético, ambos métodos prestaban su estructura para la facilidad en la solución a un problema de variables tipo enteras mixtas, como es el caso de un problema de reducción de pérdidas mediante la ubicación y dimensionamiento de Bancos de capacitores.

En varias pruebas se observó la eficacia y eficiencia de cada algoritmo, que, en función del computador y la programación realizada, el tiempo de ejecución de cada algoritmo fue relativamente pequeño en comparación al tiempo que toman varios algoritmos heurísticos en diferentes investigaciones, tiempos mayores a los 30 min, mientras que los algoritmos realizados en lenguaje DPL – Power Factory, no superaron dicha cantidad de tiempo. Este tiempo de simulación por cada método se puede considerar como relativamente corto, por lo que para aplicaciones reales y la necesidad de varias ejecuciones, el tiempo que podría tomar no sería tan significativo, por ende, ambos algoritmos pueden ser

considerados como eficientes, pero los dos no son necesariamente eficaces, como es el caso del algoritmo Colonia de hormigas, el cual mostraba un mayor error en la mejor solución obtenida.

El aprendizaje de estos algoritmos heurísticos demanda un reto adicional para la investigación, debido a sus contenidos y modelos matemáticos involucrados en la estructura de sus metodologías, pero fueron considerados como el corazón del proyecto de investigación, siendo una herramienta necesaria y fundamental para obtener varios resultados, análisis y validaciones.

5.5 Contrastes de los dos métodos heurísticos seleccionados

Los métodos heurísticos seleccionados mostraron resultados prometedores, aunque la falta de una herramienta adicional para una mejor validación de ambos métodos fue un punto débil que vale la pena recalcar, y es un aspecto que será detallado en la sección 6.3 del capítulo de Conclusiones.

El método heurístico de Colonia de hormigas permitió obtener los resultados de convergencia por ejecución en tiempos relativamente muy bajos, inferior a los cinco minutos, estos resultados eran relativamente buenos en comparación a los resultados obtenidos en otras investigaciones y en comparación al Algoritmo genético que mostraba resultados similares en ciertos casos. El algoritmo Colonia de hormigas mostraba tantos buenos resultados como tanta complejidad contenía la red eléctrica de distribución modelada en el software de PowerFactory, por ende, los resultados obtenidos para el caso más sencillo, que fue el caso de estudio de la IEEE de 33 barras, fueron cercanos a los resultados obtenidos por el Algoritmo genético, con un error relativamente bajo entre ambos. Cabe recalcar que se considera al Algoritmo genético como el más eficaz en comparación al algoritmo Colonia de hormigas. Esta eficacia se de a revelar cuando el sistema de distribución presenta una complejidad mayor, como fue en el caso de la red de prueba de la IEEE de 69 barras, donde se nota una diferencia contundente entre los resultados de convergencia, lo cual se debe a la estructura del planteamiento del algoritmo Colonia de hormigas, el cual limita la eficacia del mismo.

El algoritmo Colonia de hormigas trabaja con una solución inicial, la cual se actualiza y tiende a mejorar por cada iteración, pero no es la mejor forma de obtener el óptimo global para este tipo de problemas, debido a que, en un problema de variables enteras mixtas, mientras más variables se tengan, la cantidad de combinaciones son tal que un algoritmo como el de Colonia de hormigas podría presentar problemas en las soluciones obtenidas de la convergencia. Fue por esta razón que la eficacia de este algoritmo se muestra inferior frente al Algoritmo genético, el cual es mucho más robusto en problemas de optimización con variables enteras mixtas, dado que el Algoritmo genético fue diseñado para optimizar problemas discretos y multivariantes.

El Algoritmo genético, en base a lo mencionado con respecto al algoritmo Colonia de hormigas, es el más eficaz, lo que se debe a su robustez ante el problema de minimización de pérdidas mediante ubicación y dimensionamiento óptimo de Bancos de capacitores en una red de distribución. En términos de eficiencia, entre en conflicto con el algoritmo Colonia de hormigas, porque si bien el algoritmo ACO demanda un menor tiempo de ejecución, su eficacia no supera al Algoritmo genético, y aunque el Algoritmo genético presenta un tiempo de ejecución mucho mayor (Alrededor de los 25 – 30 min, y dependiendo de la complejidad de la Red), este presentó una mayor precisión en la convergencia. Para motivos prácticos y de una respuesta rápida, si se trata de una red de distribución de baja complejidad, puede ser recomendado el algoritmo Colonia de hormigas, pero en casos de redes de distribución de alta complejidad, el Algoritmo genético es el más recomendado.

5.6 Reconciliación con otros métodos heurísticos

Se tenían a disposición varios métodos para la solución al problema, entre ellos estaba el método Optimización por Mapeo de Media – Varianza, el cual presentaba una muy buena precisión en los resultados de varias referencias, también había buenas referencias con el Algoritmo genético, el cual era muy preciso en sus resultados, pero que demandaba un tiempo considerable de computación en su ejecución. La decisión por el Algoritmo genético se basa en su baja aplicación para este problema de optimización, lo cual despertó la duda ante su gran eficacia, por ende, se decidió realizar un estudio adicional con este

algoritmo para lograr destacar mediante los avances de nuestra investigación la aplicación que tiene este algoritmo en base a su efectividad y robustez, ya que se conoce que el Algoritmo genético presenta grandes ventajas ante problemas con variables enteras mixtas, debido a su estructura y planteamiento en el algoritmo como se indica en (Sirjani et al., 2012).

También se disponían de los algoritmos de Optimización por Enjambre de partículas, Optimización por olfato de tiburón (SSO – Shark Smell Optimization) como se muestra en (Gnanasekaran et al., 2016), Colonia de Abejas artificiales (ABC – Artificial Bee Colony) también visto en (Gnanasekaran et al., 2016), y el Algoritmo de Murciélagos (Bat Algorithm) como se muestra en (Reddy and Manoj, 2012), los cuales eran alternativas similares al algoritmo de Optimización por Colonia de hormigas, debido a que estos algoritmos pertenecen a la familia de algoritmos heurísticos de tipo enjambre, caracterizados por utilizar modelos de comportamiento de animales que trabajan en conjunto para la búsqueda de un objetivo actualizando sus parámetros de búsqueda; el algoritmo PSO (Particle Swarm Optimization) al igual que algoritmo ACO trabaja con una sola solución, que parte desde un punto inicial y se va actualizando en base a sus parámetros para mejorar la solución por cada iteración. El dato curioso con el algoritmo de optimización por Colonia de hormigas, era que los resultados en comparación al algoritmo PSO en base a los artículos estudiados, eran que daban respuesta de buena aproximación con respecto al algoritmo PSO, tal como lo presenta (Prasad and Suresh, 2014), por ende, la decisión para este algoritmo se realizó con la finalidad de dar un contraste entre los algoritmos del tipo de enjambres, debido a que la efectividad de estos algoritmos tienen una similitud muy alta frente a los problemas de optimización con variables enteras mixtas, por lo cual, en base a los resultados obtenidos, se puede concluir la baja eficacia o robustez de estos algoritmos frente a problemas de optimización con variables enteras mixtas de alta complejidad, es decir, mientras mayor sea el número de variables, menor será la robustez del algoritmo.

Capítulo 6. Conclusiones

Capítulo 6. Conclusiones

6.1	Introducción.....	109
6.2	Solución a las preguntas de investigación.....	110
6.3	Conclusiones específicas.....	112
6.4	Limitantes del proyecto de investigación.....	113
6.5	Recomendaciones y sugerencias para estudios posteriores.....	114

6.1 Introducción

En este capítulo se pretende responder a las preguntas de investigación que se plantearon en la Sección 1.2. La idea de realizar este trabajo de investigación se basa en obtener estudios relacionados en la operación de algoritmos heurísticos que permitan ser incorporados en las redes de distribución de energía eléctrica de forma que puedan ser analizadas, monitoreadas y restauradas, pero lo más importante, optimizadas. Tener sistemas eléctricos de media tensión que puedan distribuir energía a precios bajos y al mínimo de pérdidas puede contribuir a un desarrollo exponencial de una comunidad.

El trabajo se ha distribuido en cuatro secciones principales: en una de ellas se introduce al problema de las redes de distribución y su perjudicial impacto por los altos porcentaje de pérdidas de potencia activa, su impacto a la comunidad y los alcances que se pretenden alcanzar al incorporar metodología heurística con el enfoque a la utilización de bancos de capacitores para contrarrestar las pérdidas de potencia activa en redes de distribución radiales; en una segunda sección se realiza una revisión de literatura donde se recalca la actualidad del país en el ámbito de pérdidas de potencia en las redes de distribución, pérdidas técnicas y pérdidas no técnicas, los tipos de problemas que van en cascada cuando las redes fallan a consecuencia de lo antes mencionado, y principalmente las características principales de los algoritmos heurísticos que se utilizaran para el enfoque planteado; en una tercera sección se describe la metodología a implementar, donde se plantean las redes de distribución como casos de estudio, sus parámetros físicos, la función objetivo a minimizar, la formulación teórica de los algoritmos heurísticos aplicables y la parametrización aplicable a las redes de distribución de característica radial, parámetros que dependen de la amplitud de la red. Finalmente se describen los resultados obtenidos de aplicar la metodología heurística colonia de hormigas y algoritmo genético basado en el enfoque de incorporar bancos de capacitores para contrarrestar las pérdidas de potencia.

La elaboración e incorporación de algoritmos heurísticos en las redes de distribución radial han permitido mejorar las condiciones de pérdidas de potencia y a consecuencia de ello mejorar el perfil de voltaje en cada una de las barras, tal

como se muestra en el capítulo cuatro. Los resultados obtenidos a partir de la adición de bancos de capacitores que a su vez se van dimensionando y ubicando estratégicamente por cada iteración que se ejecute, hace que el tiempo en hallar la solución sea más o menos significativos.

6.2 Solución a las preguntas de investigación

A continuación, en esta sección se pretende dar respuesta a las preguntas de investigación planteadas anteriormente.

1. ¿Qué alcance se tiene con el dimensionamiento, instalación y ubicación óptima de bancos de capacitores en una Red de Distribución?

Los bancos de capacitores son elementos pasivos que permiten incorporar una cierta capacidad de reactivos a las redes de distribución, que a su vez consiguen compensar cuando sea requerido, una vez que el capacitor está en línea con el sistema se disminuyen las pérdidas por el efecto de compensación, dicha compensación que se requiere cuando la red sufre de eventos inesperados de sobrecargas o perturbaciones.

Cabe recalcar que los bancos de capacitores deben ser utilizados solo para redes de distribución que posean redes trifásicas, pues se consigue una mejor distribución de reactivos y se evita correr el riesgo de un desbalance. Para el caso en que el sistema se encuentre con mayor número de redes monofásicas que trifásicas, se tendrá la limitante en la reducción de pérdidas.

Además, de acuerdo a la experiencia en la búsqueda de una solución óptima, los algoritmos tienden a converger de acuerdo a las características principales de las redes que se ejecutan, es decir, que mientras menor sea el número de barras, el algoritmo tendrá una respuesta más rápida.

2. ¿De qué manera se deben realizar y aplicar los métodos de optimización por colonia de hormigas y algoritmo genético para el dimensionamiento, instalación y ubicación óptima de bancos de capacitores para la minimización de pérdidas y mejoramiento del perfil del voltaje?

Para realizar este tipo de metodologías, es necesario y conveniente plantear desde el inicio un conjunto o rango de soluciones efectivas que permita limitar la búsqueda aleatoria de los bancos de capacitores, por medio de una matriz en donde se especifique el número de la barra y los pasos de reactivos que se tiene en cada banco de capacitor se puede controlar el conjunto de soluciones.

Para dimensionar la matriz es necesario realizar un análisis preliminar del sistema, de forma que la capacidad máxima de los bancos de capacitores no supere la capacidad de la carga por barra, de igual forma considerar que los pasos de reactivos por capacitor serán directamente proporcionales a la precisión de la solución.

3. ¿Cómo se ve afectada la eficiencia de la red en términos de costos, al utilizar de forma eficaz los bancos de capacitores para solucionar los problemas de pérdidas de potencia activa y perturbaciones de voltaje?

La eficiencia de la red en términos de los costos dependerá mucho de la elección de la solución que se escoja, esto se debe a que cada algoritmo dará una solución al sistema, la cual estará definida en términos de cantidad de pérdidas que se reduce versus la cantidad de capacitores que se instala. La solución que dé la mayor cantidad de reducción de pérdidas no necesariamente será la mejor en términos de costos pues puede que determine instalara un mayor número de capacitores que no compensa con la diferencia de reducción de pérdidas entre las dos soluciones. Por tal motivo es necesario antes de escoger la solución realizar un análisis de costo beneficio y así decidir qué es lo más conveniente para nuestro sistema de estudio.

4. ¿Cuál es la planificación prospectiva en el diseño de las redes de Distribución al aplicar los dos métodos heurísticos mencionados para minimizar las pérdidas utilizando los bancos de capacitores?

Debido al desarrollo constante que tiene que pasar una población, es necesario que ante la necesidad de realizar nuevos proyectos de expansión se tenga un análisis significativo y cualitativo del tipo de red que se pretenda instalar, considerando la carga y los tipos de carga es necesario simular los flujos de

potencia, para que de esa forma se pueda tener una visión clara del comportamiento del sistema, con esa condición y una vez obtenido los datos relevantes de la simulación como las pérdidas de potencia activa esperadas, se ejecutan los algoritmos de optimización propuestos y se evalúa en qué nodos de la nueva red será necesario instalar bancos de capacitores.

Con estos resultados se espera que los planificadores y desarrolladores de proyectos puedan ejecutar sus análisis con mayor precisión y puedan evaluar todas las posibles variables y proyecciones logrando así ejecuciones exitosas.

5. ¿Cuál de los métodos heurísticos para la optimización, ACO y GA, aporta con la mayor reducción de pérdidas de potencia activa en las redes de distribución estudiadas y por qué?

El método heurístico que aporta mayor reducción de pérdidas es el Algoritmo Genético, GA, debido a su característica de solución, la misma que se ajusta al problema de las redes de distribución que son del tipo enteras mixtas.

6.3 Conclusiones específicas

En esta sección se revisan los objetivos específicos planteados en el capítulo 1 y se va verificando que cada uno de ellos se haya logrado. Los objetivos específicos planteados son:

Plantear los códigos de programación en el software PowerFactory utilizando los algoritmos heurísticos; con ayuda de la metodología que se planteó en las secciones 3.5 y 3.6, y que además se plasman en las Figura 3.21 y Figura 3.31 se definen las características de los algoritmos, los mismo que posteriormente se codifican en el script de PowerFactory tal como se muestran en la Figura 3.18 y Figura 3.22 de la secciones 3.5.1 y 3.6.1.

Aplicar los códigos de programación de los algoritmos heurísticos en el enfoque: Ubicación y Dimensionamiento óptimo de bancos de capacitores; los códigos de programación que se codificaron en PowerFactory se los pone a prueba en las redes de distribución de la IEEE y el alimentador Piñal de Guayas los Rios, los mismos que se ejecutaron y dieron como resultado el dimensionamiento y

ubicación óptima de los bancos de capacitores tal como se muestra en la Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3 y Figura 4.4 de las secciones 4.2.1, 4.2.2, 4.3.1 y 4.3.2, en estas figuras se puede observar el resultado de la red con los bancos de capacitores instalados a lo largo de la red.

Comprobar la minimización de pérdidas de potencia activa en las redes de distribución radial de la IEEE 33 barras, IEEE 69 barras y el alimentador Piñal de Cnel Guayas los Ríos mediante la aplicación de los métodos heurísticos propuestos, ACO y GA; los resultados de la aplicación se ven reflejados en las gráficas que van desde la Figura 4.5 hasta la Figura 4.20 en donde se muestran las características de convergencia, de pérdidas de potencia y de perfil de voltaje de cada uno de los casos de estudio, en cada una de las gráficas se comprueba que aplicando los métodos heurísticos se reducen las pérdidas de potencia y se mejora el perfil del voltaje.

6.4 Limitantes del proyecto de investigación

En esta sección se especifican las limitaciones que tiene este proyecto de investigación, limitaciones que pueden ser tomadas como referencia para proyectos futuros.

Cabe recalcar que los resultados obtenidos aplicando la codificación de los métodos heurísticos en la plataforma PowerFactory DigSILENT no pueden ser tomados como definitivos puesto que hay que compararlos con resultados que se hayan simulados en otra plataforma y usando algún otro método de optimización.

Una de las principales limitaciones que se presentaron en el proyecto fue el tema de los costos, al ser un proyecto que se dedica específicamente a resolver el problema de las pérdidas no se toma en cuenta el valor monetario que representa instalar una cierta cantidad de capacitores para que reduzca una cierta cantidad de pérdidas, el hecho de instalar bancos de capacitores solo en la red de distribución trifásica es otra limitante en particular pues como sabemos en un sistema de distribución se tienen redes a diferentes de niveles de voltaje y con diferentes características.

6.5 Recomendaciones y sugerencias para estudios posteriores

Un aspecto importante para futuros estudios, es la limitación que tiene la red de distribución ante la cantidad que puede tener de circuitos bifásicos y monofásicos que son los que mayor concentración de pérdidas pueden tener, y que fue una de las mayores limitantes del proyecto, debido a que no hay acceso para la ubicación de los Bancos de capacitores en esos tramos de la red, por ende, se recomienda considerar la minimización de pérdidas de potencia activa considerando todas las barras de una red de distribución, tanto en los tramos trifásicos como en los tramos bifásicos y monofásicos, tomando en cuenta el posible desbalance que podría producir el ingreso de los Bancos de capacitores bifásicos y monofásicos para aprovechar al máximo la compensación de la red, y de esta manera, poder reducir al máximo las pérdidas de potencia activa.

Una sugerencia para mejorar la validación de los métodos es de utilizar una herramienta alternativa para el desarrollo y comparación de los resultados bajo los mismos métodos heurísticos a utilizar, como no fue en este caso, debido a que se realizaron los métodos mediante el software de DIgSILENT PowerFactory únicamente, por ende, es una buena recomendación para eliminar los conflictos entre resultados obtenidos.

Además, también el uso de nuevos métodos heurísticos para la optimización a estos problemas puede ser de mucha utilidad para reforzar la validación de la metodología del estudio.

Otro aspecto importante, es el análisis económico respectivo con el cual las empresas eléctricas darán su determinación para la planificación de un proyecto de instalación de los Bancos de capacitores que fueron resultantes de los métodos utilizados.

Esta tesis puede servir de referencia y base de estudio para trabajos posteriores, donde se apliquen criterios y métodos afines, en los cuales se realice uso de Bancos de capacitores y reducción de pérdidas. Un posible tema posterior y necesario que deriva de esta problemática es el despacho óptimo de los Bancos de capacitores, realizando un despacho horario de reactivos para la reducción de

pérdidas durante las 24 horas del día. Es importante mencionar, la necesidad de utilizar más redes de distribución existentes, es decir, redes de distribución disponibles en las empresas eléctricas para su interés el estudio de las reducciones de pérdidas mediante la ubicación de Bancos de capacitores. Este trabajo ya deja sentada una base para la continuación del despacho y optimización de los reactivos para la reducción de pérdidas mediante una programación de las unidades de reactivos, y también para un mejor dimensionamiento y ubicación de los Bancos de capacitores, atacando las limitantes del proyecto en los aspectos mencionados.

Apéndice

Apéndices

Apéndice A	119
Apéndice B	123
B.1 Sistema IEEE 33 Barras – Sistema de distribución radial	123
B.2 Sistema IEEE 69 Barras – Un alimentador principal	126
B.3 Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas Los Ríos	129
Apéndice C	135
Apéndice D	141
Apéndice E	155

Apéndice A

Manual del usuario. – Construcción del sistema de potencia en Power Factory DigSILENT

Para iniciar las simulaciones y aplicar los códigos de programación realizados en script DPL, se debe construir el sistema de potencia con todos sus elementos incluyendo los bancos de capacitores que deberán ser instalados como resultado de los algoritmos aplicados en DPL. Para proceder, se deben seguir los siguientes pasos:

1. Seleccionar con el clic izquierdo la opción que se muestra en la Figura A.1, para abrir el “Data Manager”, el cual nos permitirá crear el proyecto y demás.

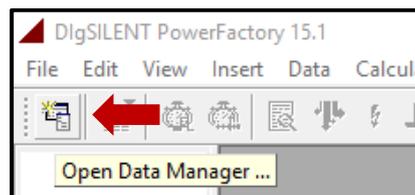


Figura A.1 Inicio del Data Manager de DigSILENT PowerFactory

2. Seleccionar con el clic derecho a la sección de “usuario” dentro del “Data Manager”, seleccionar la opción “New” y clic izquierdo en “Project” para la creación de un nuevo proyecto (Nuevo sistema de potencia), ver Figura A.2.

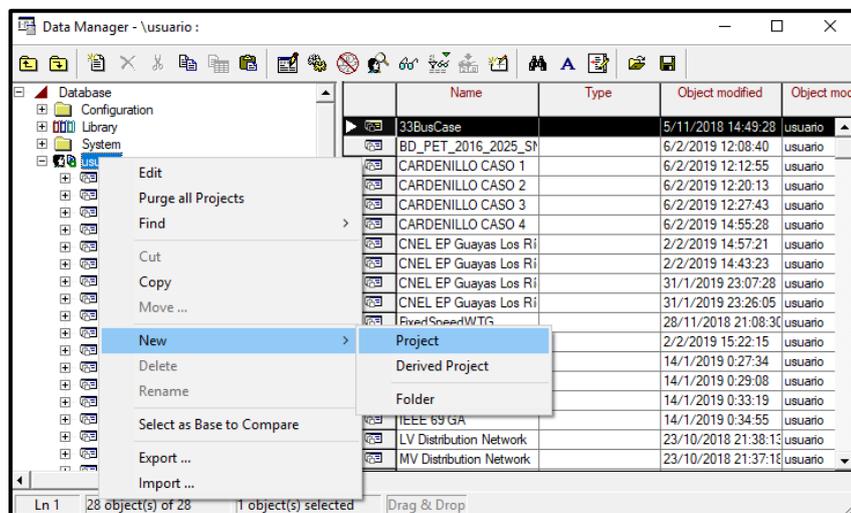


Figura A.2 Creación de un nuevo proyecto en DigSILENT PowerFactory

- Posteriormente, aparece la siguiente ventana donde procederemos a asignarle un nombre característico a nuestro nuevo proyecto, el cual contendrá todos los sistemas de potencia, sistemas DSL, Scripts, etc. Ver Figura A.3.

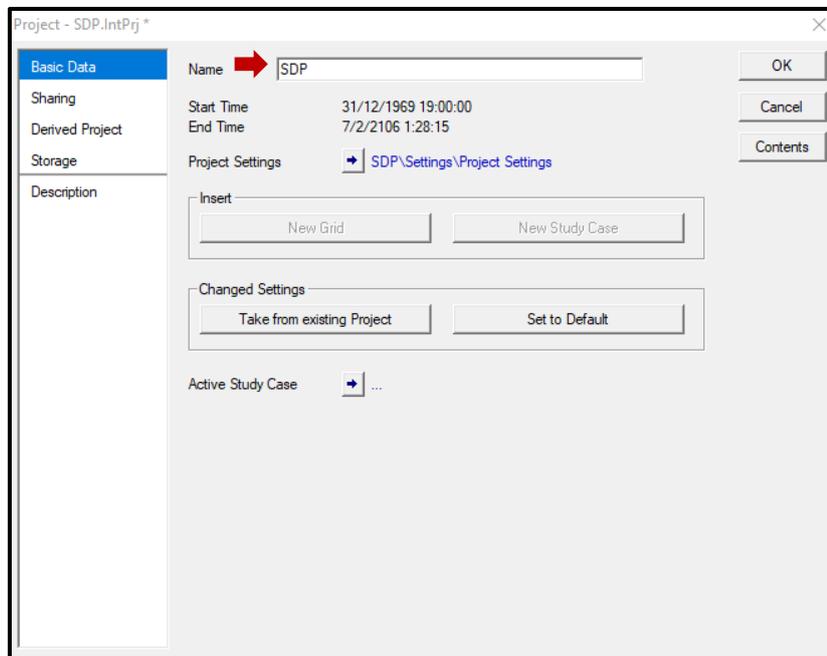


Figura A.3 Creación del nuevo proyecto ("Project")

- A continuación, le asignamos un nombre y la frecuencia nominal al 1er sistema de potencia a crear, para realizar los estudios y análisis posteriores. Ver Figura A.4.

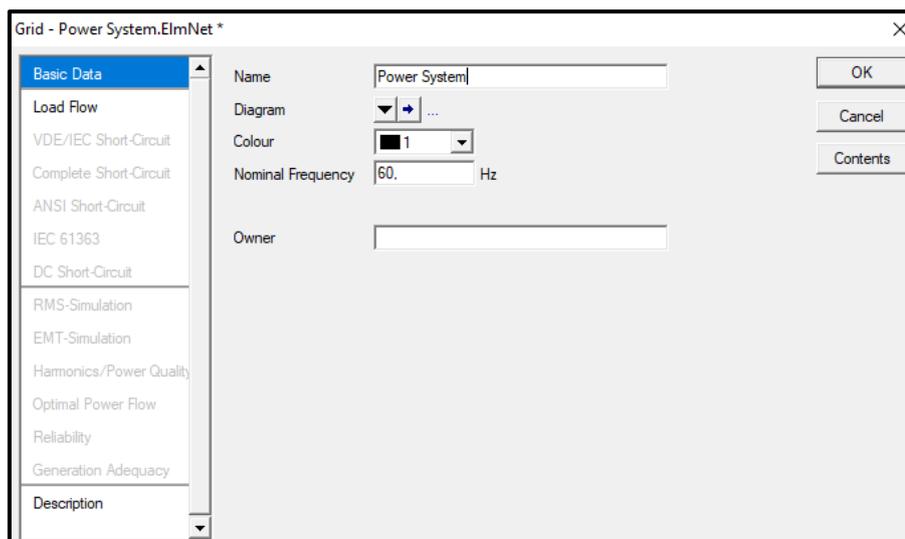


Figura A.4 Asignación de nombre y frecuencia nominal del 1er sistema de potencia a crear

- Posterior a la creación del 1er sistema de potencia, aparecerá la ventana del diagrama esquemático donde se puede construir la red con todos los

elementos necesarios para el sistema de potencia, los cuales se sitúan en la parte derecha de la ventana, tal y como muestra el indicador rojo. Ver Figura A.5.

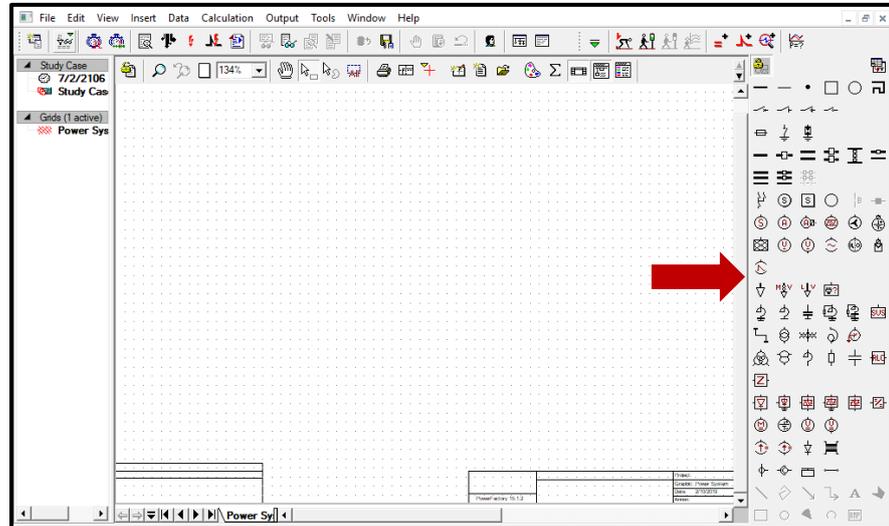


Figura A.5 Ventana para la construcción del diagrama esquemático de la red

- Para dimensionar la hoja de dibujo del diagrama esquemático, hacer clic izquierdo en la barra de herramientas (parte superior del programa) en la opción de “View”, y seleccionar con clic izquierdo la opción “Drawing Format”, tal y como muestra el indicador rojo. Ver Figura A.6

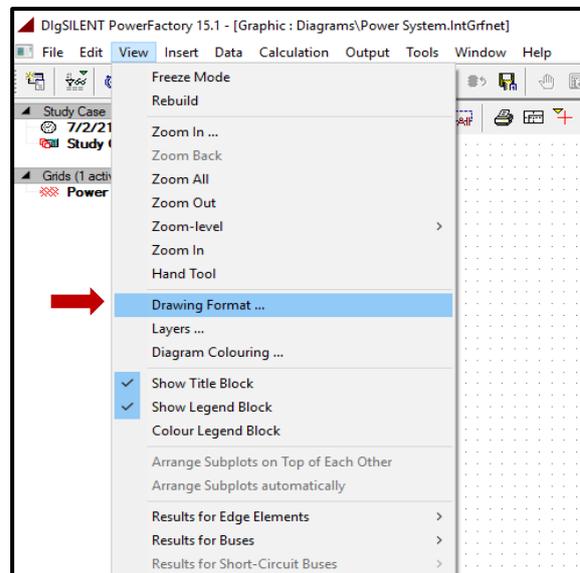


Figura A.6 Opción para dimensionar el formato de la hoja de dibujo

- Dentro de la opción de “Drawing Format”, se puede seleccionar el formato adecuado para la impresión directa en formato de hoja, como también se puede crear un formato de dibujo totalmente personalizado con las

dimensiones que el usuario desee, y para ello, hacer clic en “New” como muestra el indicador rojo, y digitar las dimensiones requeridas o deseadas. Y finalmente, dar clic en “OK”. Ver Figura A.7.

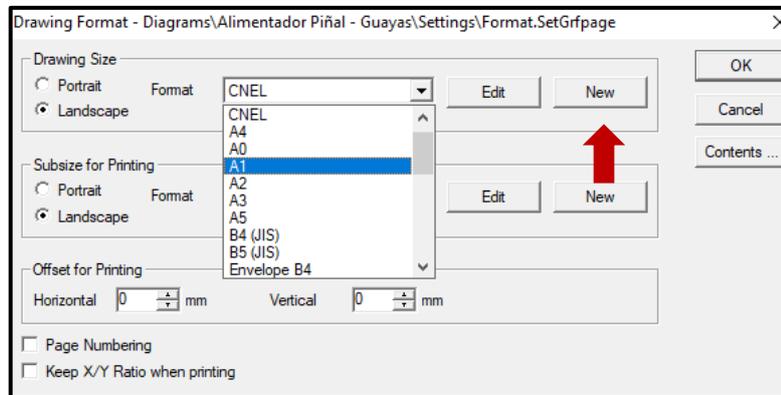


Figura A.7 Edición del formato de la hoja de dibujo mediante la opción de "Drawing Format"

8. Finalmente, seleccionar los elementos necesarios para diseñar y construir el sistema de potencia, donde los elementos marcados fueron los principales componentes utilizados en las simulaciones del presente proyecto de tesis de investigación (Red externa, Barras, Cargas, Líneas de transmisión, Bancos de capacitores y transformadores de 2 devanados). Ver Figura A.8.



Figura A.8 Elementos principales utilizados para la creación de una red de distribución radial

Apéndice B

Datos del sistema de potencia para cada caso de estudio. – Caso IEEE 33 Barras para sistemas de distribución radial, caso IEEE 69 Barras de un solo alimentador, y el caso del Alimentador Piñal CNEL Guayas Los Ríos

Para realizar la construcción de cualquier sistema de potencia, es necesario tener los datos de cada componente de la red, tales como Líneas de transmisión o de distribución, cargas eléctricas balanceadas o desbalanceadas, Bancos de capacitores, Niveles de tensión en cada barra, datos de los transformadores de potencia y frecuencia nominal del sistema, el cual se usa para fijar los parámetros de la Red externa, quien representa la fuente del alimentador principal.

B.1 Sistema IEEE 33 Barras – Sistema de distribución radial

El sistema IEEE de 33 barras fue utilizado para realizar la reducción de pérdidas mediante los dos métodos heurísticos (ACO & GA), por ende, se necesita tener los datos en detalle de todo el sistema. A continuación, se muestra el diagrama esquemático del sistema IEEE de 33 barras realizado en PowerFactory, Figura B.1, el cual incluye la instalación de los Bancos de capacitores.

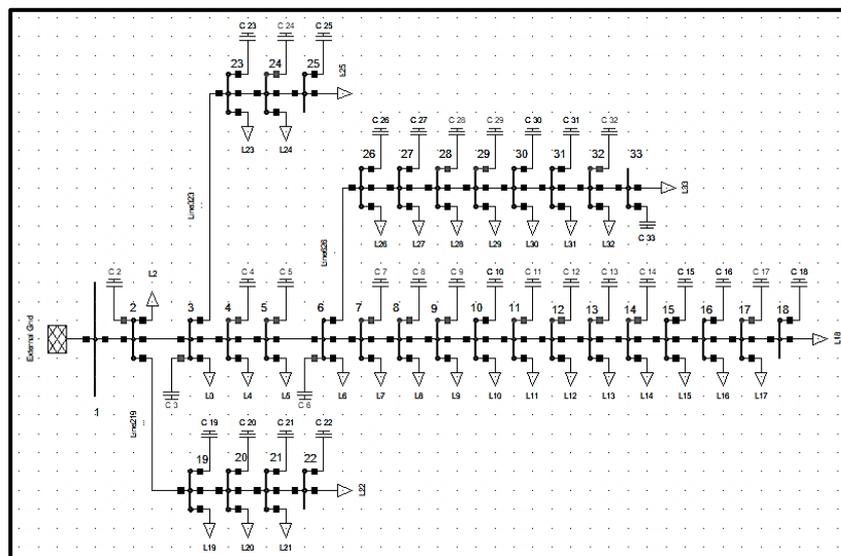


Figura B.1 Diagrama esquemático del sistema IEEE de 33 barras realizado en PowerFactory

Barra No.	PD [kW]	QD [kVAR]	Barra No.	PD [kW]	QD [kVAR]
2	100	60	18	90	40
3	90	40	19	90	40
4	120	80	20	90	40
5	60	30	21	90	40
6	60	20	22	90	40
7	200	100	23	90	50
8	200	100	24	420	200
9	60	20	25	420	200
10	60	20	26	60	25
11	45	30	27	60	25
12	60	35	28	60	20
13	60	35	29	120	70
14	120	80	30	200	600
15	60	10	31	150	70
16	60	20	32	210	100
17	60	20	33	60	40

Tabla B.1 Datos de potencias de la Demanda por cada barra del sistema IEEE de 33 barras (Mithulanathan et al., 2016)

Como se muestra en la Tabla *B.1* todas las barras tienen cargas trifásicas y balanceadas a excepción de la barra Slack (Barra #1), que en este caso tiene la interconexión con la Red Externa, siendo la única fuente de alimentación. El nivel de tensión nominal es de 12,66 kV línea a línea.

Línea No.	BARRAS		Resistencia [Ω]	Reactancia [Ω]
	Desde	Hasta		
1	1	2	0.0922	0.0477
2	2	3	0.493	0.2511
3	3	4	0.366	0.1864
4	4	5	0.3811	0.1941
5	5	6	0.819	0.707
6	6	7	0.1872	0.6188
7	7	8	1.7114	1.2351
8	8	9	1.03	0.74
9	9	10	1.044	0.74
10	10	11	0.1966	0.065
11	11	12	0.3744	0.1238
12	12	13	1.468	1.155
13	13	14	0.5416	0.7129
14	14	15	0.591	0.526
15	15	16	0.7463	0.545
16	16	17	1.289	1.721
17	17	18	0.732	0.574
18	2	19	0.164	0.1565
19	19	20	1.5042	1.3554
20	20	21	0.4095	0.4784
21	21	22	0.7089	0.9373
22	3	23	0.4512	0.3083
23	23	24	0.898	0.7091
24	24	25	0.896	0.7011
25	6	26	0.203	0.1034
26	26	27	0.2842	0.1447
27	27	28	1.059	0.9337
28	28	29	0.8042	0.7006
29	29	30	0.5075	0.2585
30	30	31	0.9744	0.963
31	31	32	0.3105	0.3619
32	32	33	0.341	0.5302

Tabla B.2 Datos de las impedancias de línea del Sistema de la IEEE 33 Barras (Mithulanathan et al., 2016)

En la Tabla B.2 se tienen todas las impedancias de línea (Resistencia y Reactancia en Ohms), ordenadas por número de barras combinadas. Se considera que el sistema de IEEE de 33 Barras usa un modelo de línea corta, y esto se debe a que se trabaja a niveles de media tensión (12,66 kV de línea a línea), por ende, no presentan valores de susceptancia capacitivas en las líneas aéreas de la red Radial de Distribución.

B.2 Sistema IEEE 69 Barras – Un alimentador principal

El sistema IEEE de 69 barras fue utilizado para realizar la reducción de pérdidas mediante los dos métodos heurísticos (ACO & GA), por ende, se necesita tener los datos en detalle de todo el sistema. A continuación, se muestra el diagrama esquemático del sistema IEEE de 69 barras realizado en PowerFactory, Figura B.2, el cual incluye la instalación de los Bancos de capacitores.

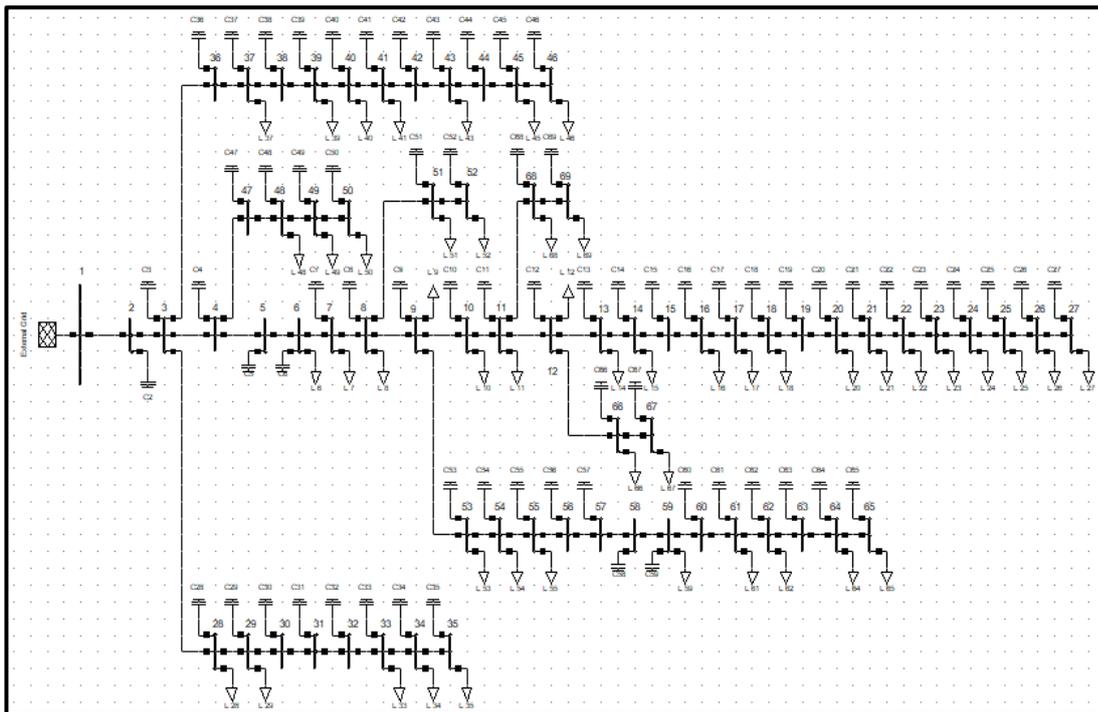


Figura B.2 Diagrama esquemático del sistema IEEE de 69 barras realizado en PowerFactory

Barra No.	PD [kW]	QD [kVAR]	Barra No.	PD [kW]	QD [kVAR]	Barra No.	PD [kW]	QD [kVAR]
1	0	0	24	28	20	47	0	0
2	0	0	25	0	0	48	79	56.4
3	0	0	26	14	10	49	384.7	274.5
4	0	0	27	14	10	50	384	274.5
5	0	0	28	26	18.6	51	40.5	28.3
6	2.6	2.2	29	26	18.6	52	3.6	2.7
7	40.4	30	30	0	0	53	4.35	3.5
8	75	54	31	0	0	54	26.4	19
9	30	22	32	0	0	55	24	17.2
10	28	19	33	14	10	56	0	0
11	145	104	34	19.5	14	57	0	0
12	145	104	35	6	4	58	0	0
13	8	5.5	36	26	18.55	59	100	72
14	8	5.5	37	26	18.55	60	0	0
15	0	0	38	0	0	61	1244	888
16	45.5	30	39	24	17	62	32	23
17	60	35	40	24	17	63	0	0
18	60	35	41	1.2	1	64	277	162
19	0	0	42	0	0	65	59	42
20	1	0.6	43	6	4.3	66	18	13
21	114	81	44	0	0	67	18	13
22	5.3	3.5	45	39.22	26.3	68	28	20
23	0	0	46	39.22	26.3	69	28	20

Tabla B.3 Datos de la potencia de demanda por cada barra del sistema de la IEEE de 69 barras (Mithulananthan et al., 2016)

Como se muestra en la Tabla B.3 todas las barras tienen cargas trifásicas y balanceadas a excepción de la barra Slack (Barra #1) al igual que el sistema IEEE de 33 barras, que en este caso tiene la interconexión con la Red Externa, siendo la única fuente de alimentación. El nivel de tensión nominal es de 12,66 kV línea a línea.

Línea No.	BARRAS		Resistencia [Ω]	Reactancia [Ω]	Línea No.	BARRAS		Resistencia [Ω]	Reactancia [Ω]
	Desde	Hasta				Desde	Hasta		
1	1	2	0.0005	0.0012	35	3	36	0.0044	0.0108
2	2	3	0.0005	0.0012	36	36	37	0.064	0.1565
3	3	4	0.0015	0.0036	37	37	38	0.1053	0.123
4	4	5	0.0251	0.0294	38	38	39	0.0304	0.0355
5	5	6	0.366	0.1864	39	39	40	0.0018	0.0021
6	6	7	0.3811	0.1941	40	40	41	0.7283	0.8509
7	7	8	0.0922	0.047	41	41	42	0.31	0.3623
8	8	9	0.0493	0.0251	42	42	43	0.041	0.0478
9	9	10	0.819	0.2707	43	43	44	0.0092	0.0116
10	10	11	0.1872	0.0619	44	44	45	0.1089	0.1373
11	11	12	0.7114	0.2351	45	45	46	0.0009	0.0012
12	12	13	1.03	0.34	46	4	47	0.0034	0.0084
13	13	14	1.044	0.345	47	47	48	0.0851	0.2083
14	14	15	1.058	0.3496	48	48	49	0.2898	0.7091
15	15	16	0.1966	0.065	49	49	50	0.0822	0.2011
16	16	17	0.3744	0.1238	50	8	51	0.0928	0.0473
17	17	18	0.0047	0.0016	51	51	52	0.3319	0.1114
18	18	19	0.3276	0.1083	52	9	53	0.174	0.0886
19	19	20	0.2106	0.0696	53	53	54	0.203	0.1034
20	20	21	0.3416	0.1129	54	54	55	0.2842	0.1447
21	21	22	0.014	0.0046	55	55	56	0.2813	0.1433
22	22	23	0.1591	0.0526	56	56	57	1.59	0.5337
23	23	24	0.3463	0.1145	57	57	58	0.7837	0.263
24	24	25	0.7488	0.2745	58	58	59	0.3042	0.1006
25	25	26	0.3089	0.1021	59	59	60	0.3861	0.1172
26	26	27	0.1732	0.0572	60	60	61	0.5075	0.2585
27	3	28	0.0044	0.0108	61	61	62	0.0974	0.0496
28	28	29	0.064	0.1565	62	62	63	0.145	0.0738
29	29	30	0.3978	0.1315	63	63	64	0.7105	0.3619
30	30	31	0.0702	0.0232	64	64	65	1.041	0.5302
31	31	32	0.351	0.116	65	11	66	0.2012	0.0611
32	32	33	0.839	0.2816	66	66	67	0.0047	0.0014
33	33	34	1.708	0.5646	67	12	68	0.7394	0.2444
34	34	35	1.474	0.4673	68	68	69	0.0047	0.0016

Tabla B.4 Datos de las impedancias de línea del Sistema de la IEEE de 69 barras de 1 solo alimentador (Mithulananthan et al., 2016)

En la Tabla B.4 se tienen todas las impedancias de línea (Resistencia y Reactancia en Ohms), ordenadas por número de barras combinadas. Se considera un modelo de línea corta al igual que sistema IEEE de 33 barras y un nivel de tensión de 12,66 kV de línea a línea.

B.3 Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas Los Ríos

El caso de estudio real basado en el Alimentador Piñal CNEL EP Guayas Los Ríos fue utilizado para realizar la reducción de pérdidas mediante los dos métodos heurísticos (ACO & GA), por ende, se necesita tener los datos en detalle de todo el sistema. A continuación, se muestra el diagrama esquemático del alimentador Piñal realizado en PowerFactory, Figura B.3, el cual incluye la instalación de los Bancos de capacitores en solamente 37 barras (Barras las cuales corresponden a los tramos de alimentación trifásica), además, se tienen 137 barras, donde 80 barras corresponden al nivel de media tensión.

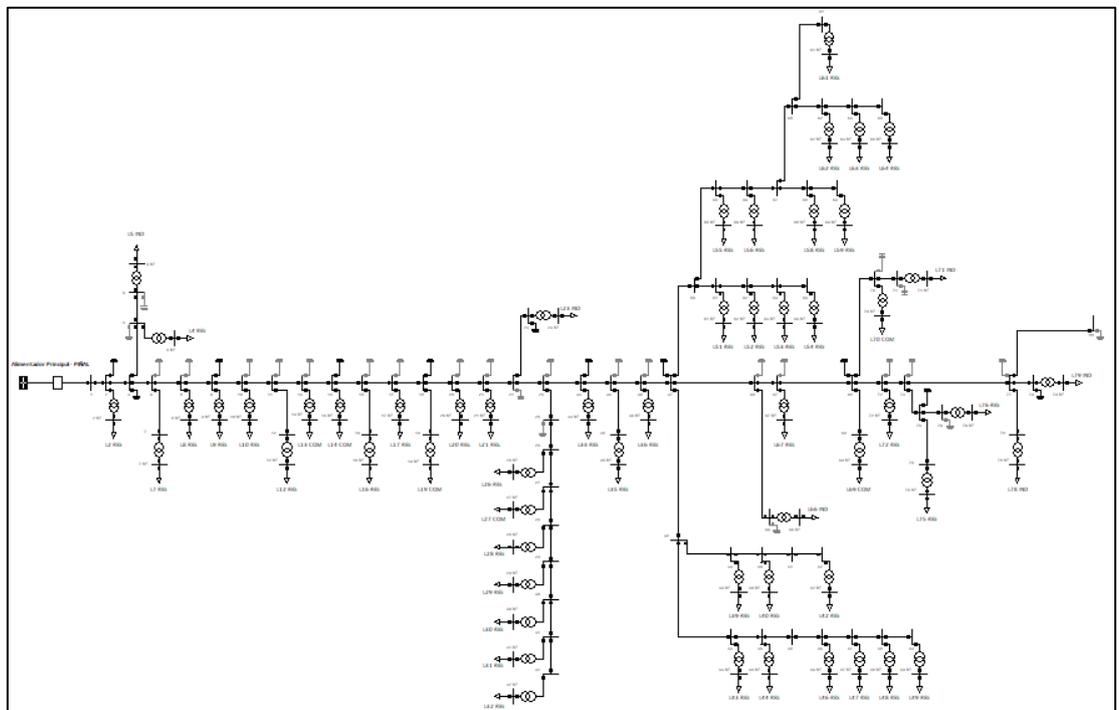


Figura B.3 Sistema de potencia del Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos modelada en DlgSILENT PowerFactory con los Bancos de Capacitores ubicados

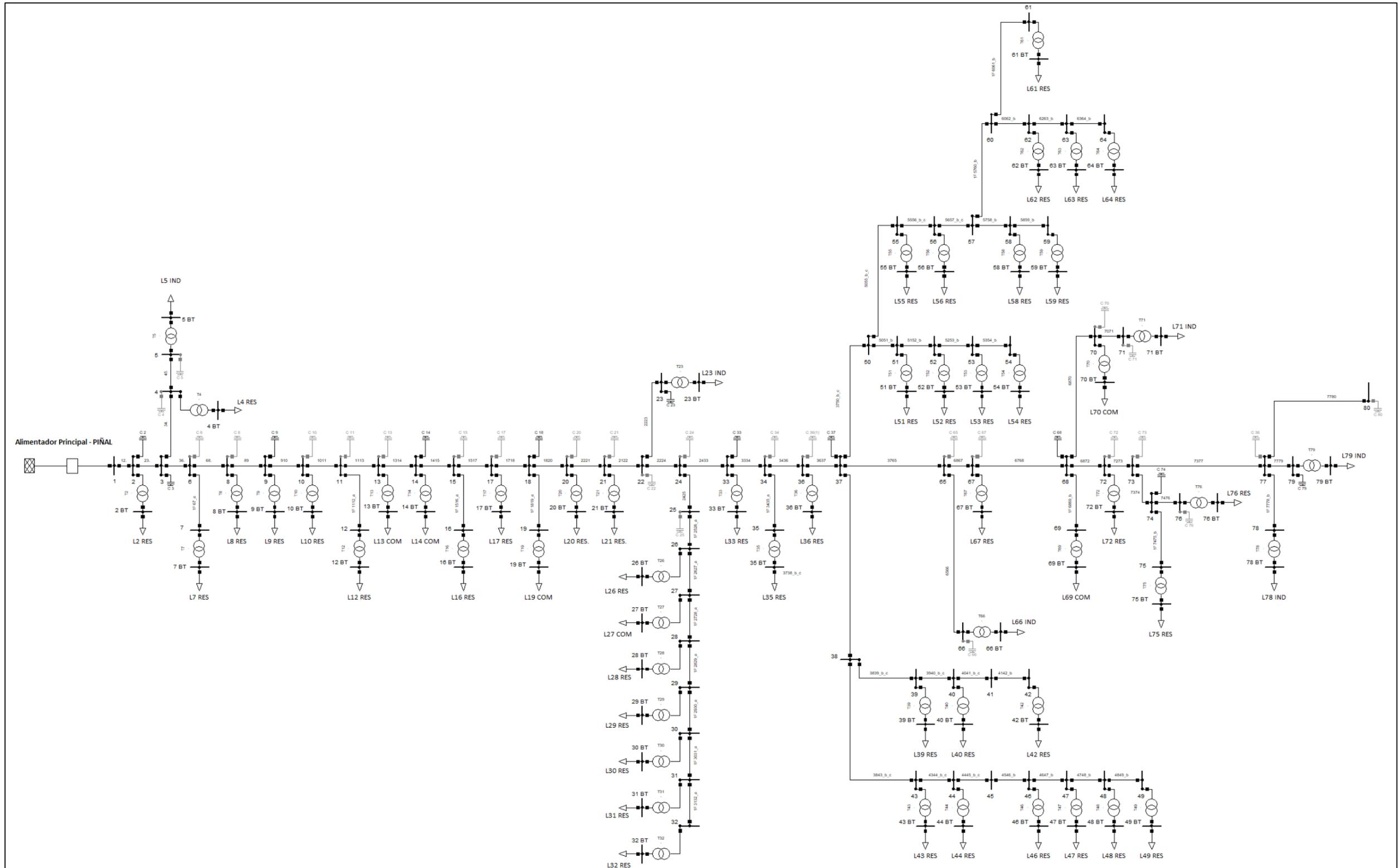


Figura B.4 Diagrama unifilar completo del Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos modelada en DigSILENT PowerFactory con los Bancos de Capacitores ubicados en las barras trifásicas

Bus	Pload [kW]			Qload [kVAR]			Bus	Pload [kW]			Qload [kVAR]		
	A	B	C	A	B	C		A	B	C	A	B	C
2			16.6			27.5	43		9.3			1	
4	4.7			4.5			44		9.3			1	
5	31.3	31.3	31.3	3.4	3.4	3.4	46		13.9			1.5	
7			25			41.2	47		46.5			5	
8		9.3			1		48		23.2			2.5	
9		9.3			1		49		9.3			1	
10		9.3			1		51		46.5			5	
12		46.5			5		52		13.9			1.5	
13		34.9			3.7		53		23.2			2.5	
14	23.3			22.6			54		9.3			1	
16	9.3			9			55		23.2			2.5	
17		4.6			0.5		56		23.2			2.5	
19	14			13.5			58		9.3			1	
20		9.3			1		59		13.9			1.5	
21		46.5			5		61		13.9			1.5	
23	31.1	31.1	31.1	3.4	3.4	3.4	62		23.2			2.5	
26		9.3			1		63		23.2			2.5	
27		13.9			1.5		64		13.9			1.5	
28		9.3			1		66	233.1	233.1	233.1	25.7	25.7	25.7
29		9.3			1		67		9.3			1	
30		9.3			1		69		23.2			2.5	
31		9.3			1		70		9.3			1	
32		9.3			1		71	155.4	155.4	155.4	17.2	17.2	17.2
33		13.9			1.5		72	34.9			33.8		
35		46.5			5		75		23.2			2.5	
36	23.3			22.6			76	93.2	93.2	93.2	10.3	10.3	10.3
39		23.2			2.5		78			11.9			19.7
40		46.5			5		79	310.8	310.8	310.8	34.3	34.3	34.3
42		9.3			1								

Tabla B.5 Datos de la potencia de demanda por fase de cada barra del sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos.

Como se muestra en la Tabla B.5 todas las barras tienen cargas trifásicas, bifásicas y monofásicas (desbalanceadas) a excepción de la barra Slack (Barra #1), que en este caso tiene la interconexión con la Red Externa, siendo la única fuente de alimentación. El nivel de tensión nominal es de 13,8 kV línea a línea.

En las Tabla B.6 y Tabla B.7 se tienen todas las impedancias de línea (Resistencia y Reactancia en Ohms), ordenadas por número de barras combinadas.

Línea No.	BARRAS		Distancia [Ω]	Resistencia [Ω /km]	Reactancia [Ω /km]
	Desde	Hasta			
1	1	2	0.1406	0.1727	0.5168
2	2	3	0.0535	0.1727	0.5724
3	3	4	1.2437	0.1727	0.5168
4	4	5	0.0548	0.1727	0.5168
5	3	6	0.6062	0.1727	0.5168
6	6	7	0.2272	0.2366	0.7324
7	6	8	0.0457	0.1727	0.5168
8	8	9	0.3133	0.1727	0.5168
9	9	10	0.2504	0.1727	0.5168
10	10	11	0.0753	0.1727	0.5168
11	11	12	0.0672	0.2366	0.7324
12	11	13	0.2808	0.1727	0.5168
13	13	14	0.6125	0.1727	0.5168
14	14	15	0.2031	0.1727	0.5168
15	15	16	0.0871	0.2366	0.7324
16	15	17	0.2538	0.1727	0.5168
17	17	18	0.1005	0.1727	0.5168
18	18	19	0.0434	0.2366	0.7324
19	18	20	0.836	0.1727	0.5168
20	20	21	0.5925	0.1727	0.5168
21	21	22	0.2006	0.1727	0.5168
22	22	23	0.0901	0.1727	0.5168
23	22	24	0.4954	0.1727	0.5168
24	24	25	0.4211	0.1727	0.5168
25	25	26	0.5749	0.2366	0.7324
26	26	27	1.4457	0.2366	0.7324
27	27	28	0.8123	0.2366	0.7324
28	28	29	0.5858	0.2366	0.7324
29	29	30	0.7073	0.2366	0.7324
30	30	31	0.4812	0.2366	0.7324
31	31	32	0.1766	0.2366	0.7324
32	24	33	1.3485	0.1727	0.5168
33	33	34	0.4518	0.1727	0.5168
34	34	35	0.2112	0.2366	0.7324
35	34	36	0.3096	0.1727	0.5168
36	36	37	0.1237	0.1727	0.5168
37	37	38	0.2243	0.1727	0.5469
38	38	39	0.2128	0.1727	0.5469
39	39	40	0.3618	0.1727	0.5469
40	40	41	0.494	0.1727	0.5469

Tabla B.6 Datos de las impedancias de línea del Sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos – Parte 1

Línea No.	BARRAS		Distancia [Ω]	Resistencia [Ω/km]	Reactancia [Ω/km]
	Desde	Hasta			
41	41	42	0.23234	0.2366	0.7324
42	38	43	0.1942	0.1727	0.5469
43	43	44	0.4953	0.1727	0.5469
44	44	45	0.0885	0.1727	0.5469
45	45	46	0.4899	0.2366	0.7324
46	46	47	0.2749	0.2366	0.7324
47	47	48	0.9174	0.2366	0.7324
48	48	49	0.6493	0.2366	0.7324
49	37	50	2.26	0.1727	0.5469
50	50	51	0.084	0.2366	0.7324
51	51	52	1.0532	0.2366	0.7324
52	52	53	0.1989	0.2366	0.7324
53	53	54	0.4141	0.2366	0.7324
54	50	55	1.9294	0.1727	0.5469
55	55	56	1.0219	0.1727	0.5469
56	56	57	0.0425	0.1727	0.5469
57	57	58	0.2523	0.2366	0.7324
58	58	59	0.3702	0.2366	0.7324
59	57	60	0.3225	0.2366	0.7324
60	60	61	0.1196	0.2366	0.7324
61	60	62	1.3465	0.2366	0.7324
62	62	63	0.1267	0.2366	0.7324
63	63	64	1.7532	0.2366	0.7324
64	37	65	3.1441	0.1727	0.5168
65	65	66	0.0626	0.1727	0.5318
66	65	67	0.8244	0.1727	0.5168
67	67	68	0.6524	0.1727	0.5168
68	68	69	0.2148	0.2366	0.7324
69	68	70	1.0845	0.1727	0.5168
70	70	71	0.0257	0.1727	0.5168
71	68	72	0.068	0.1727	0.5168
72	72	73	0.7897	0.1727	0.5168
73	73	74	0.0328	0.1727	0.5168
74	74	75	0.1161	0.2366	0.7324
75	74	76	0.177	0.1727	0.5168
76	73	77	3.8233	0.1727	0.5168
77	77	78	0.0688	0.2366	0.7324
78	77	79	0.1011	0.1727	0.5168
79	79	80	3.1802	0.1727	0.5168

Tabla B.7 Datos de las impedancias de línea del Sistema Alimentador Piñal – CNEL EP Guayas los Ríos – Parte 2

Apéndice C

Manual del usuario. – Creación del script y elementos principales para el desarrollo de los códigos en lenguaje DPL (vectores, matrices y funciones especiales para los scripts en DPL)

Para iniciar con la programación es importante crear todos los componentes principales a iniciar en el código mediante comandos DPL.

1. Primero, seleccionar la sección de “usuario”. Posteriormente, seleccionar la opción de “New object” marcado con el círculo rojo, se abrirá la ventana mostrada en medio que dice “Element Selection”, entonces elegir el elemento “DPL Command and more”, y finalizar con clic izquierdo en “OK”. Ver Figura C.1.

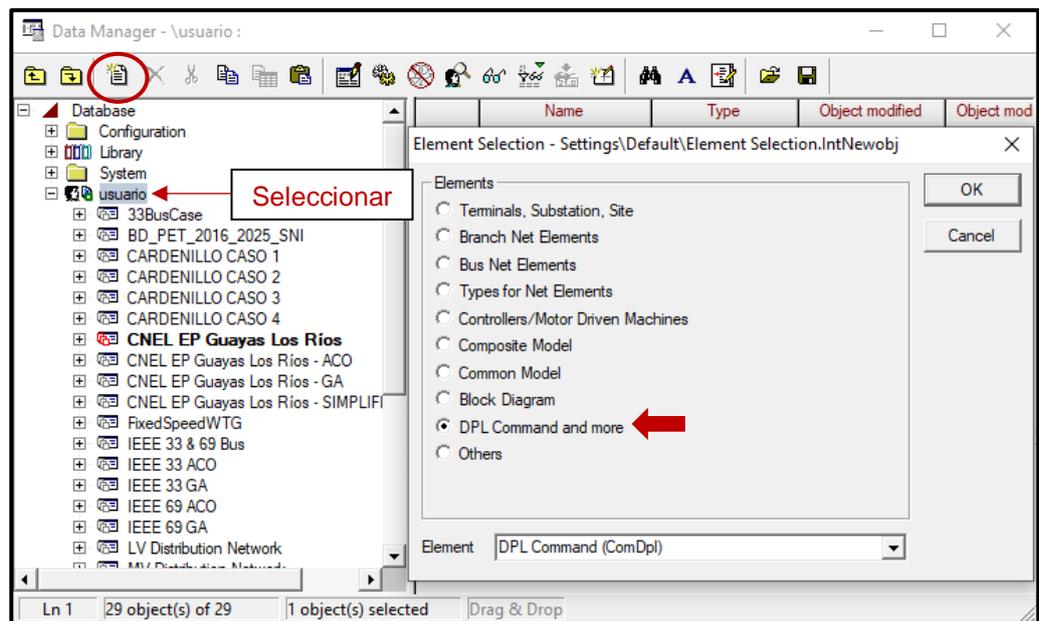


Figura C.1 Creación del Script en lenguaje DPL

2. A continuación, se le asigna un nombre al Script en DPL creado para posteriormente asignarles los elementos necesarios para su debida programación, tales como vectores, matrices, funciones programadas internas de PowerFactory o inclusive otro Script de programación DPL para ser utilizada como Subrutina. Ver Figura C.2.

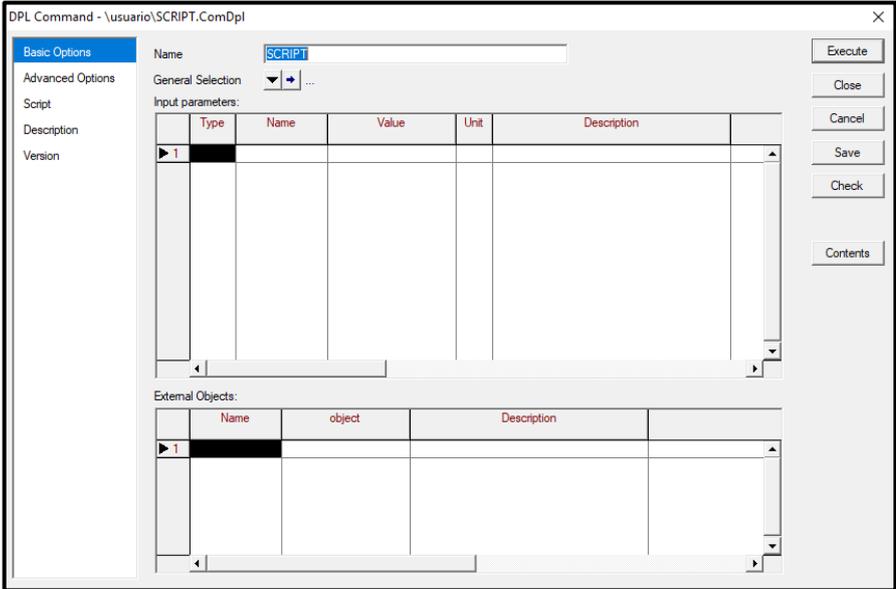


Figura C.2 Asignación del nombre del nuevo script

3. Una vez creado el script de programación en DPL, en la sección de “usuario” seleccionar el script con el nombre asignado, en este caso (“SCRIPT”), luego, dar clic en “New object”, y posteriormente, seleccionar la opción de “Others” con la categoría de “Other Elements (int*)”, donde es posible buscar los elementos como vectores y matrices. En la pantalla se muestra la creación de un vector en el elemento “Vector (int Vec)”. El elemento vector también se puede encontrar en la opción “DPL Command and more” al igual que en “Others” como se menciona anteriormente. Ver Figura C.3.

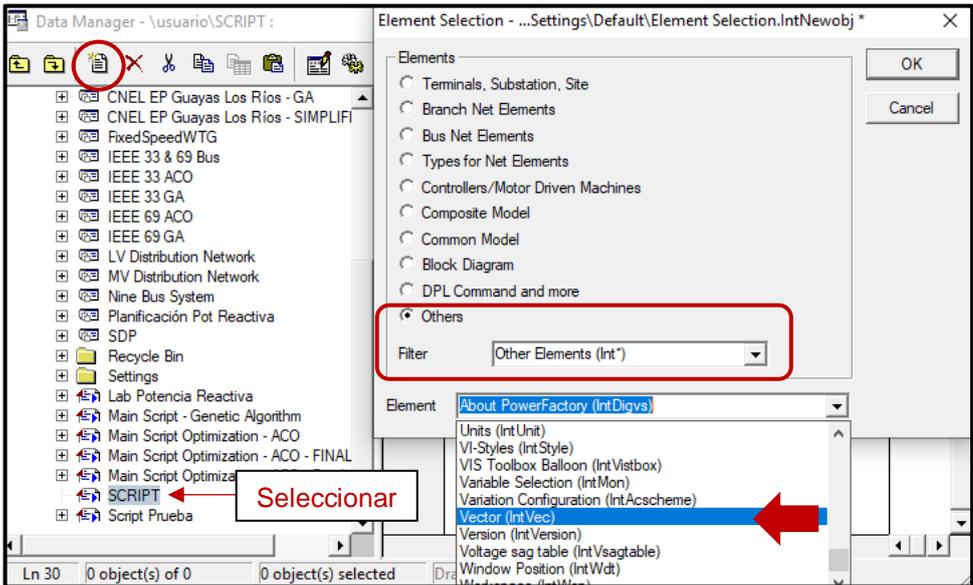


Figura C.3 Creación de un vector en el script previamente hecho

- Así mismo, para crear una matriz en el script en DPL previamente hecho, en la sección de “usuario” seleccionar el script con el nombre asignado, en este caso (“SCRIPT”), luego, dar clic en “New object”, y posteriormente, seleccionar la opción de “Others” con la categoría de “Other Elements (int*)”. En la pantalla se muestra la creación de una matriz en el elemento “Matrix (int Mat)”. El elemento matriz también se puede encontrar en la opción “DPL Command and more” al igual que en “Others” como se menciona anteriormente. Ver Figura C.4.

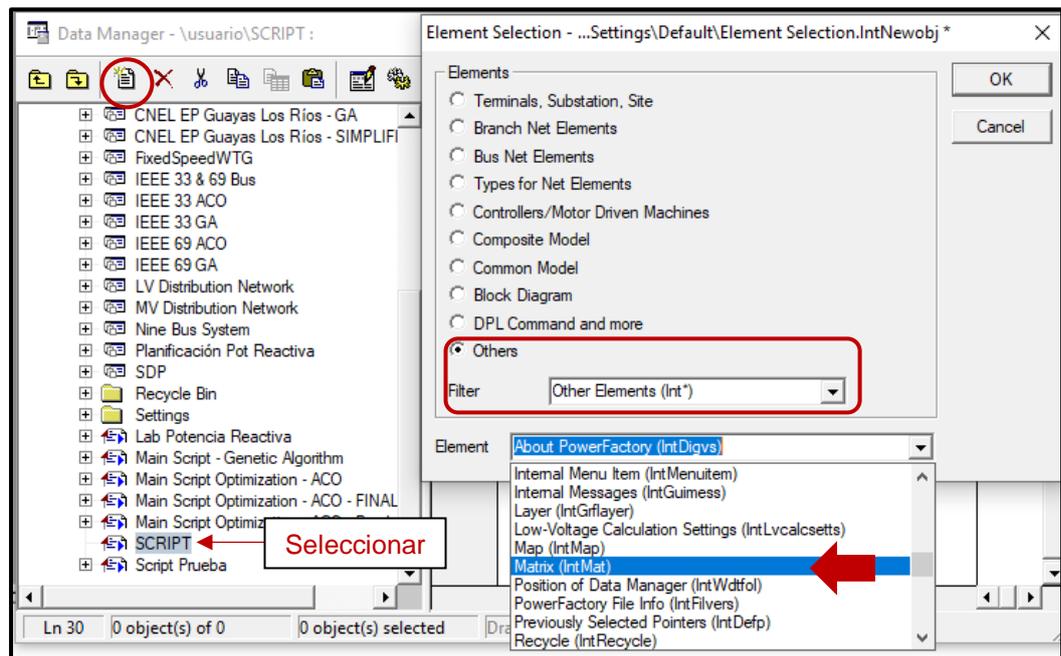


Figura C.4 Creación de una matriz en el script previamente hecho

- Para crear la función de flujo de potencia en el script en DPL previamente hecho, en la sección de “usuario” seleccionar el script con el nombre asignado, en este caso (“SCRIPT”), luego, dar clic en “New object”, y posteriormente, seleccionar la opción de “DPL Command and more” eligiendo el elemento “Load Flow Calculation (Com Ldf)”. Ver Figura C.5.

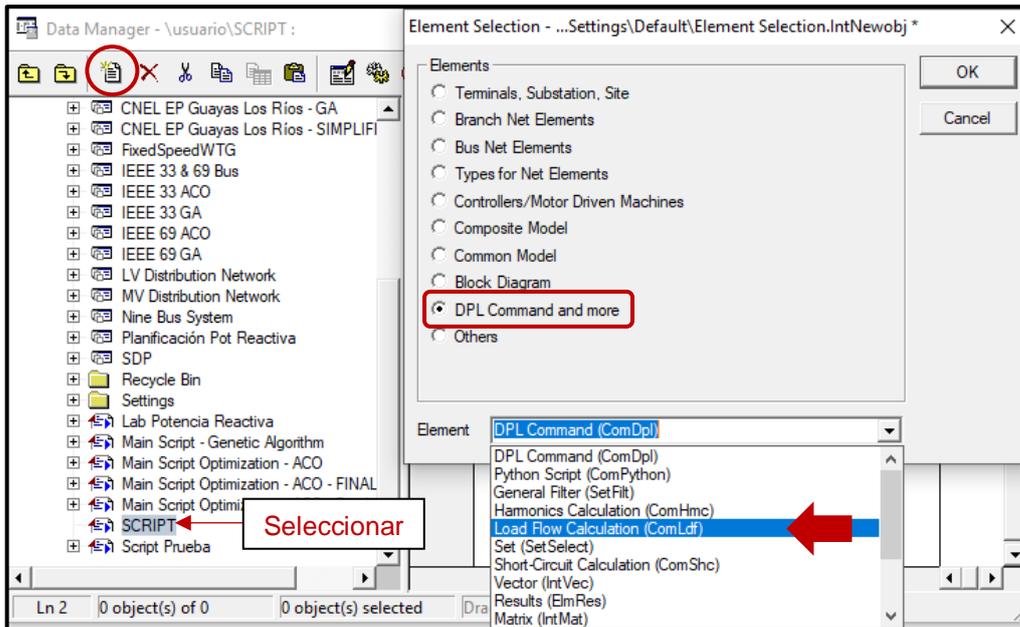


Figura C.5 Creación de la función de flujo de potencia para el script en DPL previamente hecho

- Posteriormente, aparecerá la siguiente ventana, la cual corresponde al operador de flujo de potencia propio de PowerFactory, donde se procede a seleccionar la opción que indica el direccional color rojo para poder realizar flujos de potencia desbalanceados, debido a que son necesarios para la evaluación de las pérdidas en una red de distribución, ya que estos tienen predominio en cargas altamente desbalanceadas. Ver Figura C.6.

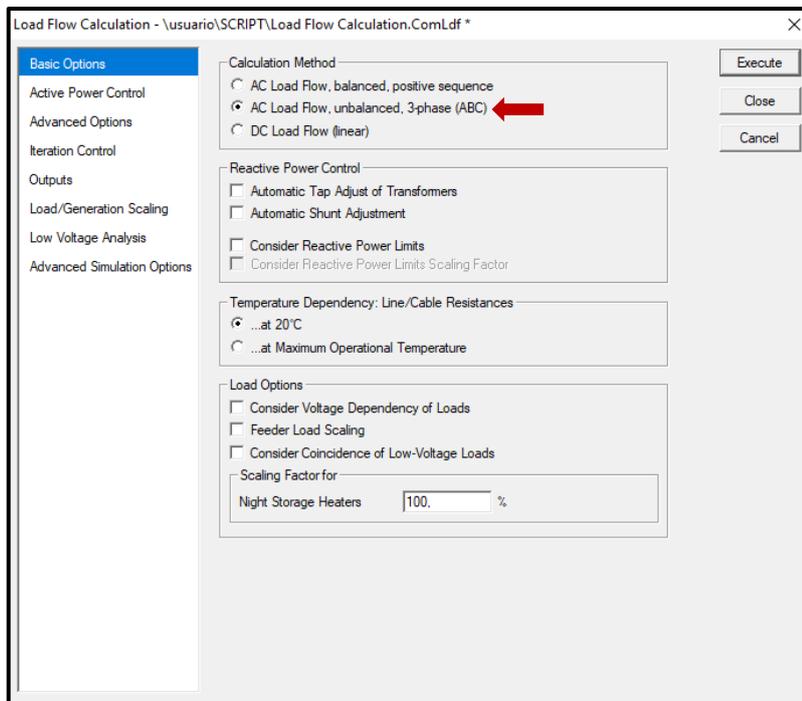


Figura C.6 Configuración de la función de flujo de potencia para sistemas desbalanceados

- Muchas funciones u operadores de DIgSILENT PowerFactory generan mensajes de ejecución o de errores, por ende, para eliminar estos mensajes de cualquier tipo y evitar que consuma más memoria en los códigos de programación, es necesario crear la función “ECHO” en el script en DPL previamente hecho, para lo cual, en la sección de “usuario” seleccionar el script con el nombre asignado, en este caso (“SCRIPT”), luego, dar clic en “New object”, y posteriormente, seleccionar la opción de “Others” con la categoría de “Commands (Prasad et al.)”, en el cual se busca el elemento “Echo (ComEcho)”. Ver Figura C.7.

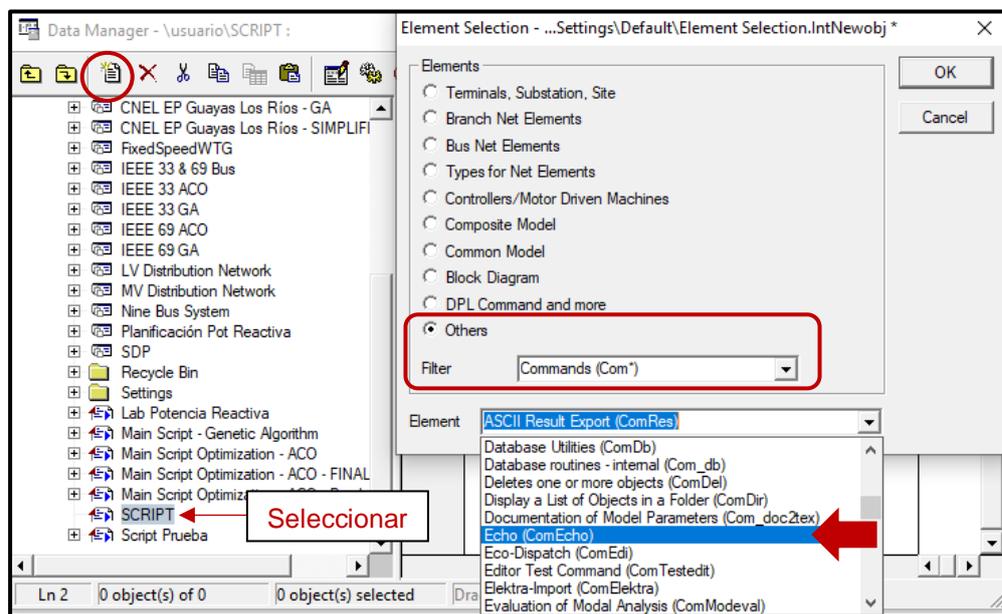


Figura C.7 Creación de la función "Echo" para silenciar los mensajes de las funciones internas

- Finalmente, aparecerá la siguiente ventana, la cual debe quedar tal y como se muestra. En “Display Messages” seleccionar únicamente la opción de “DPL–Messages”, y quitar la selección en todas las demás casillas. Ver Figura C.8.

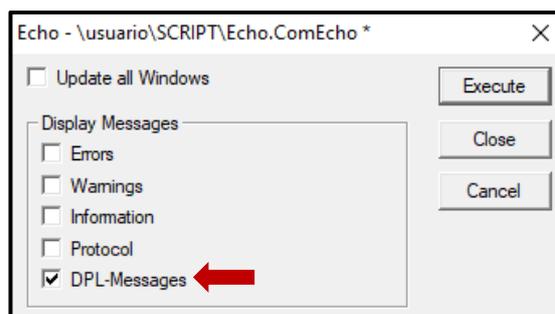


Figura C.8 Configuración de la función Echo

Apéndice D

Código de programación DPL. – Algoritmo de optimización por Colonia de Hormigas para minimizar las pérdidas mediante ubicación y dimensionamiento de Bancos de capacitores

```

! ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
!
! Autores: Walter Jeancarlo Mariscal García
!         Kevin Franklin Lopez Roldan
!
! mails: waljemar@espol.edu.ec
!        kefrlope@espol.edu.ec
!
!=====
=====
! ANT COLONY OPTIMIZATION
!=====
=====
!Declaración de variables según su tipo:
set S_cargas, C_banks, Barras, Lines, Red;
object O_cargas, O_banks, Inf_Barras, B_Lines, bus1, bus2,
oRed;
int elementos, Vp, Va, Vb, Vc, NBarrasT, ci, i, j, NBarras,
Steps, MVAR, Caps, L1, L2, eq, eq2, ep, k, l, Q, cap;
object sbus1, sbus2;
string n, p, q, r, B, w;
double PLosses, PLi, PL;

int N_Ants, error, MaxIter, Ant_C, Ant_tao, rand, J, P,
MayorP, MenorP, h, Bus_C, fil, col, acum, NStep;
double alpha, beta, rho, eta, tao, tao_o, Bselect, BestSol,
Pj, SumP, nj, cont, ta, nb;

!Inicialización de variables "Objects":

!Obtención de los elementos de cada Barra
Barras=AllRelevant('*ElmTerm');

;Obtención de los elementos de cada Carga
S_cargas=AllRelevant('*ElmLod');

!Obtención de los elementos de cada Banco de capacitores
C_banks=AllRelevant('*ElmShnt');

!Obtención de los elementos de cada Línea

```

```

Lines=AllRelevant('*.ElmLne');

!Obtención de las variables de toda la Red
Red=AllRelevant('*.ElmNet');

!Limpia los comandos de la pantalla
ClearOutput();

!Omite los mensajes producidos por cualquier función
Echo.Execute();
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Conteo del Numero de Barras con Banco de capacitores
conectado:
NBarras=C_banks.Count();
NBarrasT=Barras.Count();
NBarras=NBarras+1;
printf('N_Barras= %d / %d',NBarras, NBarrasT);
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Inicialización de variables del sistema para las matrices
a utilizar:

!Matriz de pasos de reactivos del Banco de capacitores,
desde: 0 MVAR - Q_maximo
Step_Cap.Resize(Steps+1,NBarras-1);
Step_Cap.Init(Steps+1,NBarras-1,0);

!Inicialización de variables de pasos de reactivos y
cantidad máxima de pasos de reactivos
MVAR=0.01;
Steps=30;!69Bus & 33Bus
Steps=40;!CNEL Pinal
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!Matriz de Banco de capacitores conectado a la barra
correspondiente
Cap_Bus.Resize(NBarras-1,NBarrasT);
Cap_Bus.Init(NBarras-1,NBarrasT,0);

!Matriz de líneas conectadas a las barras i,j
correspondientes
Lines_Bus.Resize(NBarrasT,NBarrasT);
Lines_Bus.Init(NBarrasT,NBarrasT,0);

!Vector de Barras
Buses.Resize(NBarrasT);
Buses.Init(NBarrasT);

!Matriz de estados los STEPS de cada Banco de capacitores

```

```

Step_State.Resize(Steps+1,NBarras-1);
Step_State.Init(Steps+1,NBarras-1,0);

!Vector de Estados de servicio de cada Banco de capacitores
B_CAP.Resize(NBarras-1);
B_CAP.Init(NBarras-1);
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!Llenado de la Matriz de Bancos de capacitores y Matriz de
Outservices:
i=1;
k=1;
!printf('-----');

for(O_banks=C_banks.First();O_banks;O_banks=C_banks.Next(
)){

    !Inicialización de los parámetros de los Bancos de
    capacitores

    O_banks:outserv=1;!Estado de servicio del Banco de
    capacitores
    O_banks:qcapn=MVAR;!Valor máximo de reactivos del Banco
    de capacitores
    O_banks:ncapx=Steps;!Cantidad de pasos de reactivos
    O_banks:ncapa=1;!Paso de capacitancia actual
    !O_banks:ushnm=12.66;!For 33Bus & 69Bus
    !O_banks:ushnm=13.8;!For CNEL Pinal

    !Imprime el nombre del Banco de capacitores y los
    reactivos
    !printf('%s %.3f',O_banks, O_banks:Qact);

    !Llenado de matriz de estados de los Bancos de
    capacitores
    B_CAP.Set(i,O_banks:outserv);

    !Obtención de la barra conectada al Banco de capacitores
    sbus1=O_banks.GetNode(0);

    !Obtención del nombre de la barra conectada al Banco de
    capacitores
    n=sbus1:loc_name;

    !Búsqueda y comparación de la Barra conectada al Banco
    de capacitores con todas las Barras del "Object" "Barras"
    j=1;

    for(Inf_Barras=Barras.First();Inf_Barras;Inf_Barras=Bar
    ras.Next()){

```

```

!Obtención del nombre de cada Barra
p=Inf_Barras:loc_name;
!Comparación de los nombres de las Barras
eq=strcmp(p,n);

!Si el nombre de ambas barras son iguales -> Llenar
la Matriz Bancos de capacitores conectados
if(eq=0){
    !La Matriz es llenada con un valor de 1,
    indicando que hay conexión
    Cap_Bus.Set(k,j,1);
}
j=j+1;
}

!printf('%s',sbus1:loc_name);!Imprimir en pantalla el
nombre de la barra que conecta cada Banco de capacitores

for(j=1;j<=Steps+1;j=j+1){
    !Llenado de la Matriz de pasos de reactivos por cada
    Banco de capacitores
    Step_Cap.Set(j,i,(j-1)*MVAR);
}

!Actualización de contadores
i=i+1;
k=k+1;
}
!printf('-----');
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Llenado de la Matriz de Líneas conectadas entre las barras
correspondientes:
for(B_Lines=Lines.First(); B_Lines; B_Lines=Lines.Next()){

    sbus1=B_Lines.GetNode(0);!Obtención de la Barra i
    conectada a la Línea
    sbus2=B_Lines.GetNode(1);!Obtención de la Barra j
    conectada a la Línea

    n=sbus1:loc_name;!Obtención del nombre de la Barra i
    p=sbus2:loc_name;!Obtención del nombre de la Barra j

    !printf('%s %s',sbus1:loc_name,sbus2:loc_name);

    !Comparación del string de los nombres de las Barras para
    la localización y codificación:
    j=1;

```

```

for(Inf_Barras=Barras.First();Inf_Barras;Inf_Barras=Bar
ras.Next()){!1er "for" de búsqueda

    q=Inf_Barras:loc_name;!Obtención de los nombres de
    cada Barra (i) para su comparación
    eq=strcmp(n,q);!Comparación de los nombres de la
    Barra del 1er "for" con el nombre de la Barra i

    i=1;
    !Condición de la igualdad en la comparación par la
    Barra i
    if(eq=0){
        !printf('%i %i',i,j);

        for(Inf_Barras=Barras.First();Inf_Barras;
        Inf_Barras=Barras.Next()){!2do "for" de
        búsqueda
            !Obtención de los nombres de cada Barra
            (j) para su comparación
            r=Inf_Barras:loc_name;

            !Comparación de los nombres de la Barra
            del 1er "for" con el nombre de la Barra j
            ep=strcmp(p,r);

            !Condición de la igualdad en la
            comparación para la Barra j
            if(ep=0){
                !Llenado de la 1er Diagonal de la
                Matriz de conexiones de Líneas
                Lines_Bus.Set(i,j,1);
                !Llenado de la 2da Diagonal de la
                Matriz de conexiones de Líneas
                Lines_Bus.Set(j,i,1);
                !printf('%i %i',i,j);
            }
            !Actualización del contador del 2do "for"
            i=i+1;
        }
    }
    j=j+1;!Actualización del contador del 1er "for"
}
}
!Finalización de la inicialización de parámetros de la RED!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!OPTIMIZACIÓN POR COLONIA DE HORMIGAS!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

```

!Parámetros del algoritmo ACO (Ant Colony Optimization)
N_Ants=NBarras-1;!Número de Capacitores
!MaxIter=500;
MaxIter=250;!Número de iteraciones
alpha=1.5;!Factor exponente del aporte de feromonas
beta=0.5;!Factor exponente del aporte de información
heurística
rho=0.4;!For 69BUS !Factor de evaporización de feromonas
rho=0.19;!For 33BUS & CNEL
!rho=0.3;
tao_o=1;!Feromona inicial
BestSol=1e20;!Mejor solución inicial (Valor muy elevado)
Q=10;!Factor del cambio de feromona insertado por cada
hormiga
J=0.5;
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Inicialización de Matrices
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!Vector de Función Fitness (Objetivo)
Fitness.Resize(MaxIter);

Pij.Resize(Steps+1,NBarras-1);!Vector de probabilidades de
selección

P_Acum.Resize(NBarras-1);!Vector de probabilidades
acumuladas por Hormiga

nij.Resize(NBarras-1);!Vector de información heurística

Tao.Resize(Steps+1,N_Ants);!Vector de feromonas

P_AcumStep.Resize(Steps+1,NBarras-1);

!Vector de los valores de solución obtenidos por cada
iteración
Memory_Iter.Resize(MaxIter);

!Vector auxiliar para la localización de los Bancos de
capacitores en las barras trifásicas
Ncaps.Resize(NBarras-1);
Ncaps.Init(NBarras-1);

!Vector de pasos de reactivos (Valor decimal ÷ 10[kVAR])
N_Step.Resize(N_Ants);
N_Step.Init(N_Ants);
!Matriz de arreglos de capacitores conectados a la barra
correspondiente,
!Resultantes de la solución obtenida por cada iteración:
Memory_Cap.Resize(N_Ants,MaxIter);
Memory_Step.Resize(N_Ants,MaxIter);

```

!Inicialización de todas las matrices y variables de iteración creadas previamente:

```
Pij.Init(Steps+1,NBarras-1,0);
P_Acum.Init(NBarras-1);
nij.Init(NBarras-1);
Tao.Init(Steps+1,N_Ants,tao_o);
P_AcumStep.Init(Steps+1,NBarras-1,0);
Memory_Step.Init(N_Ants,MaxIter,0);
Memory_Cap.Init(N_Ants,MaxIter,1);
Fitness.Init(MaxIter);
Step_State.Init(Steps+1,NBarras-1,0);
BestSol=1e20;
MayorP=0;
MenorP=10;
```

```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!ACO Main Loop!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
```

!For principal - Manejo de cada iteración del algoritmo
for(i=1;i<=MaxIter;i=i+1){

 ;Condición para evaluar flujo de potencia en la 1er iteración.

 if(i=1){

```
        flujo.Execute();!Ejecución del flujo de potencia.
        oRed=Red.First();!Obtención de los elementos de la
        red mediante el "object" Red.
        !printf('%.6f',oRed:c:LossP);
        !Creación y valorización de la variable de
        Información Heurística
        k=1;
        !cont=0;
```

```
        for(O_banks=C_banks.First();O_banks;O_banks=C_banks.
Next()){
```

```
            sbus1=O_banks.GetNode(0);!Obtención de la
            barra conectada al Banco de capacitores
            n=sbus1:loc_name;!Obtención del nombre de la
            barra conectada al Banco de capacitores
```

```
            !Búsqueda y comparación de la Barra conectada
            al Banco de capacitores con todas las Barras
            del Object "Barras"
```

```
            j=1;
            for(Inf_Barras=Barras.First();Inf_Barras;
Inf_Barras=Barras.Next()){
```

```

p=Inf_Barras:loc_name;!Obtención del
nombre de cada Barra
eq=strcmp(p,n);!Comparación de los
nombres de las Barras

Va=Inf_Barras:m:u:A;
Vb=Inf_Barras:m:u:B;
Vc=Inf_Barras:m:u:C;

Vp=(Va+Vb+Vc)/3;

!Si el nombre de ambas barras son iguales
→ Llenar la Matriz Bancos de capacitores
conectados
if(eq=0){
    nj=1/Vp;
    nij.Set(k,nj);
    !printf('%.8f - %.8f',Vp,nj);
    break;
}
j=j+1;
}

!cont=cont+nj;
!printf('%.6f - %.6f',nj,cont);
k=k+1;!Actualización del contador.
}
}

Step_State.Init(Steps+1,NBarras-1,0);
Ncaps_.Init(NBarras-1);
! printf('-----');
! printf('-----');

!Probabilidades de movimiento de cada hormiga
SumP=0;
for(k=1;k<=NBarras-1;k=k+1){
    for(h=1;h<=Steps+1;h=h+1){
        ta=Tao.Get(h,k);
        nb=nij.Get(k);
        Pj=pow(ta,alpha)*pow(nb,beta);
        SumP=SumP+Pj;
        !printf('%.6f / %.6f',Pj,SumP);
    }
}
!printf('-----');

!2do for para el cálculo de la probabilidad de selección
acum=0;
for(k=1;k<=NBarras-1;k=k+1){
    cont=0;

```

```

for(h=1;h<=Steps+1;h=h+1){
    ta=Tao.Get(h,k);
    nb=nij.Get(k);
    Pj=pow(ta,alpha)*pow(nb,beta);
    Pij.Set(h,k,Pj/SumP);
    cont=cont+(Pj/SumP);
    P_AcumStep.Set(h,k,cont);
    !printf('%.6f / %.6f',Pj/SumP,cont);
}
acum=acum+cont;
P_Acum.Set(k,acum);
}

!Movimiento de hormigas - selección por Método de la
ruleta rodante
for(j=1;j<=N_Ants;j=j+1){
    !printf('Ant: %d',j);
    !printf('-----');
    rand=Random(0,1);
    !printf('RAND=%.6f',rand);
    if(rand<=J){
        MayorP=0;
        for(h=1;h<=Steps+1;h=h+1){
            P=Pij.Get(h,j);
            if(P>MayorP){
                Ant_C=h;
                MayorP=P;
                !printf('%d / fila,col =
                %d,%d',Ant_C,h,j);
            }
        }
        !printf('-----');
        !printf('-----');
    }else{
        cont=P_AcumStep.Get(Steps+1,j);
        rand=Random(0,cont);
        for(k=1;k<=Steps+1;k=k+1){
            acum=P_AcumStep.Get(k,j);
            if(rand<=acum){
                !printf('%d / %.6f',k,rand);
                Ant_C=k;
                break;
            }
        }
    }
}

!Búsqueda de la Barra donde se selecciona el movimiento
de la Hormiga

k=1;

```

```

for(B_Lines=Lines.First();B_Lines;
B_Lines=Lines.Next()){
    sbus1=B_Lines.GetNode(0);
    sbus2=B_Lines.GetNode(1);
    n=sbus1:loc_name;
    p=sbus2:loc_name;
    L1=strlen(n);
    L2=strlen(p);
    eq=strcmp(n,p);

    if(L1>L2){
        !printf('%s%s %s: %d / %d %d',n,p,n,eq,L1,L2);
        B=n;
    }else if(L1=L2){
        if(eq>0){
            !printf('%s%s %s: %d / %d %d',n,p,n,eq,L1,L2);
            B=n;
        }else{
            !printf('%s%s %s: %d / %d %d',n,p,p,eq,L1,L2);
            B=p;
        }
    }else{
        !printf('%s%s %s: %d / %d %d',n,p,p,eq,L1,L2);
        B=p;
    }
    !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
    !!!Localización de los Bancos de capacitores en las
    barras trifásicas!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
    l=0;
    for(O_banks=C_banks.First();O_banks;O_banks=C_banks.Next()){
        l=l+1;
        sbus1=O_banks.GetNode(0);
        w=sbus1:loc_name;
        eq=strcmp(w,n);
        eq2=strcmp(w,p);
        cap=Ncaps.Get(l);
        !printf('CAP: %d',cap);
        if(eq=0 .or. eq2=0){
            if(cap=0){
                !printf('k_Ant=%d l=%d Bus:
                %s',k,l,w);
                Ncaps.Set(l,1);
                break;
            }
        }
    }
    !printf('%s%s %s ',n,p,w);

```

```

        acum=0;
        for(ci=1;ci<=NBarras-1;ci=ci+1){
            cap=Ncaps.Get(ci);
            acum=acum+cap;
        }

        if(acum=j){
            break;
        }
        !!!!!!!!!!!!!!!
        k=k+1;
    }

    Step_State.Set(Ant_C,1,1);
    if(Ant_C>1){
        B_CAP.Set(1,0);
        Memory_Cap.Set(1,i,0);
        Memory_Step.Set(1,i,Ant_C-1);
    }
    !exit();
}
!exit();

!Actualización de los parámetros de los Bancos de
capacitores (Solución del algoritmo)
l=1;
for(O_banks=C_banks.First();O_banks;
O_banks=C_banks.Next()){
    !Habilita o deshabilita los Bancos de capacitores
    en la red
    O_banks:outserv=B_CAP.Get(1);
    for(h=1;h<=Steps+1;h=h+1){
        fil=Step_State.Get(h,1);
        if(fil=1){
            !Asignación del valor de reactivo del
            Banco de capacitores
            O_banks:ncapa=h-1;
        }
    }
    l=l+1;
}

!Evaluación de la Función Objetivo mediante el Flujo de
potencia
flujo.Execute();

!printf('f');

!Obtención de los valores Fitness de convergencia
PLosses=oRed:c:LossP;
if(PLosses<BestSol){

```

```

        BestSol=PLosses;
        printf('%.8f',BestSol);
    }
    Fitness.Set(i,BestSol);
    Memory_Iter.Set(i,PLosses);

    !Reset de los estados de los Bancos de capacitores
    for(k=1;k<=N_Ants;k=k+1){
        B_CAP.Set(k,1);!Donde 1=OFF → Deshabilitado
    }
    oRed=Red.First();!Obtención de las variables de la red
    mediante el "object" Red.
    !printf('%.6f',oRed:c:LossP);

    !Actualización de la variable de Información Heurística
    k=1;
    !cont=0;
    for(O_banks=C_banks.First();O_banks;
    O_banks=C_banks.Next()){
        sbus1=O_banks.GetNode(0);!Obtencion de la barra
        conectada al Bco de Cap
        n=sbus1:loc_name;!Obtencion del nombre de la barra
        conectada al Bco de Cap

        !Búsqueda y comparación de la Barra conectada al
        Banco de capacitores con todas las Barras del Object
        "Barras"
        j=1;
        for(Inf_Barras=Barras.First();Inf_Barras;
        Inf_Barras=Barras.Next()){
            p=Inf_Barras:loc_name;!Obtención del nombre de
            cada Barra
            eq=strcmp(p,n);!Comparación de los nombres de
            las Barras

            !Obtención de los voltajes por fase
            Va=Inf_Barras:m:u:A;
            Vb=Inf_Barras:m:u:B;
            Vc=Inf_Barras:m:u:C;
            Vp=(Va+Vb+Vc)/3;
            if(eq=0){!Si el nombre de ambas barras son
            iguales -> Llenar la Matriz de Bancos de
            capacitores conectados
                nj=1/Vp;
                nij.Set(k,nj);
                !printf('%.8f - %.8f',Vp,nj);
                break;
            }
            j=j+1;
        }
    }

```

```

!cont=cont+nj;
!printf('%.6f - %.6f',nj,cont);
k=k+1;!Actualización del contador.
}

!Actualización de Feromonas 1/2
for(h=1;h<=NBarras-1;h=h+1){
    nj=nij.Get(h);
    if(nj>MayorP){
        MayorP=nj;
        !printf('%d / fila,col = %d,%d',Ant_C,h,j);
    }
    if(nj<MenorP){
        MenorP=nj;
    }
}

!Actualización de las feromonas 2/2
for(k=1;k<=N_Ants;k=k+1){
    for(h=1;h<=Steps+1;h=h+1){
        tao_o=Tao.Get(h,k);
        nj=nij.Get(k);
        Ant_tao=Step_State.Get(h,k);
        if(Ant_tao=1){
            tao=rho*tao_o+(1-rho)*(Q/nj);
        }else{
            tao=(1-rho)*tao_o;
            !tao=rho*tao_o;
        }
        Tao.Set(h,k,tao);
    }
}
printf('ITERACIONES: %d',i);
}!!!Fin del For principal del algoritmo ACO (Main Loop)
printf('!*****!');
printf('!===! BEST SOLUTION: %.8f [MW] !===!',BestSol);
printf('!*****!');

!Obtención de los valores del mejor individuo (Estados de
los Bancos de capacitores & Pasos de reactivos)
for(i=1;i<=MaxIter;i=i+1){
    PLi=Memory_Iter.Get(i);
    if(PLi=BestSol){
        for(j=1;j<=N_Ants;j=j+1){
            PL=Memory_Cap.Get(j,i);
            NStep=Memory_Step.Get(j,i);
            B_CAP.Set(j,PL);
            N_Step.Set(j,NStep);
        }
        break;
    }
}

```

```
}  
  
!Actualización de los parámetros de los Bancos de  
capacitores (Solución del algoritmo)  
l=1;  
for(O_banks=C_banks.First();O_banks;  
O_banks=C_banks.Next()){  
    O_banks:outserv=B_CAP.Get(l);  
    O_banks:ncapa=N_Step.Get(l);  
    l=l+1;  
}  
flujo.Execute();!Ejecución final del flujo de potencia
```

Apéndice E

Código de programación DPL. – Optimización por Algoritmo genético para minimizar las pérdidas mediante ubicación y dimensionamiento de Bancos de capacitores

```

! ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
!
! Autor: Walter Jeancarlo Mariscal García
!       Kevin Franklin Lopez Roldan
!
! mails: waljemar@espol.edu.ec
!       kefrlope@espol.edu.ec
!
!=====
=====
! GENETIC ALGORITHM
!=====
=====

!Declaración de variables según su tipo:
set S_cargas, C_banks, Barras, Lines, Red;
object O_cargas, O_banks, Inf_Barras, B_Lines, bus1, bus2,
oRed;
int elementos, cap, ci, i, j, NBarras, NBarrasT, Steps,
MVAR, Caps, L1, L2, eq, eq2, ep, k, l, Q, f, NuevoC;
object sbus1, sbus2;
string n,p,q,r,B,w;
double PLosses, PLi, PL, Pb;

int rand_P1, rand_P2, P1, P2, Pselect1, Pselect2, total,
p1, p2, Pco, C1, C2, Pmut;
int error, rand, J, P, MayorP, h, Bus_C, fil, col, acum,
NStep, div, bin, b, MenorP;
int Genes, Generations, Population, SizeGen, g, MaxIter,I,
rand_C, rand_S, SumP, Xselect;
double Bselect, BestSol, cont, P_mutation, P_crossover,
Xsol, Fsol;

!Inicialización de variables Objects:

!Obtención de los elementos de cada Barra
Barras=AllRelevant('*ElmTerm');

;Obtención de los elementos de cada Carga
S_cargas=AllRelevant('*ElmLod');
```

```

!Obtención de los elementos de cada Banco de capacitores
C_banks=AllRelevant('*ElmShnt');

!Obtención de los elementos de cada Línea
Lines=AllRelevant('*ElmLne');

!Obtención de las variables de toda la Red
Red=AllRelevant('*ElmNet');

!Limpia los comandos de la pantalla
ClearOutput();

!Omite los mensajes producidos por cualquier función
Echo.Execute();
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Cuento del Numero de Barras con Banco de capacitores
conectado:
NBarras=C_banks.Count();
NBarrasT=Barras.Count();
NBarras=NBarras+1;
printf('N_Barras= %d / %d',NBarras, NBarrasT);
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Inicialización de variables del sistema y matrices a
utilizar:

!Valor de cada paso en MVAR de potencia reactiva por cada
Banco de Capacitores
MVAR=0.01;

!Cantidad total de pasos de capacitancia por cada Banco de
Capacitores
Steps=30;
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!Matriz de pasos de reactivos del Banco de capacitores,
desde: 0 MVAR - Q_maximo
Step_Cap.Resize(Steps+1,NBarras-1);
Step_Cap.Init(Steps+1,NBarras-1,0);

!Matriz de Banco de capacitores conectado a la barra
correspondiente
Cap_Bus.Resize(NBarras-1,NBarrasT);
Cap_Bus.Init(NBarras-1,NBarrasT,0);

!Matriz de líneas conectadas a las barras i,j
correspondientes
Lines_Bus.Resize(NBarrasT,NBarrasT);
Lines_Bus.Init(NBarrasT,NBarrasT,0);

```

```

!Vector de Barras
Buses.Resize(NBarrasT);
Buses.Init(NBarrasT);

!Matriz de estados los STEPS de cada Banco de capacitores
Step_State.Resize(Steps+1,NBarras-1);
Step_State.Init(Steps+1,NBarras-1,0);

!Vector de Estados de servicio de cada Banco de capacitores
B_CAP.Resize(NBarras-1);
B_CAP.Init(NBarras-1);
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!Llenado de la Matriz de Bancos de capacitores y Matriz de
"Outservices":
i=1;
k=1;
!printf('-----');

for(O_banks=C_banks.First();O_banks;O_banks=C_banks.Next(
)){

    !Inicialización de los parámetros de los Bancos de
    capacitores

    O_banks:outserv=1;!Estado de servicio del Bco de cap
    O_banks:qcapn=MVAR;!Valor maximo de reactivos del Bco
    O_banks:ncapx=Steps;!Cantidad de pasos de capacitancia
    O_banks:ncapa=1;!Paso de capacitancia actual
    !O_banks:ushnm=12.66;!For 33Bus & 69Bus
    !O_banks:ushnm=13.8;!For CNEL Pinal

    !Imprime el nombre del Bco de Cap y los reactivos
    !printf('%s %.3f',O_banks, O_banks:Qact);

    !Llenado de matriz de estados de los Bancos de
    capacitores
    B_CAP.Set(i,O_banks:outserv);!(1=OFF & 0=ON)

    !Obtención de la barra conectada al Banco de capacitores
    sbus1=O_banks.GetNode(0);

    !Obtencion del nombre de la barra conectada al Banco de
    capacitores
    n=sbus1:loc_name;

    !Búsqueda y comparación de la Barra conectada al Banco
    de capacitores con todas las Barras del Object "Barras"
    j=1;

```

```

for(Inf_Barras=Barras.First();Inf_Barras;Inf_Barras=Bar
ras.Next()){
    !Obtención del nombre de cada Barra
    p=Inf_Barras:loc_name;
    !Comparación de los nombres de las Barras
    eq=strcmp(p,n);

    !Si el nombre de ambas barras son iguales -> Llenar
    la Matriz Bancos de capacitores conectados
    if(eq=0){
        !La Matriz es llenada con un valor de 1,
        indicando que hay conexión
        Cap_Bus.Set(k,j,1);
    }
    j=j+1;
}

!printf('%s',sbus1:loc_name);!Imprimir en pantalla el
nombre de la barra que conecta cada Banco de capacitores

for(j=1;j<=Steps+1;j=j+1){
    !Llenado de la Matriz de pasos de reactivo por cada
    Banco de capacitores
    Step_Cap.Set(j,i,(j-1)*MVAR);
}

!Actualización de contadores
i=i+1;
k=k+1;
}
!printf('-----');
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Llenado de la Matriz de Líneas conectadas entre las barras
correspondientes:
for(B_Lines=Lines.First(); B_Lines; B_Lines=Lines.Next()){

    sbus1=B_Lines.GetNode(0);!Obtención de la Barra i
    conectada a la Línea
    sbus2=B_Lines.GetNode(1);!Obtención de la Barra j
    conectada a la Línea

    n=sbus1:loc_name;!Obtención del nombre de la Barra i
    p=sbus2:loc_name;!Obtención del nombre de la Barra j

    !printf('%s %s',sbus1:loc_name,sbus2:loc_name);

    !Comparación del string de los nombres de las Barras para
    la localización y codificación:

```

```

j=1;

for(Inf_Barras=Barras.First();Inf_Barras;Inf_Barras=Bar
ras.Next()){!1er "for" de búsqueda

    q=Inf_Barras:loc_name;!Obtención de los nombres de
    cada Barra (i) para su comparación
    eq=strcmp(n,q);!Comparación de los nombres de la
    Barra del 1er "for" con el nombre de la Barra i

    i=1;
    !Condición de la igualdad en la comparación par la
    Barra i
    if(eq=0){
        !printf('%i %i',i,j);

        for(Inf_Barras=Barras.First();Inf_Barras;
        Inf_Barras=Barras.Next()){!2do "for" de
        búsqueda
            !Obtención de los nombres de cada Barra
            (j) para su comparación
            r=Inf_Barras:loc_name;

            !Comparación de los nombres de la Barra
            del 1er "for" con el nombre de la Barra j
            ep=strcmp(p,r);

            !Condición de la igualdad en la
            comparación para la Barra j
            if(ep=0){
                !Llenado de la 1er Diagonal de la
                Matriz de conexiones de Líneas
                Lines_Bus.Set(i,j,1);
                !Llenado de la 2da Diagonal de la
                Matriz de conexiones de Líneas
                Lines_Bus.Set(j,i,1);
                !printf('%i %i',i,j);
            }
            !Actualización del contador del 2do "for"
            i=i+1;
        }
    }
    j=j+1;!Actualización del contador del 1er "for"
}

!Finalización de la inicialización de parámetros de la RED!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!ALGORITMO GENETICO!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!Parámetros iniciales del Algoritmo Genético

```

```

Generations=100;!Numero de iteraciones
Population=200;!Cantidad de Cromosomas o individuos
(Posibles soluciones)
P_mutation=0.05;!Probabilidad de mutación del individuo
(Cromosoma)
P_crossover=0.20;!Probabilidad de cruce de reproducción de
un individuo con otros
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
Genes=NBarras-1;!Numero de Capacitores
BestSol=1e20;!Mejor solución inicial (Valor muy elevado)
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!Inicialización de Matrices y Vectores para las iteraciones
del algoritmo:

!Vector de Función Fitness(Objetivo)
Fitness.Resize(Generations);
Fitness.Init(Generations);

!Vector de los valores de solución obtenidos por cada
iteración
Memory_Iter.Resize(Generations);
Memory_Iter.Init(Generations);

!Vector de pasos de reactivo para todos los Bancos de
capacitores del sistema
N_Step.Resize(NBarras-1);
N_Step.Init(NBarras-1);

!Matrices resultantes de la solución obtenida por cada
iteración:

!Inicialización de la matriz con unos. (1 -> Off)
Memory_Cap.Resize(NBarras-1,Generations);
Memory_Cap.Init(NBarras-1,Generations,1);

!Matriz de memoria de los pasos de cada Banco de capacitores
por cada iteración
Memory_Step.Resize(NBarras-1,Generations);
Memory_Step.Init(NBarras-1,Generations,0);

!Vector de probabilidades acumuladas por cada solución
P_Acum.Resize(Population);
P_Acum.Init(Generations);
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Obtención de la dimensión del vector del Cromosoma!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!El dimensionamiento del número de elementos del vector de
cada cromosoma es realizado en base a los pasos de reactivo
del Banco de Capacitores
!Cada Gen equivale a un valor de Step codificado en Binario
i=0;
div=Steps+1;
while(div>=1) {
    bin=modulo(div,2);
    !printf('%.2f %i %i',bin,div,i);
    div=trunc(div/2);
    i=i+1;
}
!Dimensión de cada Gen del Cromosoma
SizeGen=i;

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Inicialización de todas las matrices del GA!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!Vector de soluciones por cada individuo
Fsolutions.Resize(Population);
Fsolutions.Init(Population);

!Selección natural de cada individuo de la población
P_Selection.Resize(Population);
P_Selection.Init(Population);

!Almacena los bits del vector binario de 1 Gen del cromosoma
GenBin.Resize(SizeGen);
GenBin.Init(SizeGen);

!Crea y almacena las posibles soluciones en un cromosoma
con valores enteros (Pop_Chrom -> Inicial) & (Nuevo_Chrom
-> Sigüientes iteraciones)
Pop_Chrom.Resize(Population,NBarras-1);
Pop_Chrom.Init(Population,NBarras-1,0);
Nuevo_Chrom.Resize(Population,NBarras-1);
Nuevo_Chrom.Init(Population,NBarras-1,0);

!Almacena los cromosomas de toda la población en valores
binarios codificados (Para la pop inicial y la pop de las
sigüientes generaciones)
Chromosomes.Resize(Population, (NBarras-1)*SizeGen);
Chromosomes.Init(Population, (NBarras-1)*SizeGen,0);
Chromosomes_NG.Resize(Population, (NBarras-1)*SizeGen);
Chromosomes_NG.Init(Population, (NBarras-1)*SizeGen,0);

```

```

!Almacena los valores binarios codificados de 1 cromosoma
para su posterior Decodificación
GenCap.Resize(NBarras-1,SizeGen);
GenCap.Init(NBarras-1,SizeGen,0);

!Probabilidades de selección de cada cromosoma de la
población
Prob.Resize(Population);
Prob.Init(Population);

!Almacena el número(fila) del cromosoma resultante por la
Selección natural
Chrom_Number.Resize(Population);
Chrom_Number.Init(Population);

!Almacena las posibles parejas para realizar el cruce de
reproducción
Parents.Resize(Population/2,2);
Parents.Init(Population/2,2,0);

!Almacena la fila del vector Chrom_Number
Parent_Number.Resize(Population/2,2);
Parent_Number.Init(Population/2,2,0);

!Vector que almacena con un valor de 1 los cromosomas
seleccionados
!para formar pareja UNICAS y no ser repetidas
P_Selected.Resize(Population);
P_Selected.Init(Population);

!Almacena el cromosoma de los 2 padres para su reproducción
Parent1_2.Resize(2,(NBarras-1)*SizeGen);
Parent1_2.Init(2,(NBarras-1)*SizeGen,0);

!Almacena el cromosoma de los 2 Hijos resultantes de la
reproducción
Child1_2.Resize(2,(NBarras-1)*SizeGen);
Child1_2.Init(2,(NBarras-1)*SizeGen,0);

!Vector indicador de las parejas que lograron reproducirse
(1 -> Se reprodujeron)
CrossOver.Resize(Population/2);
CrossOver.Init(Population/2);

!Matriz que almacena los 2 padres y 2 hijos de la familia
para la selección de los 2 mejores miembros (mejores
soluciones) que procederán a la siguiente Generación
Family.Resize(4,(NBarras-1)*SizeGen);
Family.Init(4,(NBarras-1)*SizeGen,0);
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

```

```

!Vector de soluciones de cada miembro de la familia para
evaluar Elitismo
Fsol_Family.Resize(4);
Fsol_Family.Init(4);

!Vector auxiliar para la localización de los Bancos de
capacitores en las barras trifásicas
Ncaps.Resize(NBarras-1);
Ncaps.Init(NBarras-1);

!printf('f');!Print indicador en caso de algún error de
código

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Generación aleatoria de la población de Cromosomas!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

for(i=1;i<=Population;i=i+1){
    for(j=1;j<=NBarras-1;j=j+1){
        rand_C=Random(0,1);
        rand_C=round(rand_C);
        if(rand_C=1){
            rand=Random(1,Steps+1);
            bin=round;
            Pop_Chrom.Set(i,j,bin);
        }else{
            Pop_Chrom.Set(i,j,1);
        }
    }
}
!printf('f'); !Print indicador en caso de algún error de
código

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Codificación Binaria de la 1era Generación!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

for(i=1;i<=Population;i=i+1){
    for(j=1;j<=NBarras-1;j=j+1){
        div=Pop_Chrom.Get(i,j);
        l=0;
        while(div>=1){
            bin=modulo(div,2);
            !printf('%.2f %i %i',bin,div,i);
            div=trunc(div/2);
            l=l+1;
            GenBin.Set(l,bin);
        }
        l=5*(j-1)+1;
        for(k=0;k<=SizeGen-1;k=k+1){
            bin=GenBin.Get(SizeGen-k);

```

```

        Chromosomes.Set(i,l,bin);
        l=l+1;
    }
    GenBin.Init(SizeGen);
}
}
!exit();

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!Evaluación de la Población inicial de Cromosomas!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

for(i=1;i<=Population;i=i+1){
    for(j=1;j<=NBarras-1;j=j+1){
        Ncaps.Init(NBarras-1);
        !Búsqueda de la Barra donde se ubica el capacitor
        k=1;
        for(B_Lines=Lines.First();B_Lines;
        B_Lines=Lines.Next()){
            sbus1=B_Lines.GetNode(0);
            sbus2=B_Lines.GetNode(1);
            n=sbus1:loc_name;
            p=sbus2:loc_name;
            L1=strlen(n);
            L2=strlen(p);
            eq=strcmp(n,p);
            if(L1>L2){
                !printf('%s%s      %s:      %d      /      %d
                %d',n,p,n,eq,L1,L2);
                B=n;
            }else if(L1=L2){
                if(eq>0){
                    !printf('%s%s      %s:      %d      /      %d
                    %d',n,p,n,eq,L1,L2);
                    B=n;
                }else{
                    !printf('%s%s      %s:      %d      /      %d
                    %d',n,p,p,eq,L1,L2);
                    B=p;
                }
            }else{
                !printf('%s%s %s: %d / %d %d',n,p,p,eq,L1,L2);
                B=p;
            }
        }
        !!!!!!!!!!!!!
        l=0;
        for(O_banks=C_banks.First();O_banks;
        O_banks=C_banks.Next()){
            l=l+1;
            sbus1=O_banks.GetNode(0);
            w=sbus1:loc_name;

```

```

        eq=strcmp(w,n);
        eq2=strcmp(w,p);
        cap=Ncaps.Get(1);
        !printf('CAP: %d',cap);
        if(eq=0 .or. eq2=0){
            if(cap=0){
                !printf('k_Ant=%d      l=%d      Bus:
                %s',k,l,w);
                Ncaps.Set(1,1);
                break;
            }
        }
        !printf('%s%s %s ',n,p,w);

        acum=0;
        for(ci=1;ci<=NBarras-1;ci=ci+1){
            cap=Ncaps.Get(ci);
            acum=acum+cap;
        }
        if(acum=j){
            break;
        }
        !!!!!!!!!!!!!!!
        k=k+1;
    }
    Xsol=Pop_Chrom.Get(i,j);
    Step_State.Set(Xsol,1,1);
    if(Xsol>1){
        B_CAP.Set(1,0);
        Memory_Cap.Set(1,i,0);
        Memory_Step.Set(1,i,Xsol-1);
    }
}

l=1;
for(O_banks=C_banks.First();O_banks;
O_banks=C_banks.Next()){
    O_banks:outserv=B_CAP.Get(1);
    for(h=1;h<=Steps+1;h=h+1){
        fil=Step_State.Get(h,1);
        if(fil=1){
            O_banks:ncapa=h-1;
        }
    }
    l=l+1;
}
flujo.Execute();!Evaluación de la Función Objetivo
mediante el Flujo de potencia

```

```

oRed=Red.First();
Fsol=1/(oRed:c:LossP+1);
Fsolutions.Set(i,Fsol);

for(k=1;k<=NBarras-1;k=k+1){
    B_CAP.Set(k,1);
}
Step_State.Init(Steps+1,NBarras-1,0);

}
!Fsolutions.Init(Population);!Reinicializa el vector de
soluciones de la población
!exit();

MaxIter=Generations;
GenSol.Resize(NBarras-1);
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!PROGRESIÓN DE LAS SIGUIENTES GENERACIONES!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

for(I=1;I<=MaxIter;I=I+1){

    !printf('select');

    !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
    !!!!!!!!!!!!!Proceso de Selección Natural!!!!!!!!!!!!!!
    !!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

    !Las siguientes líneas de código realizaran el cálculo
de probabilidad de selección por cada individuo de la
población

    SumP=0;
    for(i=1;i<=Population;i=i+1){
        Fsol=Fsolutions.Get(i);
        SumP=SumP+Fsol;
    }
    acum=0;
    for(i=1;i<=Population;i=i+1){
        Fsol=Fsolutions.Get(i);
        Pb=Fsol/SumP;
        Prob.Set(i,Pb);
        acum=acum+Pb;
        P_Acum.Set(i,acum);
    }
    for(i=1;i<=Population;i=i+1){
        rand_S=Random(0,1);
        for(j=1;j<=Population;j=j+1){
            acum=P_Acum.Get(j);
            if(rand_S<=acum){

```

```

        for(k=1;k<=(NBarras-1)*SizeGen;k=k+1){
            Xselect=Chromosomes.Get(j,k);
            Chromosomes_NG.Set(i,k,Xselect);
        }
        for(k=1;k<=NBarras-1;k=k+1){
            NuevoC=Pop_Chrom.Get(j,k);
            Nuevo_Chrom.Set(i,k,NuevoC);
        }
        Chrom_Number.Set(i,j);
        Fsol=Fsoluciones.Get(j);
        break;
    }
}
!printf('%i      Random:      %i/%.8f      -      %.8f
Fval=%.8f',i,j,rand_S,acum,Fsol);
}
Fsoluciones.Init(Population);
!exit();
!printf('-----');
!!!print indicador del proceso de reproducción!!!
!printf('reprod');

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!Proceso de Cruce de reproduccion!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

!1RA PARTE:
!Selección de las posibles parejas UNICAS - sin repetir,
por cada individuo de la población

!Inicialización de variables para la creación de parejas
P1=0;
P2=0;

Pselect1=0;
Pselect2=0;
cont=0;
j=1;
while(P1=P2 .or. cont>0 .or. j<=Population/2){
    rand_P1=Random(0,1);
    rand_P2=Random(0,1);
    acum=0;
    for(i=1;i<=Population;i=i+1){
        acum=P_Acum.Get(i);
        if(rand_P1<=acum){
            Pselect1=P_Selected.Get(i);
            P1=Chrom_Number.Get(i);
            P_Selected.Set(i,1);
            p1=i;
            break;
        }
    }
}

```

```

    }
    acum=0;
    for(i=1;i<=Population;i=i+1){
        acum=P_Acum.Get(i);
        if(rand_P2<=acum){
            Pselect2=P_Selected.Get(i);
            P2=Chrom_Number.Get(i);
            P_Selected.Set(i,1);
            p2=i;
            break;
        }
    }
    cont=Pselect1+Pselect2;
    if(cont=1){
        if(Pselect1=0){
            P_Selected.Set(p1,0);
        }
        if(Pselect2=0){
            P_Selected.Set(p2,0);
        }
    }
    if(P1<>P2 .and. cont=0){
        Parents.Set(j,1,P1);
        Parents.Set(j,2,P2);
        Parent_Number.Set(j,1,p1);
        Parent_Number.Set(j,2,p2);
        j=j+1;
        !printf('%i-%i/%i-%i      /      %.8f      -
        %.8f',p1,P1,p2,P2,rand_P1,rand_P2);
    }

    total=0;
    for(i=1;i<=Population;i=i+1){
        P=P_Selected.Get(i);
        total=total+P;
    }
    !printf('%i',total);

    if(total=Population){
        cont=0;
        P1=1;
        P2=2;
        j=Population+1;
    }
}
!Fin de la selección de parejas
!exit();
!!!print indicador del proceso de reproducción!!!
!printf('cruce');

```

```

!2da PARTE: Evaluación de la probabilidad de cruce de cada
posible pareja de la población
for(i=1;i<=Population/2;i=i+1){

    P1=Parents.Get(i,1);
    if(P1>0){

        rand=Random(0,1);
        !printf('%.8f',rand);

        !Evaluación de la probabilidad de cruce de reproducción
de la Pareja 'i' de la población
        if(rand<=P_crossover){

            CrossOver.Set(i,1);

            !Fila de la matriz de cromosomas (Ubicación del
Padre1)
            p1=Parent_Number.Get(i,1);

            !Fila de la matriz de cromosomas (Ubicación del
Padre2)
            p2=Parent_Number.Get(i,2);

            for(j=1;j<=(NBarras-1)*SizeGen;j=j+1){

                Pselect1=Chromosomes_NG.Get(p1,j);!Extracción
de la información del Padre1

                Pselect2=Chromosomes_NG.Get(p2,j);!Extracción
de la información del Padre2

                Parent1_2.Set(1,j,Pselect1);!Copia de la
información del Padre1 para realizar el cruce
con el Padre2

                Parent1_2.Set(2,j,Pselect2);!Copia de la
información del Padre2 para realizar el cruce
con el Padre1

                Family.Set(1,j,Pselect1);!Copia de la
información del Padre1 para almacenarlo en la
matriz de Familia
                Family.Set(2,j,Pselect2);!Copia de la
información del Padre2 para almacenarlo en la
matriz de Familia
            }

            Pco=Random(1,(NBarras-1)*SizeGen);!Punto de cruce
del cromosoma de cada Padre

```

```

Pco=round(Pco);!Redondeo del número aleatorio

!En estas líneas de código se realiza el cruce de
genes entre ambos padres para crear 2 progenitores
for(j=1;j<=(NBarras-1)*SizeGen;j=j+1){
    if(j<=Pco){
        C1=Parent1_2.Get(1,j);
        C2=Parent1_2.Get(2,j);
        Child1_2.Set(1,j,C1);
        Child1_2.Set(2,j,C2);
        Family.Set(3,j,C1);
        Family.Set(4,j,C2);
    }else{
        C1=Parent1_2.Get(2,j);
        C2=Parent1_2.Get(1,j);
        Child1_2.Set(1,j,C1);
        Child1_2.Set(2,j,C2);
        Family.Set(3,j,C1);
        Family.Set(4,j,C2);
    }
}
!printf('%i',Pco);

!3ra PARTE: Decodificación y Evaluación por miembro
de la Familia
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!PROCESO DE ELITISMO!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

for(f=1;f<=4;f=f+1){

    for(k=1;k<=NBarras-1;k=k+1){
        B_CAP.Set(k,1);
    }
Step_State.Init(Steps+1,NBarras-1,0);

k=0;
g=0;
for(j=1;j<=(NBarras-1)*SizeGen;j=j+1){
    if(modulo(j-1,SizeGen)=0){
        g=0;
        k=k+1;
        !printf('-%i-',k);
    }
bin=Family.Get(f,j);
g=g+1;
GenCap.Set(k,g,bin);
!printf('%i',g);
}
for(j=1;j<=NBarras-1;j=j+1){
    b=SizeGen-1;

```

```

acum=0;
for(l=1;l<=SizeGen;l=l+1){
    Xsol=GenCap.Get(j,l);
    if(Xsol=1){
        acum=acum+pow(2,b);
    }
    b=b-1;
}
if(acum=0){
    acum=1;
}
GenSol.Set(j,acum);
}

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!Evaluación de la Función Objetivo!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
for(j=1;j<=NBarras-1;j=j+1){
    Xsol=GenSol.Get(j);
    Step_State.Set(Xsol,j,1);
    if(Xsol>1){
        B_CAP.Set(Arenas, 2018);
    }
}

l=1;
for(O_banks=C_banks.First();O_banks;
O_banks=C_banks.Next()){
    O_banks:outserv=B_CAP.Get(l);
    for(h=1;h<=Steps+1;h=h+1){
        fil=Step_State.Get(h,1);
        if(fil=1){
            O_banks:ncapa=h-1;
        }
    }
    l=l+1;
}
!Evaluación de la Función Objetivo mediante el
Flujo de potencia
flujo.Execute();
oRed=Red.First();
PLosses=oRed:c:LossP;
!Fsol=1/(PLosses+1);
Fsol_Family.Set(f,PLosses);
}
for(j=1;j<=2;j=j+1){
    MenorP=10;
    for(h=1;h<=4;h=h+1){
        P=Fsol_Family.Get(h);
        !printf('F%d: %.8f',h,P);
        if(P<MenorP .and. P>0){
            MenorP=P;

```

```

        Bselect=h;
    }
}
!printf('SELECCIONADOS:           %d           /
%.8f',Bselect,MenorP);
Fsol_Family.Set(Bselect,0);
if(j=1){
    for(l=1;l<=(NBarras-1)*SizeGen;l=l+1){
        Pselect1=Family.Get(Bselect,l);
        Chromosomes_NG.Set(p1,l,Pselect1);
    }
}
else{
    for(l=1;l<=(NBarras-1)*SizeGen;l=l+1){
        Pselect1=Family.Get(Bselect,l);
        Chromosomes_NG.Set(p2,l,Pselect1);
    }
}
}
    }!Fin del for - Mejores de la familia
}!Fin del if - rand crossover
}!If - vacío del vector parents
}
!exit();
!printf('-----');
!printf('mutacion');
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!Proceso de Mutación!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

for(i=1;i<=Population;i=i+1){
    rand=Random(0,1);
    !printf('%.8f',rand);
    !Evaluación de la probabilidad de cruce de Mutación del
    individuo 'i'

    if(rand<=P_mutation){
        !Ubicación aleatoria del bit a mutar de cada
        individuo
        Pmut=Random(1,(NBarras-1)*SizeGen);
        Pmut=round(Pmut);!Redondeo del bit a entero
        !printf('%d',Pmut);
        P=Chromosomes_NG.Get(i,Pmut);
        if(P=1){
            Chromosomes_NG.Set(i,Pmut,0);
        }
        else{
            Chromosomes_NG.Set(i,Pmut,1);
        }
    }
}
}
!exit();

```



```

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!Evaluación de la Función Fitness!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!

for(j=1;j<=NBarras-1;j=j+1){
    Xsol=GenSol.Get(j);
    Pop_Chrom.Set(i,j,Xsol);
    Step_State.Set(Xsol,j,1);
    if(Xsol>1){
        B_CAP.Set(Arenas, 2018);
        !Memory_Cap.Set(j,I,0);
        !Memory_Step.Set(j,I,Xsol-1);
    }
}

l=1;
for(O_banks=C_banks.First();O_banks;
O_banks=C_banks.Next()){

    O_banks:outserv=B_CAP.Get(l);
    for(h=1;h<=Steps+1;h=h+1){
        fil=Step_State.Get(h,l);
        if(fil=1){
            O_banks:ncapa=h-1;
        }
    }
    l=l+1;
}

!Evaluación de la Función Objetivo mediante el Flujo de
potencia
flujo.Execute();
oRed=Red.First();!Obtención de las variables de la red
mediante el object Red.

!printf('P: %.8f',oRed:c:LossP);

!Obtención de los valores Fitness de convergencia
PLosses=oRed:c:LossP;!Obtención de las perdidas
Fsol=1/(PLosses+1);!Cálculo de la func. Fitness
Fsolutions.Set(i,Fsol);

}!Fin: for - Population

MayorP=0;
for(h=1;h<=Population;h=h+1){
    P=Fsolutions.Get(h);
    if(P>MayorP){
        Bselect=h;
    }
}

```

```

        MayorP=P;
    }
}
BestSol=(1/MayorP)-1;
Fitness.Set(I,BestSol);

!Actualización de los cromosomas
for(i=1;i<=Population;i=i+1){
    for(j=1;j<=(NBarras-1)*SizeGen;j=j+1){
        Xselect=Chromosomes_NG.Get(i,j);
        Chromosomes.Set(i,j,Xselect);
    }
}

!Memory_Iter.Set(I,PLosses);

!IMPRIME EL # DE ITERACIONES Y LOS VALORES DE LA FUNCION
OBJETIVO Y FUNCION FITNESS Y EL NÚMERO DEL MEJOR INDIVIDUO
(VECTOR CROMOSOMA)
printf('ITERACIONES: %d',I);
printf('Xbest = %d : %.8f / %.8f',Bselect,MayorP,BestSol);
printf('-----');

}!Fin del for - Generations (ITERACIONES)

!Obtención de los valores del mejor individuo (Estados de
cada Banco de capacitores & pasos de reactivos)
for(j=1;j<=NBarras-1;j=j+1){
    fil=Pop_Chrom.Get(Bselect,j);
    N_Step.Set(j,fil-1);
    if(fil>1){
        B_CAP.Set(Arenas, 2018);
    }else{
        B_CAP.Set(j,1);
    }
}

!Actualización de los parámetros de los Bancos de Capacitores
(Solución del algoritmo)

l=1;
for(O_banks=C_banks.First();O_banks;
O_banks=C_banks.Next()){
    O_banks:outserv=B_CAP.Get(l);
    O_banks:ncapa=N_Step.Get(l);
    l=l+1;
}
flujo.Execute();!Ejecución final del flujo de potencia

```


REFERENCIAS

Referencias

APAZA, M. 2017. *Estudio de control y disminución de pérdidas dentro del servicio eléctrico Puno alimentador 101-concesión eléctrica de Electropuno SAA* [Online]. Available: <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/7044> [Accessed].

ARCONEL. 2017. *Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano* [Online]. Ministerio de Electricidad y Energías Renovables. Available: <http://revista.regulacionelectrica.gob.ec:9000/estadistica/estadistica/> [Accessed].

ARENAS, J. A. P. 2018. *Metodología para la planeación de las maniobras de control de voltaje en un sistema eléctrico de potencia*. Maestría Thesis, Universidad Nacional de Colombia.

ARREDONDO, D., GIL, W. & MORA, J. 2016. Metodología para la selección de atributos y condiciones operativas para la localización de fallas basadas en la máquina de soporte virtual. *Revista Tecnura*.

ASKARZADEH, A. 2016. Capacitor placement in distribution systems for power loss reduction and voltage improvement: a new methodology. Institute of Science and Higt Technology and Environmental Sciences.

CANDELO-BECERRA, J. & HERNÁNDEZ-RIÑAO, H. 2015. Distributed generation placement in radial distribution networks using a bat-inspired algorithm. *DYNA*.

CORDOVA MITE, C. N. 2015. *Modelamiento y simulación de la optimización del proceso de generación de facturas utilizando metodología BPM BIZAGI* [Online]. Machala: UTMACHALA. Available: <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/5124> [Accessed].

DEVABALAJI, K., IMRAN, A. & YUVARAJ, T. 2015. Power Loss Minimization in Radial Distribution System. *Science Direct*.

DUQUE, C., MARMOLEJO, E. & RUEDA, M. 2004. Análisis de prospectiva de la generación distribuida (GD) en el sector eléctrico colombiano. Revista de ingeniería.

EBRAHIMI, A., RAMEZANI, M. & MOIENI, M. 2012. Optimal Operation of Distribution Network Considering Renewable Energy Source By Bynary Particle Swarm Optimizaion and Fuzzy Theory. International Conference on Electricity Distribution.

FACTORY, D. P. 2017. Advanced Tutorial - Dynamic Modelling (DSL).

FLÓRES, M. & JOSÉ, J. 2007. Localización de faltas en sistemas de distribución de energía eléctrica usando métodos basados en el conocimiento. Universidad de Girona.

GAVRILAS, M. 2010. Heuristic and metaheuristics optimization techniques with application to power systems In proceedings of the 12th WSEAS international conference on Mathematical methods and computational techniques in electrical engineering.

GENOVEZ, K. & UREÑA, B. 2018. Modelo y análisis de armónicos en sistemas de distribución. Universidad de Cuenca.

GNANASEKARAN, N., CHANDRAMOHAN, S., SATHISH, P. & MOHAMED, A. 2016. Optimal placement of capacitors in radial distribution system using shark smell optimization algorithm. Ain Shams Engineering Journal.

KULMALA, A., MUTANEN, A., KOTO, A., REPO, S. & JARVENAUSTA, P. 2010. RTDS verification of a coordinated voltage control implementation for distribution networks with distributed generation. In Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe.

LIANG, R. & CHENG, C. 2001. Dispatch of main transformer ULTC and capacitors in distribution systems. IEEE Transactions on power delivery.

- LIU, C. 2014. Multi-Robot Task Allocation for Inspection Problems with Cooperative Tasks Using Hybrid Genetic Algorithms. Deutsche Nationalbibliothek.
- LOHIA, S., PRAKASH, O. & RAM, S. 2016. Optimal capacitor placement in distribution system using genetic algorithm. IEEE.
- MITHULANANTHAN, N., HUNG, D., QUOC, D. & LEE, K. 2016. Intelligent network integration of distributed renewable generation. Springer.
- NIKOUKAR, J. & GANDOMKAR, M. 2005. Capacitor Placement in Distribution Networks using ant colony algorithm. WSEAS Transactions on Systems.
- PÉREZ, J. 2016. Metodología para la planeación de las maniobras de control de voltaje de un sistema eléctrico de potencia. Universidad nacional de colombia.
- PRASAD, C. & SURESH, M. 2014. Capacitor Placement Using Bat Algorithm for Maximum Annual Savings in Radial Distribution Systems. International Journal of Engineering Research and Applications.
- PRASAD, P., SIVANAGARAJU, S. & SREENIVASULU, N. 2007. Network reconfiguration for load balancing in radial distribution systems using genetic algorithm. *Electric Power Components and Systems* 36, 63-72.
- RAMÍREZ, S. & CANO, E. 2006. Calidad de Servicio de Energía eléctrica. Universidad Nacional de Colombia.
- REDDY, V. & MANOJ, A. 2012. Optimal Capacitor Placement for Loss Reduction in Distribution Systems Using Bat Algorithm. IOSR journal of Engineering.
- RIOFRÍO, A., CARRIÓN, D., OROZCO, M., VACA, D. & MARTÍNEZ, J. 2014. Análisis del consumo energético en procesos de cocción eficiente para el sector residencial. Memorias del congreso latinoamericano de ingeniería mecánica COLIM.

- ROJAS, H., RIVAS, E. & JARAMILLO, A. 2014. Aspectos técnicos y normativos para el monitoreo y medición de armónicos. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- RUKUNDU, O. & CAO, H. 2016. Advances on image interpolation based on ant colony algorithm. SpringerPlus.
- SIRJANI, R. & HASSANPOUR, B. 2012. A new ant colony-based method for optimal capacitor placement and sizing in distribution systems. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology.
- SIRJANI, R., MOHAMED, A. & SHAREEF, H. 2012. Heuristic Optimization Techniques to Determine Optimal Capacitor Placement and Sizing in Radial Distribution Networks: A Comprehensive Review. Przegląd Elektrotechniczny (Electr. Rev.).
- SUÁREZ GOFFE, H. D. 2016. *Reducción de pérdidas eléctricas en los circuitos de distribución primarios O-1844 y M-2307 pertenecientes al municipio Caimanera*. Tesis Doctoral, Instituto Superior Minero Meralúrgico de MOA.
- SUÁREZ, H. 2016. *Reducción de pérdidas eléctricas en los circuitos de distribución primarios O-1844 y M-2307 pertenecientes al municipio Caimanera* [Online]. MOA: Instituto Superior Minero Meralúrgico de MOA. Available: <http://ninive.ismm.edu.cu/handle/123456789/1897> [Accessed].
- TRONCOSO, C. & SUÁREZ, A. 2017. Control de Nivel de Pulpa en un Circuito de Flotación Utilizando una Estrategia de Control Predictivo. Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial.
- ULUSKI, R. 2012. Advanced Applications for Distribution System Optimization. Innovative Smart Grid Technologies.
- VANISHREE, J. & RAMESH, V. 2014. Voltage profile improvement in power systems - A review. International conference on Advances in Electrical Engineering.

VÁSQUEZ GRANDA, P. M. 2013. *Parametrización, control, determinación, y reducción de pérdidas de energía en base a la optimización en el montaje de estaciones de transformación en la provincia de Morona Santiago*. MasterThesis, Universidad de Cuenca.

ZHANG, D., FU, Z. & ZHANG, L. 2007. *An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems* [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779606001477> [Accessed 5-6 77].