

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y
ELECTRÓNICA**

**DETERMINACIÓN DE RUTA ÓPTIMA DE ALIMENTADORES
PRIMARIOS AÉREOS DE MEDIO VOLTAJE UTILIZANDO
ALGORITMOS DE OPTIMIZACIÓN**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN “INGENIERÍA ELÉCTRICA”**

FLAVIO JAVIER ITAZ ALCUACER

flavio.itaz@epn.edu.ec

DIRECTOR: DR. HUGO NEPTALÍ ARCOS MARTÍNEZ

hugo.arcos@epn.edu.ec

Quito, Julio 2019

AVAL

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Flavio Javier Itaz Alcuacer, bajo mi supervisión.

DR. HUGO ARCOS
DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo Flavio Javier Itaz Alcuacer, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración dejo constancia de que la Escuela Politécnica Nacional podrá hacer uso del presente trabajo según los términos estipulados en la Ley, Reglamentos y Normas vigentes.

FLAVIO JAVIER ITAZ ALCUACER

DEDICATORIA

Dedico este trabajo

A Dios Todo Poderoso, quien ha sido mi Fortaleza, mi Salvación y Aquel que me permite cumplir mis objetivos y mis sueños.

A mis padres, quienes me han brindado una educación digna; su enseñanza y su amor han hecho de mí el hombre que soy ahora.

A mi hermano Kléber, le presento también mi eterna gratitud por todo su apoyo y amor incondicional, espero que el presente escrito sea uno de los mejores regalos que le pueda ofrecer.

AGRADECIMIENTO

Quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos a todas las personas que han colaborado en la realización de este trabajo. A todos ustedes les presento mi respeto y mi gratitud.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AVAL	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3 ALCANCE	3
2. FUNDAMENTO TEÓRICO	5
2.1 CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA.....	5
2.2 NIVELES DE VOLTAJE	6
2.3 SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	6
2.4 ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN UN ALIMENTADOR PRIMARIO	7
2.5 TIPOS DE ALIMENTADORES PRIMARIOS.....	7
2.5.1 Alimentador Primario Radial Simple	8
2.5.2 Alimentador Primario Anillo Abierto	9
2.5.3 Alimentador Primario en Malla.....	10
2.6 CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA	11
2.6.1 Tasa de falla.....	11
2.6.2 Tiempo medio de reparación (MTTR).....	12
2.6.3 Índices de confiabilidad utilizados en sistemas eléctricos de distribución ...	12
3. TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN UTILIZADAS EN PLANIFICACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN.....	13
3.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE GRAFOS	14
3.1.1 Definición de grafo y digrafo	14
3.1.2 Digrafo Ponderado	15
3.1.3 Camino de un grafo	16
3.2 ALGORITMO DE DIJKSTRA	17

3.2.1	Aplicación del Algoritmo de Dijkstra	18
3.2.2	Determinación del costo mínimo	26
3.3	ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN DE COLONIA DE HORMIGAS	27
3.3.1	Modelo matemático	28
3.3.2	Construcción de Soluciones	28
3.3.3	Búsqueda Local.....	29
3.3.4	Actualización de Feromonas.....	30
3.3.5	Aplicación de la Optimización de Colonia de Hormigas	31
3.3.6	Actualización de feromonas	39
4.	METODOLOGÍA DE RECORRIDO DE CONFIGURACIÓN EN ALIMENTADORES PRIMARIOS.....	41
4.1	DISTANCIAS ÓPTIMAS ENTRE CENTROS DE TRANSFORMACIÓN .	41
4.2	CONFIGURACIÓN ÓPTIMA DEL ALIMENTADOR PRIMARIO EN FORMA DE ANILLO	42
4.3	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.	42
4.3.1	Distancia óptima entre centros de transformación.	43
4.3.2	Implementación del algoritmo de Dijkstra para determinar distancia óptima entre centros de transformación.	45
4.3.3	Implementación del algoritmo y determinación de ruta óptima en anillo para alimentadores primarios.....	47
4.4	APLICACIÓN METODOLÓGICA EN REDES REALES	49
4.4.1	Aplicación metodológica en alimentador primario 3A.....	49
4.4.2	Análisis comparativo en alimentador primario 3A	52
4.4.3	Aplicación metodológica en alimentador primario 3D.....	56
4.4.4	Análisis comparativo en alimentador primario 3D	59
5.	CONCLUSIONES	64
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
7.	ANEXOS.....	68
	ORDEN DE EMPASTADO.....	69

RESUMEN

Con la finalidad de mejorar el diseño y la construcción de alimentadores primarios, en el presente proyecto de titulación se propone el uso de dos algoritmos matemáticos de optimización, y el uso una herramienta computacional de acceso libre. El trabajo en conjunto de los algoritmos y la herramienta computacional es optimizar el tiempo de diseño de alimentadores primarios y la calidad del servicio eléctrico, durante la fase de la planificación de alimentadores primarios.

Los algoritmos utilizados son: algoritmo de Dijkstra y optimización por colonia de hormigas; estos algoritmos son conocidos como algoritmos metaheurísticos, y basan su desarrollo en la teoría de grafos, es decir, en puntos específicos (conocidos como nodos) y en los caminos que permiten conectar estos puntos (aristas); de manera que se puede hacer una similitud entre nodos con ubicaciones de transformadores y aristas con vías públicas, permitiendo como resultado la optimización de la ruta de un alimentador primario. Este proceso de optimización conlleva el manejo de una gran cantidad de datos, razón por la cual, es necesario el uso de una herramienta computacional que agilice el proceso.

Por estos motivos, en el presente trabajo se realiza la explicación teórica relacionada a dichos algoritmos para posteriormente mostrar su funcionamiento matemático y su aplicación dentro del diseño de alimentadores primarios, tomando como ejemplo dos alimentadores reales. Se presenta como resultados: el código de programación desarrollado, un manual de usuario que permite facilitar su uso y se muestra mediante bases numéricas el mejoramiento de índices confiabilidad de los alimentadores por medio de esta optimización.

ABSTRACT

In order to improve the design and construction of primary feeders, in the present project, we propose the use of two mathematical optimization algorithms and the use of a free access computational tool. The joint work of the algorithms and the computational tool will optimize the design time of primary feeders and the quality of the electric service, during the planning phase of primary feeders.

The algorithms used are: Dijkstra algorithm and optimization by ant colony; these algorithms are known as metaheuristic algorithms, and base their development on graph theory, it means, on specific points (known as nodes) and on the paths that allow connecting these points (edges); so that a similarity can be made between nodes with transformer and edge locations with public roads, allowing as a result the optimization of the route of a primary feeder. This optimization process involves the handling of a large amount of data, that is the reason why it is necessary to use a computational tool that speeds up the process.

For these reasons, in the present work the theoretical explanation related to said algorithms is done to later show its mathematical operation and its application within the design of primary feeders, taking as an example two real feeders. Is presented as results the programming code developed, a user manual that facilitates its use and the improvement of the feeders through this optimization is shown through numerical bases.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente en nuestro país, la planificación y diseño de redes eléctricas de distribución se realiza en base al criterio y la experiencia del diseñador en la mayoría de las ocasiones, sin tomar en cuenta el uso de métodos o procedimientos que permitan realizar el análisis de la calidad del servicio técnico y sin el uso de herramientas computacionales adecuadas. En consecuencia, se ha prescindido de técnicas de optimización para el diseño de alimentadores primarios por tanto, no se obtiene información que permita conocer las tasas de retorno de la inversión realizada ni de los beneficios obtenidos por la aplicación de análisis de confiabilidad.

La planificación de los sistemas eléctricos de distribución es un componente importante para el desarrollo energético y económico de un país[1]. Por esta razón, una adecuada planificación permite desarrollar sistemas eléctricos que respondan a la demanda prevista a largo plazo y determinar una estrategia más económica. En base a lo mencionado se puede afirmar que no se han optimizando los recursos y no se dispone de una realimentación hacia la planificación en relación a los índices de confiabilidad en el proceso de planificación [2].

Dentro de las empresas de distribución de energía eléctrica existe la necesidad del uso de herramientas computacionales basadas en técnicas de optimización que realicen tareas relacionadas a la planificación o expansión de complejos sistemas de distribución de medio y bajo voltaje [2]. El objetivo es determinar acciones de planificación que, aunque no minimicen la inversión inicial, permitan minimizar los costos operacionales de manera que se puedan asegurar criterios de calidad y confiabilidad. Esto se puede obtener a través de técnicas de optimización que provean el diseño y el camino de alimentadores primarios, localización de transformadores, ubicación de subestaciones de medio y bajo voltaje, tomando en cuenta restricciones físicas, operacionales y financieras [2].

El presente proyecto se fundamenta en una serie de trabajos investigativos de índole empresarial y académica que han permitido realizar la planificación de sistemas de distribución haciendo uso de algoritmos genéticos de optimización que son desarrollados en programas computacionales [2]. Estos algoritmos requieren el manejo de una gran cantidad de información; por esta razón se desarrolla una herramienta computacional con el objetivo de poder manejar grandes cantidades de información y simultáneamente disminuir el tiempo en el cual se realiza su procesamiento.

La planificación de redes de distribución es un proceso en el que se identifican posibles alternativas a fin de escoger aquella que cumpla con el objetivo principal de abastecer la

demanda de los usuarios, tomando en cuenta adecuados niveles de calidad y confiabilidad del servicio eléctrico. Estas alternativas pueden estar en función de la calidad de materiales empleados, tiempo de construcción, localización y capacidad de centros de transformación, ruta de las redes primarias y secundarias [3], entre otros; es por esta razón que se hace necesario el uso de algoritmos de optimización que permitan seleccionar la mejor de todas las opciones, de manera que minimice el costo total de la inversión y se garantice la mayor confiabilidad del sistema hacia el usuario final [4].

Considerando que en el Ecuador se desea garantizar un suministro eléctrico continuo y confiable, se ha visto en la necesidad de incluir en los estudios de planificación, metodologías que permitan mejorar la calidad del servicio eléctrico [5]. La selección de alternativas de diseño basadas en algoritmos de optimización permitirá definir de forma adecuada: posibles cambios en la configuración de alimentadores primarios, calibres de conductores, ubicación de centros de transformación, entre otros [3]. Los resultados de estos estudios de planificación implican un incremento, muchas veces alto, en la inversión requerida y por tal razón en algunas ocasiones se omiten este tipo de inversiones por parte de las empresas eléctricas.

Sin lugar a dudas es necesario realizar una evaluación que permita cuantificar los beneficios económicos que se producirían debido a la aplicación de criterios de confiabilidad en la etapa de planificación, para de esta manera obtener el tiempo en el cual se podría recuperar la inversión realizada. Es necesario también considerar que, la aplicación de estos criterios en el diseño de los sistemas de distribución produce varias alternativas que deberán ser analizadas con la intención de conocer si se cuenta con la capacidad de recursos económicos suficientes para obtener un resultado óptimo, ya que será necesario tener en cuenta el crecimiento de la infraestructura de distribución eléctrica, manteniendo la confiabilidad del servicio y el menor costo posible [2].

Existen metodologías que permiten optimizar de manera conjunta la ubicación de transformadores de distribución y la configuración de alimentadores primarios. Estas dos tareas son de vital importancia al momento de realizar la planificación de la expansión de una red, ya que guardan una estrecha relación debido a que los lugares en los cuales se sitúen los centros de transformación condicionan la configuración de la red primaria que los alimenta [6].

La ubicación de transformadores de distribución y la configuración de alimentadores primarios son los problemas más importantes de resolver desde el punto de vista de confiabilidad del sistema [2]. Por esta razón, el presente trabajo se centrará en determinar:

la configuración óptima de alimentadores primarios mediante la implementación del algoritmo de Optimización con Teoría de Grafos (Algoritmo de Dijkstra) y la técnica metaheurística de Optimización de Colonia de Hormigas [8].

El desarrollo de los algoritmos utilizados en la metodología propuesta ha sido realizado mediante herramientas de software de simulación de uso libre, de manera que podrán ser utilizados en la planificación de redes eléctricas de distribución.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar una herramienta de software en lenguaje PYTHON que mediante la implementación de algoritmos matemáticos de optimización contribuya al mejoramiento de la planificación de redes eléctricas de distribución, estableciendo específicamente mejoras en la configuración de alimentadores primarios de medio voltaje y tomando en cuenta criterios de confiabilidad del servicio eléctrico. Esta herramienta deberá tener la característica de mostrar y extraer la información necesaria para tomar decisiones en cuanto a alternativas de expansión de sistemas eléctricos de distribución.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Mostrar y explicar de manera detallada toda la información obtenida a partir de la investigación realizada sobre modelos matemáticos de optimización utilizados en el diseño y planificación de redes eléctricas de distribución, de manera que la información recolectada esté centrada en la configuración óptima de alimentadores primarios de medio voltaje.

Desarrollar el código de programación basado en los algoritmos de optimización dentro del lenguaje de programación libre PYTHON.

Realizar pruebas operativas mediante la implementación de ejemplos prácticos de alimentadores primarios aéreos o subterráneos de empresas de distribución del país.

Explicar el proceso de funcionamiento de la herramienta de software implementada mediante la estructuración de un manual que le permita al usuario ingresar los datos necesarios, procesar la información, obtener y analizar los resultados.

1.3 ALCANCE

Para la elaboración del presente trabajo de titulación se realizará una investigación bibliográfica acerca de sistemas eléctricos de distribución y alimentadores primarios, se analizarán algoritmos matemáticos que son utilizados para la optimización de redes primarias y se definirán los algoritmos a utilizarse en el presente trabajo.

Es necesaria la familiarización con el lenguaje de programación PYTHON y el sistema de información geográfica a utilizarse para la elaboración de la herramienta computacional que estará fundamentada en los algoritmos de optimización previamente definidos.

Se desarrollará el código de programación de los algoritmos a utilizarse y se realizarán pruebas de funcionamiento sobre dos escenarios reales de alimentadores aéreos para posteriormente elaborar un análisis de los resultados.

Se elaborará un manual de usuario que proporcionará la información necesaria para comprender el uso y el funcionamiento de la herramienta computacional.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

En este capítulo se muestra la información que se considera más relevante y absolutamente necesaria para comprender el escrito desarrollado en referencia a la Planificación de Sistemas Eléctricos de Distribución, también se amplían los conceptos pertinentes a los algoritmos de optimización utilizados y el software desarrollado en el presente proyecto.

2.1 CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

Actualmente las empresas de energía eléctrica están trabajando para mejorar la calidad de su servicio, es por esta razón que se han establecido normas y regulaciones que permitan entregar un servicio de buena calidad hacia los consumidores.

El estándar IEEE 1159/1995 define la “Calidad de Energía Eléctrica” como la gran variedad de fenómenos electromagnéticos que caracterizan la tensión y la corriente en un instante dado y en un punto determinado de la red eléctrica [9].

La energía eléctrica que es utilizada por los consumidores presenta una variación de sus características cuando se conectan las cargas eléctricas al sistema de distribución, ya que se originan corrientes eléctricas en los conductores de la red que son proporcionales a las demandas de los consumidores y producen caídas de tensión. Por tanto, el voltaje suministrado va a estar en función de las caídas de voltaje de cada uno de los elementos que pertenecen a la red, es decir, el voltaje depende en buena parte de la demanda eléctrica de los consumidores [9].

Es importante que el suministro de energía eléctrica sea el adecuado, ya que una disminución de la calidad de la energía eléctrica puede producir que los dispositivos eléctricos y electrónicos presenten mal funcionamiento e inclusive daños. Dependiendo de la aplicación los daños ocasionados por la mala calidad de la energía eléctrica pueden generar grandes pérdidas económicas si se tratan de equipos asociados a procesos de tipo industrial.

En el Ecuador, la Agencia de Regulación y Control de Electricidad normaliza la calidad de la energía mediante la regulación 005/17.

2.2 NIVELES DE VOLTAJE

Por disposición de la Agencia de Regulación y Control de Electricidad (ARCONEL) en la regulación Nro. ARCONEL 005/17 se definen los siguientes niveles de voltaje:

Bajo Voltaje	:	Menor a 0,6 kV
Medio Voltaje (Redes Primarias)	:	Desde 0,6 kV hasta 40 kV
Alto Voltaje	:	Mayor a 40 kV

La Empresa Eléctrica Quito ha establecido los siguientes niveles de voltaje para alimentadores primarios:

- 22,8 kV
- 13,2 kV
- 6,3 kV

2.3 SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Un sistema de distribución de energía eléctrica es el conjunto de equipos que permiten llevar la energía eléctrica desde las subestaciones de distribución hacia los usuarios finales por medio de redes eléctricas de medio y bajo voltaje, las cuales pueden ser aéreas o subterráneas.

Los principales elementos que constituyen el sistema de distribución de energía eléctrica son:

Subestación de distribución. - Es una instalación encargada de recibir y reducir el voltaje proveniente de las líneas de subtransmisión para obtener niveles adecuados de voltaje que permitan proveer de energía a los alimentadores primarios que salen desde la subestación.

Red primaria o alimentador primario.- Se denomina alimentador primario al circuito eléctrico que se deriva desde la salida de una subestación de distribución hasta los bobinados primarios de los transformadores de distribución, con el objetivo de transportar energía eléctrica en niveles de medio voltaje [10].

Red Secundaria.- Son los circuitos que inician en el bobinado secundario de los transformadores de distribución y son los encargados de distribuir la energía eléctrica en niveles de bajo voltaje a los consumidores o usuarios.

2.4 ELEMENTOS QUE CONSTITUYEN UN ALIMENTADOR PRIMARIO

Los alimentadores primarios pueden ser aéreos o subterráneos y estarán constituidos por las siguientes partes principales [11]:

Troncal. - Es la parte del alimentador que soporta la mayor o circulación de corriente de todo el circuito.

Derivación lateral. - Es una bifurcación que sale desde el troncal y maneja una menor cantidad de corriente que el troncal.

Derivación sublateral. - Es una ramificación que nace desde la derivación lateral y es el circuito que tendrá menor capacidad respecto a la derivación lateral debido a que alimenta a pocos transformadores.

Las partes que conforman un alimentador primario se encuentran ilustradas en la Figura 2.1

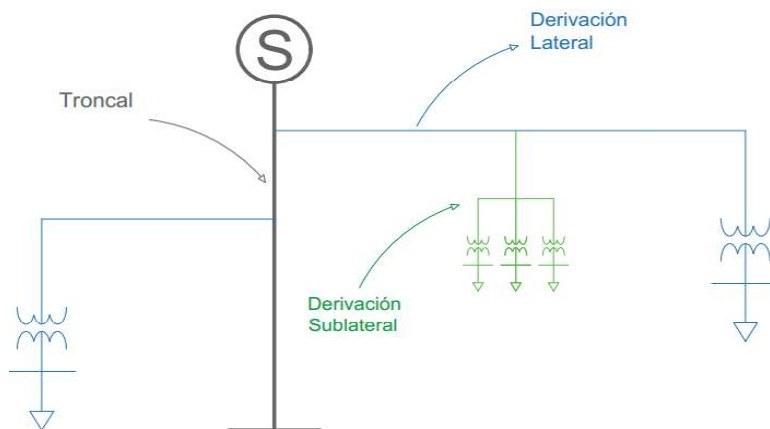


Figura 2.1. Partes del alimentador primario

2.5 TIPOS DE ALIMENTADORES PRIMARIOS

Aunque las formas de los alimentadores primarios pueden ser muy variadas, a continuación se presentan las configuraciones más comunes y utilizadas en el Ecuador:

2.5.1 Alimentador Primario Radial Simple

Este tipo de alimentador inicia desde una subestación y a lo largo de todo su recorrido no se interseca con otra subestación u otro alimentador, de esta manera lleva energía a varios transformadores individualmente [12].

Esta configuración es la más utilizada por ser sencilla de construir e instalar y por tanto más económica. Es recomendable implementar este tipo de configuración para zonas rurales, con bajas o medias densidades de carga y que abarquen una gran distancia [12].

El sistema de distribución de energía eléctrica con configuración radial tiene el gran inconveniente de presentar una adecuada confiabilidad, ya que en caso de presentarse una falla en el alimentador, los consumidores asociados no podrían disponer de energía eléctrica durante un largo periodo de tiempo, puesto que no existiría ninguna ruta alternativa de reconexión. En caso de presentarse algún fallo en el transformador, también se interrumpiría la alimentación de energía. En otras palabras, el consumidor del sistema eléctrico de tipo radial no dispondría de energía eléctrica hasta que se reactive el alimentador o el transformador [13].

En la Figura 2.2 se encuentra la representación de un alimentador primario radial.

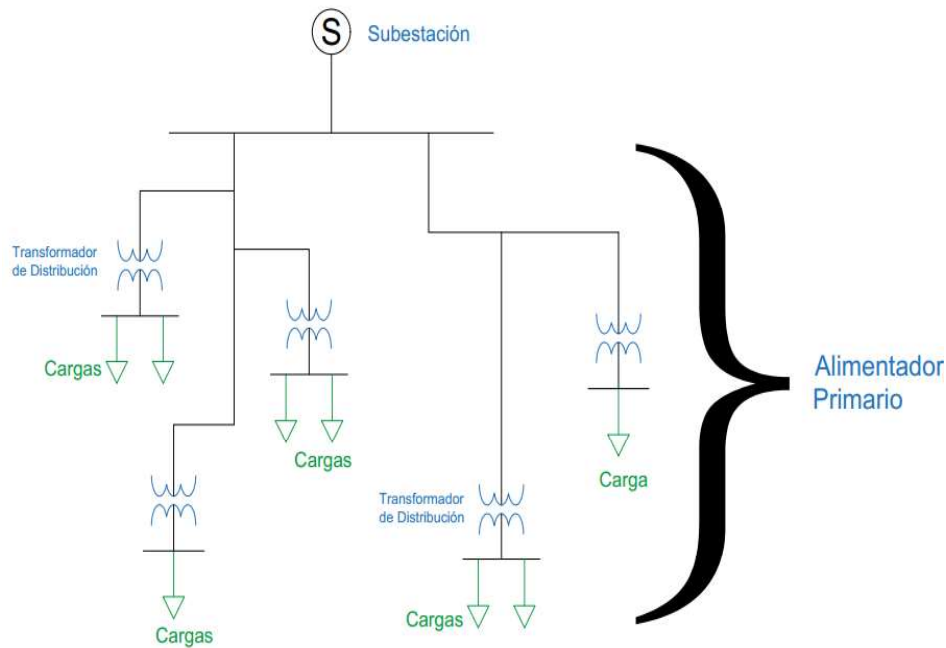


Figura 2.2. Alimentador primario radial

2.5.2 Alimentador Primario Anillo Abierto

El alimentador primario en anillo (como se muestra en la Figura 2.3) posee características similares al sistema radial, se diferencia principalmente en que dispone de una conexión con otros alimentadores.

El inconveniente del sistema de distribución eléctrica con el alimentador primario en configuración radial puede superarse con la configuración en red de anillo abierto. En este caso si un alimentador presenta un fallo o se encuentra en mantenimiento, la configuración permitirá suministrar energía eléctrica, proveniente desde otros alimentadores o subestaciones, a la red en anillo. De esta manera el suministro a los consumidores no se ve afectado incluso cuando cualquier alimentador queda fuera de servicio. Además, el anillo está provisto de diferentes secciones, es decir; si ocurre alguna falla en cualquier parte del recorrido del anillo, ésta sección se puede aislar abriendo el tramo que se encuentre en falla [14].

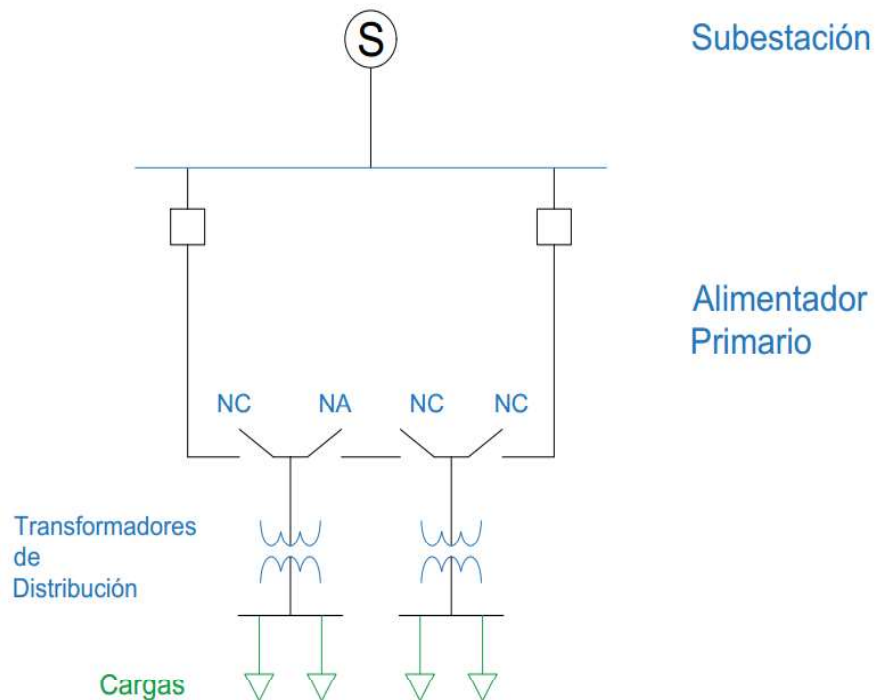


Figura 2.3. Alimentador primario en anillo

El sistema en anillo abierto provee una mejor continuidad de servicio que el sistema radial, presentando interrupciones cortas producidas por la conexión o desconexión. Este tipo de configuración es más costoso debido a que se requiere mayor longitud de conductores eléctricos y mayor cantidad de elementos de corte y seccionamiento.

2.5.3 Alimentador Primario en Malla

En la Figura 2.4 se muestra el diagrama de un alimentador primario en malla.

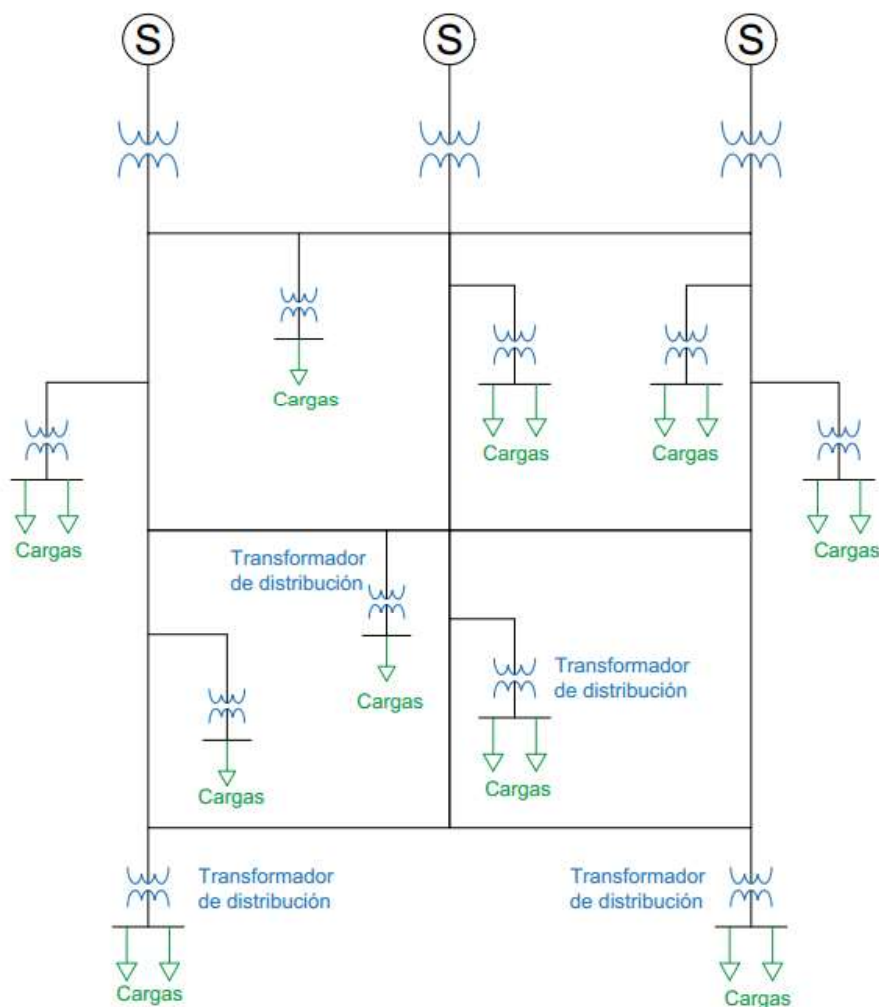


Figura 2.4. Alimentador primario en malla

Este tipo de configuración presenta una mayor cantidad de interconexiones, esto mejora en gran medida la confiabilidad, pero obviamente su costo aumenta considerablemente. Presenta también una mayor complejidad en cuanto a sus protecciones ya que es necesario tener en cuenta muchas interconexiones, no solo entre alimentadores sino

también entre subestaciones adyacentes. La eficiencia que se presenta en este tipo de alimentadores es más alta [12].

2.6 CONFIABILIDAD EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

La confiabilidad en sistemas eléctricos de distribución, es la capacidad de abastecer de servicio eléctrico al usuario evitando al máximo interrupciones[15]. Los sistemas de distribución presentan una gran importancia en la continuidad del servicio debido a su cercanía con los consumidores [2].

En el Ecuador, únicamente las interrupciones mayores a tres minutos son consideradas para realizar cálculos dentro de los análisis de confiabilidad [16]. Existen parámetros que permiten cuantificar la confiabilidad en los sistemas eléctricos de distribución. A continuación se presentan los parámetros que se utilizan en el presente trabajo:

2.6.1 Tasa de falla

Por definición, la tasa de falla es el número de fallas esperadas por unidad en un intervalo de tiempo dado. Se define por la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{\text{número de fallas}}{\text{Tiempo total de funcionamiento de las unidades}} \quad (2.1)$$

Donde:

λ : Es la tasa de fallas.

Si se desea obtener la tasa de falla para tramos de un alimentador primario, se tiene la siguiente ecuación [6]:

$$\lambda_{tramo} = \lambda_{unitaria} * longitud_{tramo} \quad (2.2)$$

Donde:

λ_{tramo} : La tasa de fallo por cada tramo.

$\lambda_{unitaria}$: La tasa de falla unitaria de todo el alimentador.

$longitud_{tramo}$: La longitud de cada tramo.

2.6.2 Tiempo medio de reparación (MTTR)

Es el tiempo que tardará una falla en repararse y generalmente se mide en horas a partir del momento en el que ocurre la falla [2].

2.6.3 Índices de confiabilidad utilizados en sistemas eléctricos de distribución

Existen índices o indicadores que permiten describir la confiabilidad en redes de distribución eléctrica; estos índices se determinaron en el IEEE Estándar 1366[17].

A continuación se presentan los índices que se utilizarán en este proyecto:

- **SAIFI (System Average Interruption Frequency Index).** Es la frecuencia media de interrupciones por cliente, por año. Indica el número medio de interrupciones por cada consumidor servido por unidad de tiempo. Se mide en 1/año [2].

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i N_i}{\sum N_i} = \frac{\sum \text{Total de consumidores afectados}}{\text{Total de consumidores servidos}} \quad (2.3)$$

- **SAIDI (System Average Interruption Duration Index).** Es la duración media de interrupción del sistema. Representa la duración promedio de cada interrupción por cada consumidor servido por unidad de tiempo. Se mide en hora/año [2].

$$SAIDI = \frac{\sum U_i N_i}{\sum N_i} = \frac{\sum \text{Duración de las interrupciones de cada consumidor}}{\text{Total de consumidores servidos}} \quad (2.4)$$

- **CAIDI (Customer Average Interruption Duration Index).** Es la duración promedio de cada interrupción = SAIDI / SAIFI.

Corresponde a la duración promedio de las interrupciones por consumidor afectado. Se mide en hora/año [2].

3. TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN UTILIZADAS EN PLANIFICACIÓN DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN

A mediados de los años 70's, dentro de la planificación de los sistemas eléctricos de distribución, se optó por el uso de técnicas de optimización haciendo uso de algoritmos analíticos destinados a resolver varios problemas presentados; estos algoritmos son conocidos como **clásicos**, entre los más utilizados se encuentran: optimización lineal, optimización lineal entera mixta, algoritmos de transporte, procesos branch, entre otros [18].

A inicios de los 90's, se presenta un acelerado desarrollo informático, el cual mejoró el manejo de una gran cantidad de información y su tiempo de procesamiento, este desarrollo permitió que los problemas de planificación de sistemas de distribución puedan ser resueltos mediante el uso de algoritmos de optimización implementados en sistemas computacionales [2].

Gracias al desarrollo informático y junto con el propósito de obtener mejores resultados, surgen los algoritmos metaheurísticos. Los algoritmos metaheurísticos son una clase de métodos aproximados que permiten obtener soluciones ante problemas en los cuales los algoritmos clásicos dejan de ser efectivos. Los metaheurísticos se caracterizan por combinar conceptos de inteligencia artificial, evolución y mecanismos estadísticos [4]. Entre los más conocidos se pueden mencionar: Búsqueda Tabú, Algoritmos Genéticos, Optimización Basada en Enjambre de Partículas, Optimización Basada en Colonias de Hormigas.

Dentro de la planificación de la distribución de energía eléctrica, a continuación se encuentran las metodologías más utilizadas y su función dentro de la planificación [2]:

- Algoritmo de Dijkstra en recorrido de alimentadores primarios y ubicaciones de centros de transformación.
- Búsqueda Tabú en recorrido de alimentadores primarios y ubicación de subestaciones.
- Algoritmo Genético en recorrido de alimentadores, ubicación de subestaciones y generación distribuida.
- Optimización por Enjambre de Partículas en recorrido de alimentadores primarios y ubicación de generación distribuida.

- Optimización por Colonia de Hormigas en recorrido de alimentadores primarios y ubicación de centros de transformación.

El algoritmo de Dijkstra y la optimización por colonia de hormigas basan su desarrollo matemático en la teoría de grafos.

3.1 CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE GRAFOS

3.1.1 Definición de grafo y digrafo

Un grafo es una representación gráfica de varios puntos denominados nodos o vértices que se encuentran conectados mediante líneas que toman el nombre de aristas [19].

La Figura 3.1 muestra el ejemplo de un grafo con sus respectivos elementos.

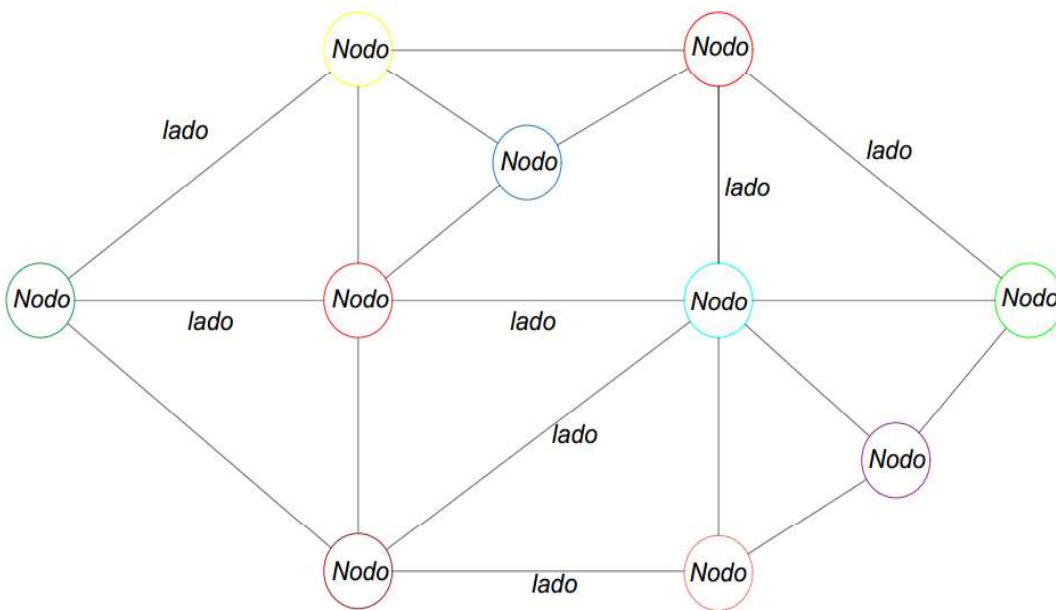


Figura 3.1. Representación de un grafo

Un digrafo, también denominado grafo dirigido es aquel grafo en el que sus aristas tienen una dirección definida, como se muestra en la Figura 3.2.

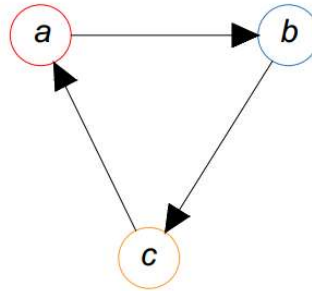


Figura 3.2. Representación de un digrafo

3.1.2 Digrafo Ponderado

Un dígrafo tiene ponderación o peso cuando a cada arista se le asigna el valor de un número real. El algoritmo de Dijkstra condiciona que el peso de cada arista sea siempre positivo [20], como se puede ver en la Figura 3.3.

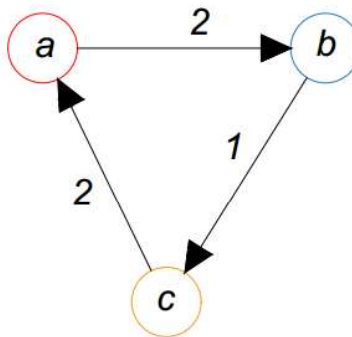


Figura 3.3. Digrafo ponderado

3.1.3 Camino de un grafo

Dado un grafo dirigido, “V” corresponde a la notación del conjunto de vértices y “E” será el conjunto de aristas (por su nombre en inglés “Edges”) [21].

Para representar una arista se utiliza la notación (u,v) , la cual muestra la siguiente información:

1. Los vértices u y v son contiguos (adyacentes); y,
2. La arista (u,v) conecta los vértices u y v .

El camino desde un vértice u hasta un vértice v , es una sucesión finita de otros vértices que se encuentran entre u y v , se lo denota por $(u - v)$ y su definición matemática es la siguiente:

$$u = x_0, x_1, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_{m-1}, x_m = v \quad (3.1)$$

Donde:

u : Vértice inicial.

v : Vértice final.

$x_0, x_1, \dots, x_i, x_{i+1}, \dots, x_{m-1}, x_m$: Sucesión finita de vértices entre u y v .

El camino de un grafo se encuentra representado en la Figura 3.4, donde se puede observar el vértice inicial, vértice final y la sucesión finita de vértices (entre los vértices inicial y final).

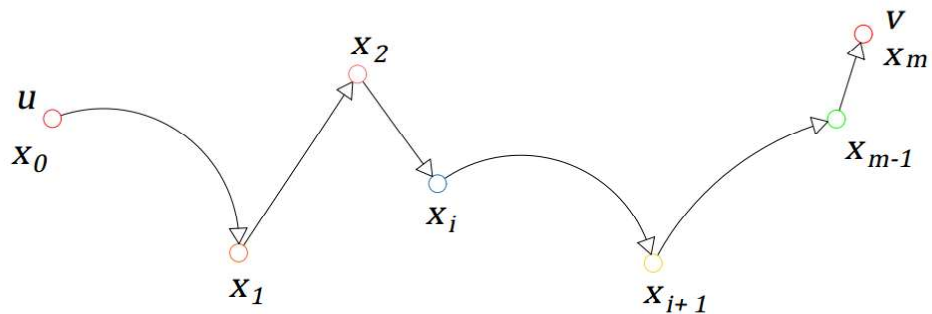


Figura 3.4. Representación del camino de un grafo

El peso del camino de un digrafo es la suma de los pesos de cada una de las aristas que se encuentran desde el vértice inicial hasta el vértice final, su denotación se muestra en la siguiente expresión:

$$p(u - v) = p(x_0, x_1) + p(x_1, x_2) + \dots + p(x_{m-1}, x_m) \quad (3.2)$$

Donde:

$p(u - v)$: Peso del camino desde el vértice u hasta el vértice v.

$p(x_{m-1}, x_m)$: Peso de cada arista.

Los grafos son utilizados para representar escenarios tales como: una secuencia de objetivos que se deseen cumplir, una red de transporte aéreo, la trayectoria de una red eléctrica, la red de un alimentador primario, entre otros [22].

En tal virtud, en la primera parte del estudio técnico se utilizan grafos para modelar los alimentadores primarios con la finalidad de determinar las distancias óptimas entre los centros de transformación, donde los vértices corresponden a las posibles ubicaciones de los centros de transformación y las aristas representan las tasas de falla asociadas a las ubicaciones de los centros de transformación.

Como segunda parte, se complementa el estudio técnico mediante el algoritmo de colonia de hormigas para determinar la configuración óptima del alimentador primario.

A continuación se presentan los conceptos de los dos algoritmos utilizados dentro del presente proyecto de titulación para determinar la configuración óptima de alimentadores primarios.

3.2 ALGORITMO DE DIJKSTRA

Es un algoritmo que permite encontrar el camino con el menor coste entre nodos dentro de un grafo y fue creado por el científico de la computación Edsger W. Dijkstra en 1959 [21]. El algoritmo puede tener valores de diferente naturaleza: distancia, tiempo, precio, etc. Esto le permite al algoritmo resolver problemas de diferente tipo, es decir; si al coste se le asignan valores de distancia, el algoritmo determinará el camino más corto entre dos nodos; si al coste se le asignan valores de tiempo, el algoritmo determinará el camino que tome menos tiempo entre dos nodos, etc.

Es importante mencionar que, dentro de un grafo dado, el algoritmo de Dijkstra toma los pesos de las aristas para encontrar el camino con el menor coste.

En resumen, dado un grafo que representa una distribución geográfica, en el cual las aristas representan la tasa de falla entre dos puntos y los vértices representan las ubicaciones de los centros de transformación, el algoritmo de Dijkstra permite determinar la secuencia de aristas adecuada para salir de un punto y llegar a otro con un coste mínimo, en el caso particular del presente estudio representa el camino con menor tasa de falla, el cual consecuentemente representa el camino con la mayor confiabilidad [21].

3.2.1 Aplicación del Algoritmo de Dijkstra

Para explicar el algoritmo de Dijkstra, se presenta en la Figura 3.5 un grafo sencillo con sus respectivos vértices y pesos de las aristas. A partir de los datos propuestos se determinará el camino con el coste mínimo desde el vértice "a" hasta el vértice "d".

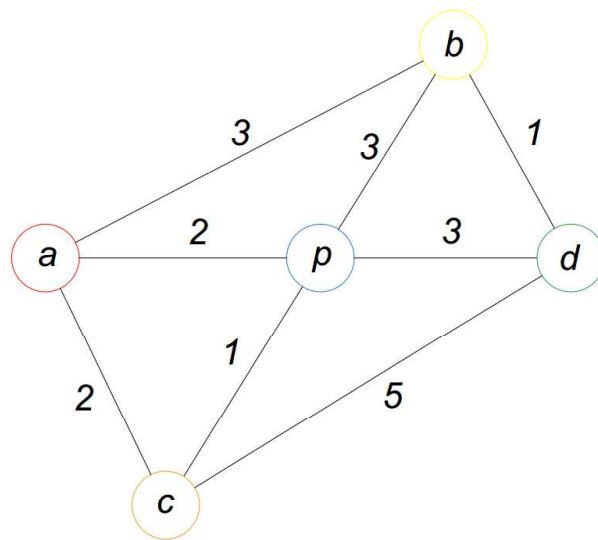


Figura 3.5. Representación del grafo a resolver

3.2.1.1. Condiciones iniciales

La definición de las condiciones iniciales se realiza a través de la notación de un par ordenado $v(x ; y)$ para cada vértice, donde:

- v : Es el nombre del vértice actual.
- x : Indica el nombre del vértice anterior.
- y : Indica el valor necesario para llegar del vértice anterior hasta el actual.

En la notación propuesta se usa el símbolo de infinito para representar que, en condiciones iniciales no se conocen todos los posibles vértices a través de los cuales se puede llegar hacia otro vértice; se usa el símbolo de asterisco para denotar que todavía no se conoce el valor del costo o peso que conlleva llegar hasta un determinado vértice.

De tal forma que en las condiciones iniciales del ejercicio propuesto, los vértices quedan definidos como se muestra en la Figura 3.6.

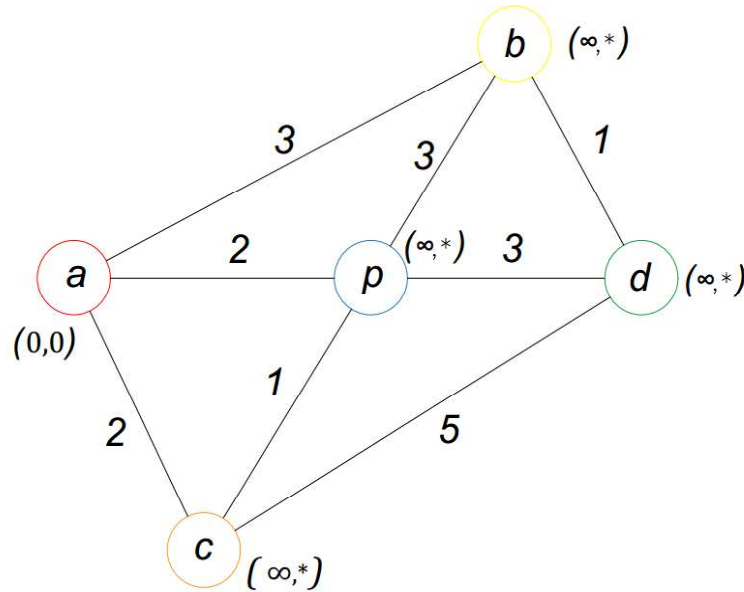


Figura 3.6. Fase inicial de la resolución del problema en el grafo

Donde:

$a(0 ; 0)$: Es el vértice de inicio, por lo tanto no existe un camino previo y tampoco puede existir el valor de un peso para llegar hasta éste.

$b(\infty ; *)$: Vértice “b” en el cual se desconoce el camino previo(∞) y el peso(*).

$c(\infty ; *)$: Vértice “c” en el cual se desconoce el camino previo(∞) y el peso(*).

$p(\infty ; *)$: Vértice “p” en el cual se desconoce el camino previo(∞) y el peso(*).

$d(\infty ; *)$: Vértice final en el cual se desconoce el camino previo(∞) y el peso(*).

3.2.1.2. Etiquetado de vértices adyacentes

A continuación, se etiquetan todos los vértices adyacentes al vértice inicial "a". Estas nuevas etiquetas deben contener la siguiente información:

- El vértice desde el cual provienen. Es decir, todos provienen desde el vértice "a".
- El peso que implica dirigirse a cada uno de los vértices adyacentes. Por ejemplo: Para llegar hasta "b" desde "a" implica un peso de 3; llegar hasta "p" desde "a" implica un peso de 2; dirigirse hasta "c" desde "a" conlleva un peso de 2.

La Figura 3.7 muestra el primer etiquetado de los vértices adyacentes al vértice "a". Nótese que el vértice "d" no ha cambiado su etiqueta de condición inicial ya que no es adyacente al vértice "a".

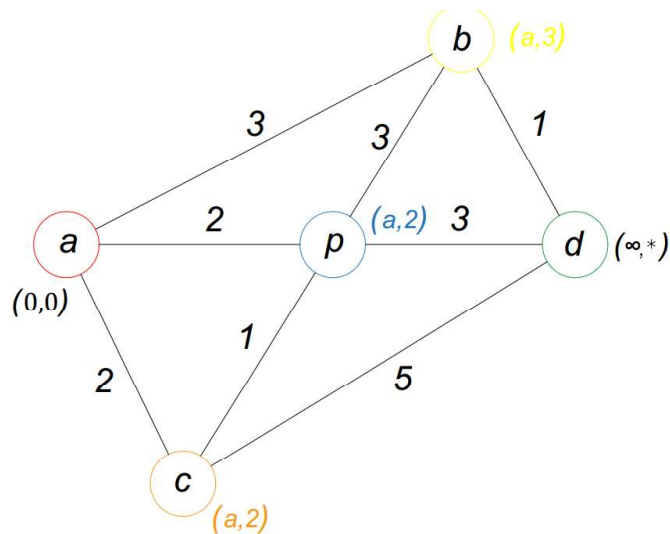


Figura 3.7. Etiquetas adyacentes a "a"

$a(0 ; 0)$: Es el vértice de inicio.

$b(a ; 3)$: Vértice "b", proveniente del vértice "a" con peso igual a 3.

$c(a ; 2)$: Vértice "c", proveniente del vértice "a" con peso igual a 2.

$p(a ; 2)$: Vértice "p", proveniente del vértice "a" con peso igual a 2.

$d(\infty ; *)$: Vértice final en el cual se desconoce el camino previo y el peso.

3.2.1.3. Evaluación de pesos desde el primer vértice

Una vez que los vértices se encuentran etiquetados, es posible evaluar los pesos desde el vértice inicial hacia los vértices adyacentes. La Tabla 3.1 muestra el resumen de los pesos desde el vértice “a” hacia los vértices adyacentes; en el caso de los vértices que no son adyacentes se coloca un asterisco para denotar que el peso aún no está definido.

El peso de los tramos, que progresivamente forman un camino óptimo, se denomina peso final si y solo si, no existe otro tramo con peso de menor valor. Mientras esto no ocurra, el peso de los tramos se denomina peso temporal. Es por esta razón que en primera instancia se han colocado todos los pesos en la columna temporal en la Tabla 3.1

Tabla 3.1. Pesos temporales desde el vértice “a”

Vértices	Pesos o Costos	
	Final	Temporal
a	0	0
b		3
c		2
p		2
d		*

Para continuar con el algoritmo se elige un nuevo vértice de referencia y se debe escoger el vértice de menor peso. Sin embargo los vértices “c” y “p” tienen el mismo valor, por lo tanto se puede tomar cualquiera de los dos vértices, en este caso se ha escogido el vértice “c”. En el grafo del ejemplo es evidente que el camino con menor coste no es por el vértice “c”, sin embargo se toma este vértice para hacer notar que el algoritmo evaluará todos los pesos y si en un determinado momento tienen dos o más opciones de camino con el mismo peso, al final se determinará la opción con el menor peso.

Ya que el vértice “c” está directamente enlazado al vértice inicial y no existe otro camino desde “a” hasta “c” con un peso menor, entonces su valor temporal pasa a ser el final. (Tabla 3.2).

Tabla 3.2. Pesos temporales a pesos finales en “c”

Vértices	Pesos o Costos	
	Final	Temporal
a	0	0
b		3
c	2	2
p		2
d		*

3.2.1.4. Evaluación de pesos desde el segundo vértice

Una vez que se ha definido la nueva referencia en el vértice “c” se etiquetan los vértices adyacentes con el valor del peso acumulado necesario para llegar a dichos vértices. El etiquetado y los pesos acumulados desde el vértice “c” se muestran en la Figura 3.8.

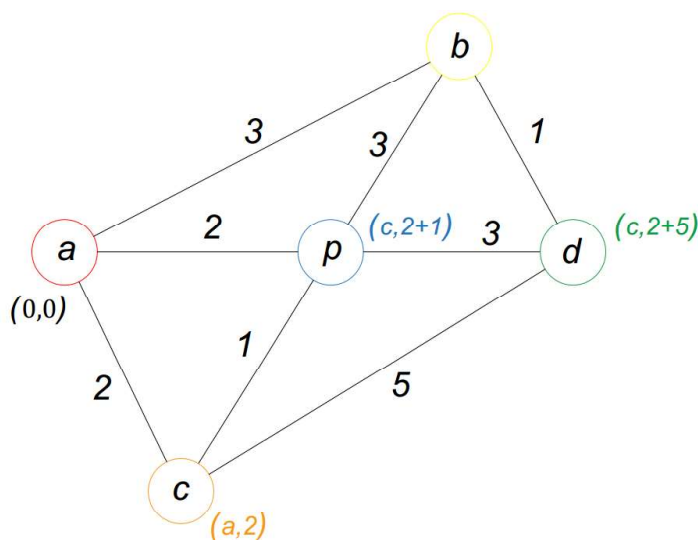


Figura 3.8. Etiquetas adyacentes al vértice “c”

En la Figura 3.8 se puede ver que es posible llegar al vértice “p” desde el vértice “a” o desde el vértice “c”, en consecuencia se evalúa el peso acumulado de las opciones existentes y se determina que el menor peso es directo del vértice “a” sin pasar por el vértice “c”.

Por lo tanto, el peso temporal (de valor 2) hacia el vértice “p” se convierte en peso final, ya no existe otro camino desde “a” hasta “p” con un peso menor. En la Tabla 3.3 se muestran los pesos temporales y finales de todos los vértices hasta el momento.

Tabla 3.3. Peso final en “p”

Vértices	Pesos o Costos	
	Final	Temporal
a	0	0
b		3
c	2	2
p	2	2
d		7

Adicionalmente se puede ver que existe un peso temporal para el vértice final “d”, sin embargo para encontrar el valor final del vértice “d” se debe continuar la evaluación definiendo un nuevo vértice de referencia, por lo tanto se elige la nueva referencia en el vértice “p” porque tiene el menor peso.

3.2.1.5. Evaluación de pesos desde el tercer vértice

Se define la nueva referencia en el vértice “p” y se etiquetan los vértices adyacentes con el valor del peso acumulado necesario para llegar a dichos vértices. El etiquetado y los pesos acumulados desde el vértice “p” se muestran en la Figura 3.9.

En la Figura 3.9 se puede ver que es posible llegar al vértice “b” desde el vértice “a” o desde el vértice “p”, en consecuencia se evalúa el peso acumulado de las opciones existentes y se determina que el menor peso es directo del vértice “a” sin pasar por el vértice “p”.

Por lo tanto, el peso temporal (de valor 3) hacia el vértice “b” se convierte en peso final, ya no existe otro camino desde “a” hasta “b” con un peso menor.

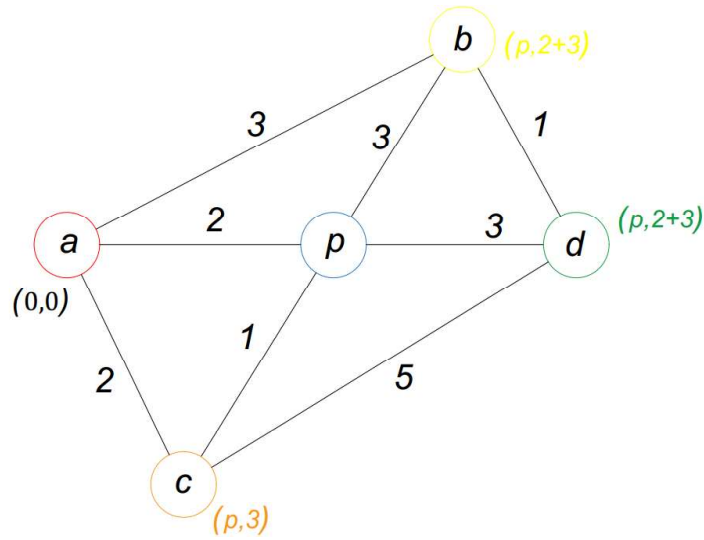


Figura 3.9. Etiquetas adyacentes a “p”

De igual manera, en la Figura 3.9 se puede ver que existe un nuevo peso (acumulado) temporal para llegar al vértice final “d”. Debido a que este nuevo peso (5) es menor que el peso temporal anterior (7), se coloca el 5 en lugar de 7. Esto elimina la posibilidad de que el camino hacia “d” se lo haga a través de “c”. En la Tabla 3.4 se muestran los pesos temporales y finales de todos los vértices hasta el momento.

Tabla 3.4. Peso final en “b”

Vértices	Pesos o Costos	
	Final	Temporal
a	0	0
b	3	3
c	2	2
p	2	2
d		7 5 ✓

3.2.1.6. Evaluación de pesos desde el cuarto vértice

Se define la nueva referencia en el vértice “b” y se etiqueta su vértice adyacente con el valor del peso acumulado necesario para llegar a dicho vértice. El etiquetado y los pesos acumulados desde el vértice “b” se muestran en la Figura 3.10.

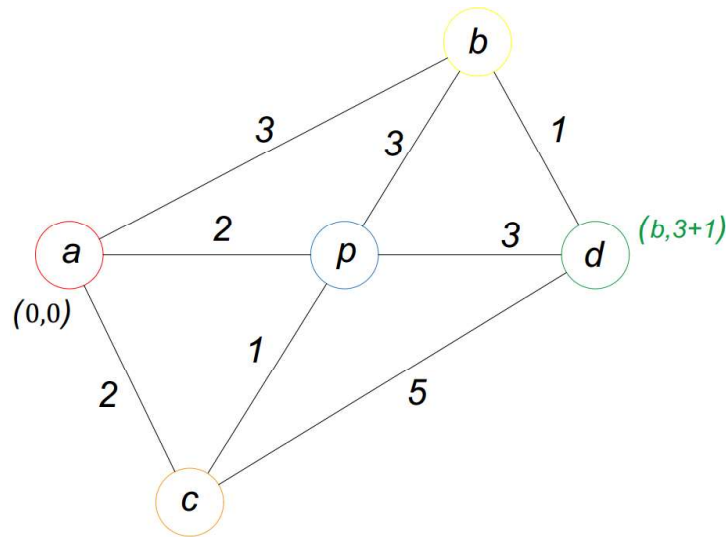


Figura 3.10. Actualización de etiquetas en “b”

En la Figura 3.10 se puede ver que es posible llegar al vértice “d” desde el vértice “b” o desde el vértice “p”, en consecuencia se evalúa el peso acumulado de las opciones existentes y se determina que el menor peso es a través del vértice “b”.

De igual manera, en la Figura 3.10 se puede ver que existe un nuevo peso (acumulado) temporal para llegar al vértice final “d”. Debido a que este nuevo peso (4) es menor que el peso temporal anterior (5), se coloca el 4 en lugar de 5. Esto elimina la posibilidad de que el camino hacia “d” se lo haga a través de “p”. En la Tabla 3.5 se muestran los pesos temporales y finales de todos los vértices hasta el momento.

Por lo tanto, el peso temporal (de valor 4) hacia el vértice "d" se convierte en peso final, ya que no existe otro camino desde "b" hasta "d" con un peso menor.

Tabla 3.5. Valor final en el vértice "d"

Vértices	Pesos o Costos	
	Final	Temporal
a	0	0
b	3	3
c	2	2
p	2	2
d	4	5 4 ✓

Debido a que no existen más vértices por revisar, se finaliza el algoritmo.

3.2.2 Determinación del costo mínimo

Para determinar el camino de menor costo se utilizan los valores finales de la Tabla 3.5 con finalidad de realizar una serie de restas matemáticas que mostrarán la trayectoria óptima desde el nodo final hasta el inicial.

En el nodo "d" con peso final de 4, se restan los pesos de sus aristas adyacentes, con la finalidad de compararlos con los pesos finales en los vértices adyacentes. La coincidencia de estos números determina el camino óptimo, esto se muestra en la Tabla 3.6.

Tabla 3.6. Sustracción de pesos desde el vértice "d"

Peso Final en "d"	Peso de arista Adyacente		Peso Final - Peso arista adyacente	Peso Final en vértice adyacente		Comparación
	Hacia "b"	Hacia "p"		Vértice "b"	Vértice "p"	
4	Hacia "b"	1	3	Vértice "b"	3	Coincide
	Hacia "p"	3	1	Vértice "p"	2	No coincide
	Hacia "c"	5	-1	Vértice "c"	2	No coincide

Se puede ver que la resta coincide en el vértice "b", esto determina que el camino óptimo es por "b".

En el nodo "b", (con peso final igual a 3) se restan los pesos de sus aristas adyacentes. Esto se muestra en la Tabla 3.7.

Tabla 3.7. Sustracción de pesos en el vértice "b"

Peso Final en "b"	Peso de arista Adyacente		Peso Final - Peso arista adyacente	Peso Final en vértice adyacente	Comparación	
3	Hacia "a"	3	0	Vértice "a"	0	Coincide
	Hacia "p"	3	0	Vértice "p"	2	No coincide

Esta vez los números coinciden en el vértice inicial "a". De esta manera se determina que el camino del costo mínimo es:

$$(a - b) \Rightarrow (b - d)$$

3.3 ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN DE COLONIA DE HORMIGAS

Debido a la gran cantidad de problemas de optimización combinatoria que necesitan ser resueltos, se han desarrollado métodos matemáticos que permiten aproximarse a la solución de forma rápida, estos métodos son conocidos como aproximados o heurísticos.

El método heurístico es una manera de resolver un problema de optimización por medio de una aproximación; esta solución, aunque no es perfecta, es muy eficiente y satisfactoria para resolver el problema planteado [23].

Con la finalidad de mejorar los resultados en problemas de mayor complejidad y que no pueden ser resueltos por los métodos heurísticos aparecen los métodos metaheurísticos [23]. El algoritmo de optimización mediante colonia de hormigas pertenece a este grupo de métodos metaheurísticos.

El Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas se basa en la manera en la que el grupo de hormigas hace su recorrido para la recolección de alimentos. En principio, todas las hormigas se trasladan de manera aleatoria hacia el alimento y de regreso al hormiguero dejando una estela de feromonas en el aire; existirán hormigas que recorrerán el camino más corto y por lo tanto lo harán de manera más rápida y consecutiva; conforme transcurre el recorrido, las demás hormigas preferirán seguir la trayectoria que posee mayor cantidad de feromonas que fueron dejadas por aquellas que ya habían estado en ese camino y lo

han recorrido de manera más rápida, hasta el punto en el que todo el grupo de hormigas circule por este camino más óptimo [24].

3.3.1 Modelo matemático

En el algoritmo, se simula un grupo de hormigas artificiales que van encontrando la solución a medida que van recorriendo un grafo. El grafo está conformado por un conjunto de nodos, un conjunto de aristas y el conjunto de posibles soluciones que estará relacionado con sus nodos y aristas. Las hormigas se mueven de un nodo a otro por medio de las aristas y mientras ocurre este movimiento, se va gradualmente construyendo una solución. Un detalle importante es que las hormigas dejan una cierta cantidad de feromonas sobre las aristas; la densidad de feromonas esparcidas está en función de la eficacia del camino ya que gracias a esta cantidad de feromonas es que se crea una guía para determinar la ruta óptima [25].

El Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas está formado por tres fases principales mostradas en el siguiente lazo:

1. *Parámetros iniciales*
2. *Mientras (no exista condición de terminación)*

Fase 1. Construir soluciones

Fase 2. Realizar búsqueda local (depende del problema)

Fase 3. Actualizar Feromonas

3. *Finalizar mientras*

3.3.2 Construcción de Soluciones

Para comprender la construcción de soluciones, es necesario entender las siguientes afirmaciones:

- Las aristas de un grafo son los caminos por los que circularán las hormigas.
- Se entiende por solución a la acción de seleccionar uno de estos caminos.
- Las hormigas realizan la selección de un camino únicamente cuando están ubicadas sobre un nodo.

La construcción de soluciones se la realiza de la siguiente manera: una cantidad de hormigas escoge un subconjunto de soluciones a partir de un grupo finito de soluciones que se encuentran ya disponibles, es decir que se toma una solución parcial y se la ingresa

como una componente de solución factible dentro del conjunto de soluciones factibles posibles [25].

En otras palabras, inicialmente dentro del grafo no hay presencia de feromonas, por tanto la elección de los caminos se la hace de forma aleatoria; estas elecciones pasan a ser el conjunto de soluciones disponibles. A partir de este momento, cada hormiga escogerá el siguiente nodo al cual se dirigirá (solución parcial); ya en el siguiente nodo añadirá esta solución al conjunto de soluciones factibles. Este proceso se repite en cada uno de los posibles nodos adyacentes a los cuales puede dirigirse.

La selección de las soluciones se la hace mediante probabilidad y su expresión estrictamente matemática es la siguiente:

$$p(S^p) = \frac{\tau_{ij}^\alpha * (\eta_{ij})^\beta}{\sum \tau_{ij}^\alpha * (\eta_{ij})^\beta} \quad (3.3)$$

Donde:

- i, j : Son nodos.
- S^p : Es la solución actual parcial.
- $p(S^p)$: Probabilidad de elegir la solución actual parcial.
- τ_{ij} : Valor de feromonas entre los nodos i y j .
- η_{ij} : Valor de visibilidad desde el nodo i hasta el nodo j .
- α : Valor que determina la importancia de feromonas.
- β : Valor que determina la importancia de la visibilidad.

La ecuación 3.3 fue tomada de la referencia [24].

3.3.3 Búsqueda Local

En ocasiones, cuando no se desea encontrar una solución explícita, sino un conjunto de soluciones, se aplica la búsqueda local que consiste en disponer de una solución inicial y buscar en su cercanía otra solución mejor. En caso de encontrarla, se sustituye la solución actual por la inicial y se continúa con el proceso, hasta que no exista una mejor solución[26].

3.3.4 Actualización de Feromonas

En esta fase se realiza dos acciones [25]:

1. Aumentar los niveles de feromonas que se encuentran asociadas a los caminos con mayor posibilidad de eficacia.
2. Mantener constante o disminuir la cantidad de feromonas de aquellos caminos que no se consideran óptimos.

La actualización de feromonas se la hace mediante la siguiente ecuación:

$$\tau_1 = (1 - \rho)\tau_0 + \sum \Delta\tau \quad (3.4)$$

Donde:

- τ_0 : Es el valor anterior de feromonas.
- τ_1 : Es el valor actualizado de feromonas.
- ρ : Es el factor de evaporación.
- $\Delta\tau$: Es la cantidad de feromonas que se ha dejado en el camino ya visitado.

La cantidad de feromonas se determina por:

$$\Delta\tau = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} & \text{Si la hormiga uso la arista en su recorrido} \\ 0 & \text{Caso contrario} \end{cases}$$

Donde:

- Q : Es un parámetro de aprendizaje.
- L_k : Es el costo del camino por hormiga.

3.3.5 Aplicación de la Optimización de Colonia de Hormigas

Mediante el desarrollo del siguiente ejercicio se podrá comprender el algoritmo de optimización por colonia de hormigas y se pondrá en evidencia la importancia del uso de una herramienta informática.

En base a recomendaciones de trabajos realizados con el uso de la optimización mediante la colonia de hormigas [21], se utiliza la Tabla 3.8 para asumir valores de variables que se irán utilizando durante la resolución del ejercicio.

Tabla 3.8.Valores a asumir

Parámetros del modelo OCH	
Número de hormigas	200
Intensidad de feromonas	0,1
Evaporación del rastro	0,01
parámetro de aprendizaje	1
alfa	1
beta	1

Habiendo asumido los valores de alfa y beta propuestos en la Tabla 3.8 es posible reducir la ecuación 3.3; quedando establecida de una manera más sencilla de comprender:

$$P_{camino} = \frac{\tau * \eta}{\sum \tau * \eta} \quad (3.5)$$

Donde:

- τ : Es el valor asociado de feromonas.
- η : Es la visibilidad que presenta un vértice.

La visibilidad es el inverso del peso que presenta cada camino o arista, en este caso en particular, el peso está dado por la longitud que existe entre nodos.

Para la resolución de problemas de optimización se puede simular una gran cantidad de hormigas, pero en el presente ejercicio se trabaja únicamente con dos hormigas debido a lo extensiva que podría resultar su resolución. Se elaboran tablas que facilitan la resolución

y la interpretación del problema, adicionalmente se muestra los resultados que se van obteniendo.

Dado el grafo de la Figura 3.11 Determine la ruta óptima entre los vértices “a” y “d”.

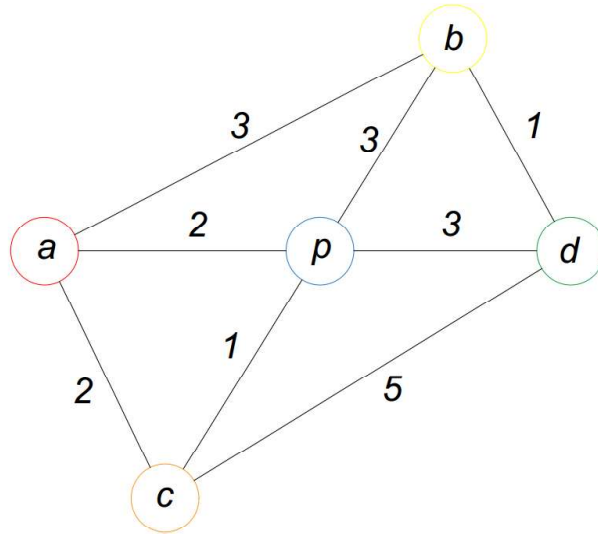


Figura 3.11. Grafo a resolver

En la Tabla 3.9. Se muestran las características de todos los posibles caminos pertenecientes al grafo, la longitud existente entre ellos, la visibilidad que está en función de la longitud y finalmente la cantidad de feromonas que se ha asumido con el valor de 0,1.

Tabla 3.9. Características de todos los posibles caminos

Caminos	Longitud	Visibilidad $\left(\eta = \frac{1}{longitud}\right)$	Feromonas τ_0
a – b	3	0,333	0,1
a – p	2	0,500	
a – c	2	0,500	
b – p	3	0,333	
b – d	1	1,000	
p – d	3	0,333	
p – c	1	1,000	
c – d	5	0,200	

El ejercicio será resuelto únicamente por dos hormigas.

Hormiga 1:

Como primer paso, se busca determinar la probabilidad de que la hormiga tome, desde “a”, uno de los tres posibles caminos (a – b), (a – p) o (a – c). Esto se muestra en la Tabla 3.10.

Tabla 3.10. Probabilidad de selección de un camino desde el vértice “a”

Posibles caminos	$\tau_0 * \eta$	$P_{camino} = \frac{\tau_0 * \eta}{\sum \tau_0 * \eta}$
a – b	0,0333	0,25
a – p	0,0500	0,375
a - c	0,0500	0,375
$\sum \tau_0 * \eta = 0,1333$		

En la Figura 3.12 se muestra las probabilidades de escoger uno de los tres caminos. Es importante notar que si el vértice se encuentra más cercano, la visibilidad aumenta; esto se traduce en una mayor probabilidad de escoger el camino que conduce hacia ese nodo.

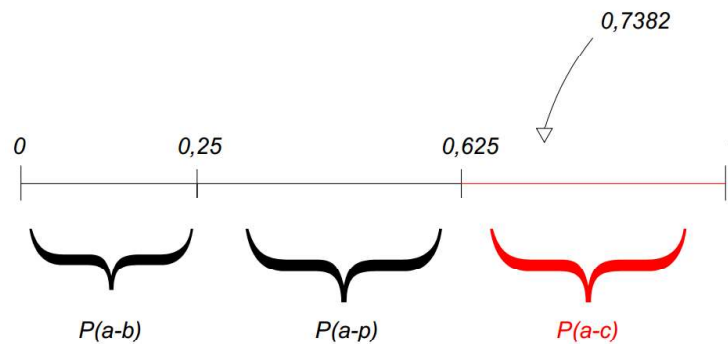


Figura 3.12. Representación de la probabilidad de selección del camino a seguir desde el vértice “a”

A continuación se obtiene un número aleatorio entre cero y uno.

$$\text{número aleatorio} = 0,7382$$

Mediante la Figura 3.12 se puede ver que la hormiga 1 se dirigiría hacia el nodo “c” mediante el camino (a – c).

En el vértice “c”:

Se vuelve a elaborar la tabla de probabilidades (Tabla 3.11) con la finalidad de determinar las probabilidades de elección de un camino:

Tabla 3.11. Probabilidad de selección de un camino desde el nodo “c”

Posibles caminos	$\tau_0 * \eta$	$P_{camino} = \frac{\tau_0 * \eta}{\sum \tau_0 * \eta}$
c - p	0,1000	0,8333
c - d	0,0200	0,1667
	$\sum \tau_0 * \eta = 0,1200$	

El número aleatorio escogido es:

número aleatorio = 0,5648

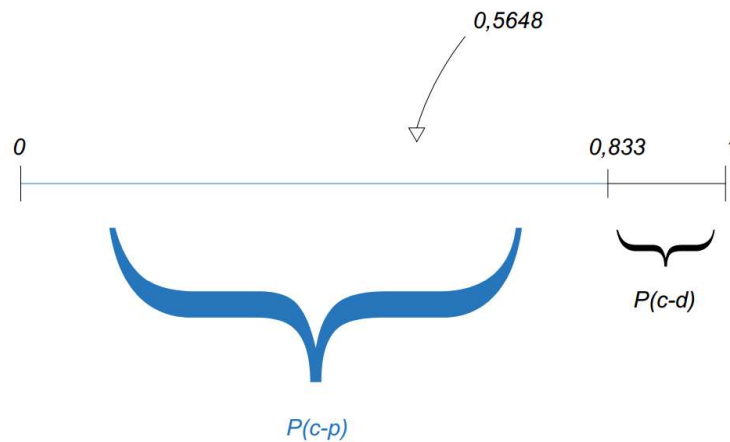


Figura 3.13. Representación de la probabilidad de selección de un camino desde el nodo “c”

Por lo tanto la hormiga escogerá el camino (c – p).

En el vértice “p”:

Se construye la tabla de probabilidad de selección (Tabla 3.12):

Tabla 3.12. Probabilidad de selección de un camino desde el vértice “p”

Posibles caminos	$\tau_0 * \eta$	$P_{camino} = \frac{\tau_0 * \eta}{\sum \tau_0 * \eta}$
p – b	0,0333	0,5000
p – d	0,0333	0,5000
$\sum \tau_0 * \eta = 0,0667$		

Se escoge un número aleatorio:

$$\text{número aleatorio} = 0,9988$$

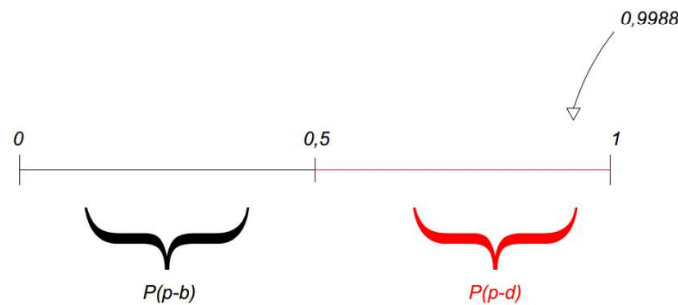


Figura 3.14. Representación de la probabilidad de selección de un camino desde el nodo “p”

Por lo tanto la hormiga escogerá el camino (p – d).

En el vértice “d”:

Como se puede notar, el proceso del algoritmo es el mismo en cada vértice. Por esta razón, se asume que el camino de regreso (d - a) de la hormiga 1 es:

$$(d - b) \Rightarrow (b - a)$$

Por lo tanto el camino total recorrido por la hormiga 1 sería:

$$(a - c) \Rightarrow (c - p) \Rightarrow (p - d) \Rightarrow (d - b) \Rightarrow (b - a)$$

El costo que conlleva tomar ese camino sería:

$$L_{k1} = Costo_{horm1} = 2 + 1 + 3 + 1 + 3 = 10$$

Hormiga 2:

En base a la misma tabla de selección de camino de la hormiga 1 (Tabla 3.8), se busca determinar la probabilidad de que la hormiga 2 tome uno de los tres caminos (a – b), (a – d) o (a – c). Dando como resultado la misma representación de la probabilidad de selección de la hormiga 1, mostrada Figura 3.15.

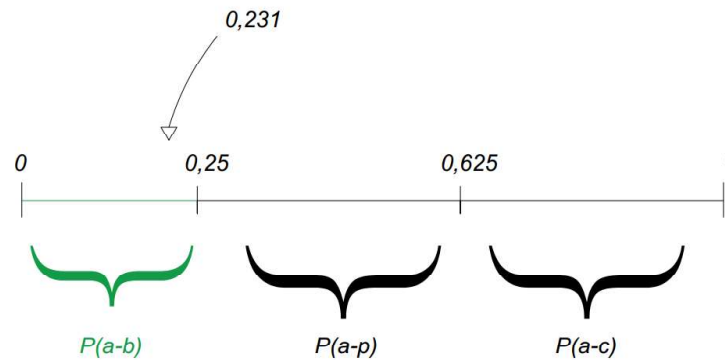


Figura 3.15. Resultados de las pruebas realizadas

Se obtiene un número aleatorio entre uno y cero:

$$\text{número aleatorio} = 0,231$$

Por lo tanto, la hormiga 2 escoge el camino (a – b).

Se continúa con el mismo proceso visto anteriormente.

En el vértice “b”:

Se realiza la tabla de probabilidad de selección (Tabla 3.13).

Tabla 3.13. Probabilidad de selección de un camino desde el vértice “b”

Posibles caminos	$\tau_0 * \eta$	$P_{camino} = \frac{\tau_0 * \eta}{\sum \tau_0 * \eta}$
b - d	0,1000	0,7500
b - p	0,0333	0,2500
$\sum \tau_0 * \eta = 0,1333$		

Se obtiene un número aleatorio entre uno y cero:

$$\text{número aleatorio} = 0,7788$$

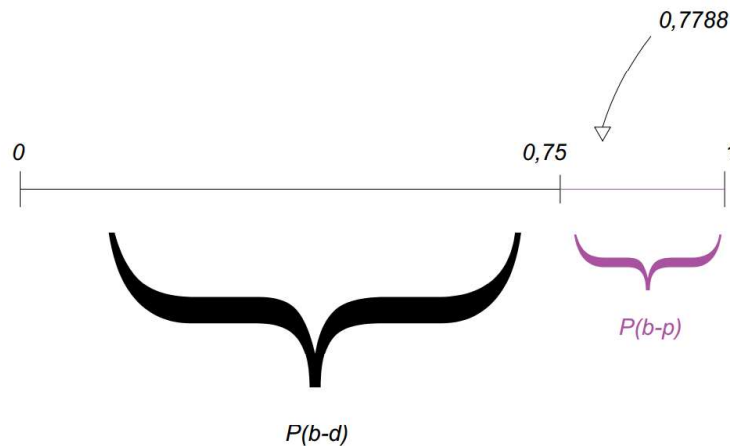


Figura 3.16. Representación de la probabilidad de un camino desde el nodo “p”

En base a la Figura 3.16 se puede ver que la hormiga 2 ha escogido el camino (b – p).

En el vértice “p”:

Se realiza la tabla de probabilidad de selección (Tabla 3.14).

Tabla 3.14. Probabilidad de selección de un camino desde el vértice “p”

Posibles caminos	$\tau_0 * \eta$	$P_{camino} = \frac{\tau_0 * \eta}{\sum \tau_0 * \eta}$
p - d	0,0333	0,2500
p - c	0,1000	0,7500
$\sum \tau_0 * \eta = 0,1333$		

Se obtiene un número aleatorio entre uno y cero:

número aleatorio = 0,0187

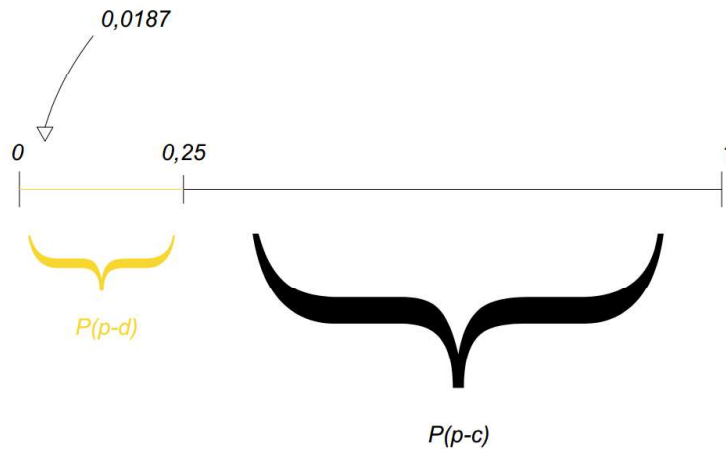


Figura 3.17. Representación de la probabilidad de selección de un camino desde el nodo “p”

En base a la Figura 3.17 se puede ver que la hormiga 2 ha escogido el camino (p – d).

En el vértice “d”:

Como se puede notar, el proceso del algoritmo es el mismo en cada vértice. Por esta razón, se asume que el camino de regreso (d - a) de la hormiga 2 es:

$$(d - c) \Rightarrow (c - a)$$

Por lo tanto el camino recorrido por la hormiga 2 sería:

$$(a - b) \Rightarrow (b - p) \Rightarrow (p - d) \Rightarrow (d - c) \Rightarrow (c - a)$$

Y su costo: $L_{k2} = Costo_{hormiga\ 2} = 3 + 3 + 3 + 5 + 2 = 16$

3.3.6 Actualización de feromonas

Para la actualización de feromonas se asumen los siguientes valores de:

$$\rho = 0,01$$

$$Q = 1$$

Y se elabora la Tabla 3.15 de la actualización de feromonas.

Tabla 3.15. Actualización de feromonas

Camino	$(1 - \rho) * \tau_0$	$\Delta\tau_1 = \frac{Q}{L_{k1}}$	$\Delta\tau_2 = \frac{Q}{L_{k2}}$	$\tau_1 = (1 - \rho)\tau_0 + \sum \Delta\tau$
a - b	0,099	0,100	0,0625	0,262
a - p	0,099	0,000	0,0000	0,099
a - c	0,099	0,100	0,0625	0,262
b - p	0,099	0,000	0,0625	0,162
b - d	0,099	0,100	0,0000	0,199
p - d	0,099	0,100	0,0625	0,262
p - c	0,099	0,100	0,0000	0,199
c - d	0,099	0,000	0,0625	0,162

En la Tabla 3.15 se muestra cómo se desarrolla la actualización de la cantidad de feromonas en cada arista. Nótese que la variación de las feromonas dejadas en el camino ($\Delta\tau$) se toma en cuenta solo si se ha tomado ese camino, caso contrario el valor es cero.

Se puede ver en la columna de τ_1 que para la mayoría de los caminos la cantidad de feromonas ha aumentado, posteriormente durante una nueva iteración este valor

favorecerá para que este camino aumente su probabilidad en caso de ser seleccionado.

A continuación se muestran la cantidad de feromonas que son dejadas en cada camino para mostrar que la mejor ruta es la que posee una mayor cantidad de feromonas.

Camino realizado por la hormiga 1:

$$\begin{aligned} & \tau_{(a-c)} + \tau_{(c-p)} + \tau_{(p-d)} + \tau_{(d-b)} + \tau_{(b-a)} = \\ & 0,262 + 0,199 + 0,262 + 0,199 + 0,262 = 1,18 \end{aligned}$$

Camino realizado por la hormiga 2:

$$\begin{aligned} & \tau_{(a-b)} + \tau_{(b-p)} + \tau_{(p-d)} + \tau_{(d-c)} + \tau_{(c-a)} = \\ & 0,262 + 0,162 + 0,262 + 0,162 + 0,262 = 1,11 \end{aligned}$$

De esta manera, después de realizar varias iteraciones y con un mayor número de hormigas es posible encontrar la ruta óptima.

4. METODOLOGÍA DE RECORRIDO DE CONFIGURACIÓN EN ALIMENTADORES PRIMARIOS

En este capítulo se explica la manera en que los algoritmos de optimización (parte abstracta) son utilizados con el objetivo de optimizar el recorrido de alimentadores primarios (parte real). Su desarrollo se lo realiza en dos etapas: la primera etapa consiste en determinar la distancia óptima entre centros de transformación y la segunda etapa determina la configuración óptima en anillo del alimentador primario.

Esta optimización se la realiza con la finalidad de mejorar la confiabilidad en los sistemas eléctricos de distribución y la calidad del servicio eléctrico.

4.1 DISTANCIAS ÓPTIMAS ENTRE CENTROS DE TRANSFORMACIÓN

Cuando un problema dispone de una distribución geográfica (grafo) en el cual los caminos (aristas) representen un coste (peso de la arista) de la conexión entre dos o más lugares (nodos) y lo que se desea es encontrar el camino más corto entre estos lugares. El recurso más eficiente que se puede utilizar es el algoritmo de Dijkstra [21].

Este problema es conocido como *“El Problema del Camino más Corto”* y encaja muy bien a la problemática de determinar la distancia óptima entre centros de transformación, ya que se lo puede comparar de la siguiente manera:

- La distribución geográfica estaría formada por toda la información georreferenciada de la zona de estudio.
- Los caminos serían las vías públicas por las cuales es permisible realizar el trayecto del alimentador primario.
- Los nodos serían los centros de transformación que formarían parte del alimentador primario.

El coste, como se mencionó en el capítulo anterior, puede tener valores de diferente naturaleza (distancia, tiempo, precio, **tasas de falla**, entre otros.).

Debido a que en el presente trabajo se busca mejorar la confiabilidad del sistema, se utilizarán valores de tasas de fallas de los tramos comprendidos entre los centros de

transformación. Por lo tanto, el algoritmo de Dijkstra determinará la distancia óptima con la menor tasa de fallos entre los tramos.

Los datos de entrada necesarios para realizar este proceso son:

- Información geográfica de vías públicas y ubicaciones de transformadores.
- La tasa de fallas del alimentador primario.

4.2 CONFIGURACIÓN ÓPTIMA DEL ALIMENTADOR PRIMARIO EN FORMA DE ANILLO

Con el objetivo de mejorar la confiabilidad en alimentadores primarios, se elige realizar la optimización mediante la configuración en anillo abierto. Esta configuración permite: mejorar la confiabilidad del sistema, disminuir el tiempo de reposición del servicio eléctrico, obtener un sistema redundante y por tanto mantener la operación del sistema de una forma radial [2].

La configuración en anillo de un sistema es, básicamente, conectar los centros de transformación entre sí de tal manera que se forme un anillo en el que, el inicio y el final deben ser un mismo punto, como por ejemplo una subestación. Es por esta razón que determinar la configuración en anillo se parece al problema matemático conocido como “*El Problema del Agente Viajero*” en el cual un vendedor viajero que inicia su recorrido en su ciudad natal, desea encontrar el camino más corto para visitar diferentes ciudades (sin repetir las) y finalmente regresar a su ciudad de origen [27].

En Milano (1992), Dorigo y Stutzle presentaron el algoritmo de optimización mediante colonia de hormigas como uno de los métodos que ofrece “buenas soluciones” ante este problema [24]. Por este motivo, en el presente trabajo se utilizará la optimización por colonia de hormigas para la determinación de la configuración óptima en anillo abierto de alimentadores primarios.

4.3 DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA.

A continuación se presenta el proceso de optimización en un alimentador primario de prueba, este ejercicio permitirá comprender la relación entre los algoritmos matemáticos propuestos y la optimización de alimentadores primarios.

El proceso matemático de los algoritmos de optimización se lo desarrolla mediante el uso de una herramienta computacional, esta herramienta ha sido creada dentro con el software de programación libre, PHYTON.

Dada la disposición de calles, subestación y transformadores mostrados en la Figura 4.1 se desea determinar la configuración óptima en anillo del alimentador primario.

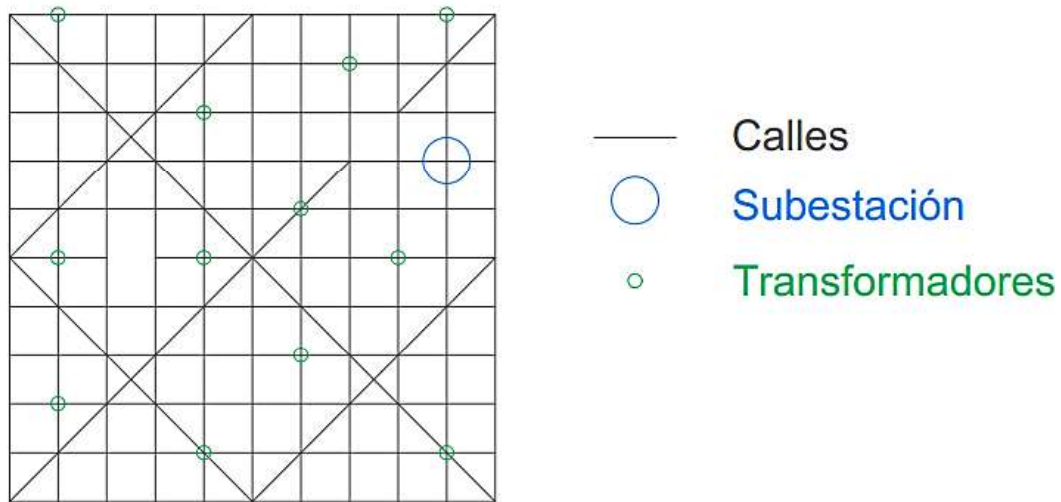


Figura 4.1. Alimentador primario de prueba

4.3.1 Distancia óptima entre centros de transformación.

Para determinar la distancia óptima entre centros de transformación mediante el algoritmo de Dijkstra es necesario disponer de los siguientes datos de entrada:

- Ubicación geográfica de los centros de transformación (ubicación de nodos).

Esta información es posible obtenerla a partir de los sistemas de información geográfica (GIS) pertenecientes a las empresas de distribución eléctrica. Los datos de información geográfica deben ser ingresados a la herramienta computacional a través de una tabla de Excel, como la que se muestra en la Tabla 4.1. La manera en que la información debe ser presentada en la herramienta computacional se encuentra en el Anexo D, Manual de Usuario.

Tabla 4.1.Ubicación de Transformadores y Subestación

Ubicación de Transformadores y Subestación		
Nodo	Coordenada en X	Coordenada en Y
Subestación	10	8
T1	5	6
T2	8	10
T3	2	11
T4	9	6
T5	2	3
T6	10	2
T7	5	2
T8	7	4
T9	2	6
T10	7	7
T11	5	9
T12	10	11

Es importante mencionar que los resultados de la optimización pueden ser mejorados si previamente se obtuviese la ubicación óptima de los centros de transformación. En el presente trabajo se asume que la ubicación de los transformadores es la óptima.

- Información geográfica de calles pertenecientes a la zona de estudio (aristas)

Esta información puede ser obtenida a partir de los sistemas de información geográfica y debe ser ingresada a través de una tabla de Excel, como se muestra en la Tabla 4.2.

- Tasa de falla unitaria de la red primaria

La tasa de falla unitaria permitirá calcular la tasa de falla de cada tramo (Coste o peso de cada arista) en la zona de estudio. En este ejercicio se asumirá que la tasa de falla tiene un valor de 0,0435 [fallas/año]. El valor fue tomado de la referencia *Electric Power Distribution Reliability* [28].

Tabla 4.2. Coordenadas geográficas de calles

Inicio de calle (X)	Inicio de calle (Y)	Fin de calle (X)	Fin de calle (Y)
6	6	1	1
1	6	6	1
9	9	11	11
6	6	8	8
1	11	11	1
6	1	11	6
1	6	6	11
10	1	10	11
9	1	9	11
8	1	8	11
7	1	7	11
6	1	6	11
5	1	5	11
4	1	4	11
3	1	3	11
2	1	2	11
1	10	11	10
1	9	11	9
1	8	11	8
1	7	11	7
4	6	11	6
1	6	3	6
1	5	11	5
1	4	11	4
1	3	11	3
1	2	11	2
1	11	1	1
11	11	1	11
11	1	11	11
1	1	11	1

4.3.2 Implementación del algoritmo de Dijkstra para determinar distancia óptima entre centros de transformación.

Dentro del software de simulación Python, se ha creado la función que permite implementar el algoritmo de Dijkstra para determinar la distancia entre centros de transformación. La función es la siguiente:

distanciaOptimaTrans(M, NF, dimM)

Esta función depende de las siguientes variables:

- M : Es la matriz de coordenadas geográficas de calles y transformadores.
- NF : Es la identificación del nodo fuente y se lo hace mediante numeración.
- dimM : Es la dimensión de la matriz M.

M y NF son datos de nodos y aristas que requiere el algoritmo de Dijkstra como datos de entrada. La tasa de fallas (que representa el peso de las aristas) es un valor que se ingresa de manera manual dentro del código de programación (Ver Anexo D, Manual de Usuario).

La función entrega como resultado una matriz que contiene todos los caminos posibles que permitan conectar los centros de transformación y que además presenten las menores tasas de fallas.

En otras palabras, la función del algoritmo de Dijkstra selecciona y guarda la información únicamente de las rutas que permitan la interconexión de transformadores, tomando en cuenta la menor tasa de fallas y entrega esta información por medio de la matriz de tasas de fallas mínimas (Tabla 4.3).

Posteriormente, esta matriz se convierte en información de entrada para la función encargada de desarrollar el algoritmo de optimización de colonia de hormigas.

Tabla 4.3. Matriz de tasas de fallas mínimas

0	0,000254	0,000174	0,000428	0,000131	0,000438	0,000261	0,000402	0,000279	0,00041	0,000149	0,000261	0,000131
0,000254	0	0,000254	0,000272	0,000174	0,00021	0,00029	0,000174	0,000149	0,000218	0,000105	0,000131	0,000359
0,000174	0,000254	0	0,000305	0,000218	0,000438	0,000384	0,000402	0,000279	0,000359	0,000149	0,000174	0,000131
0,000428	0,000272	0,000305	0	0,00042	0,000348	0,000536	0,000446	0,000395	0,000218	0,000315	0,000192	0,000348
0,000131	0,000174	0,000218	0,00042	0	0,000359	0,000192	0,000297	0,000174	0,000366	0,000131	0,000279	0,000236
0,000438	0,00021	0,000438	0,000348	0,000359	0	0,000366	0,000149	0,000236	0,000131	0,00029	0,000341	0,000543
0,000261	0,00029	0,000384	0,000536	0,000192	0,000366	0	0,000218	0,000167	0,000446	0,000272	0,000395	0,000392
0,000402	0,000174	0,000402	0,000446	0,000297	0,000149	0,000218	0	0,000174	0,000228	0,000254	0,000305	0,000507
0,000279	0,000149	0,000279	0,000395	0,000174	0,000236	0,000167	0,000174	0	0,000279	0,000131	0,000254	0,000384
0,00041	0,000218	0,000359	0,000218	0,000366	0,000131	0,000446	0,000228	0,000279	0	0,000261	0,00021	0,000464
0,000149	0,000105	0,000149	0,000315	0,000131	0,00029	0,000272	0,000254	0,000131	0,000261	0	0,000174	0,000254
0,000261	0,000131	0,000174	0,000192	0,000279	0,000341	0,000395	0,000305	0,000254	0,00021	0,000174	0	0,000279
0,000131	0,000359	0,000131	0,000348	0,000236	0,000543	0,000392	0,000507	0,000384	0,000464	0,000254	0,000279	0

4.3.3 Implementación del algoritmo y determinación de ruta óptima en anillo para alimentadores primarios.

El algoritmo de optimización por colonia de hormigas permite encontrar una ruta óptima en caminos cerrados, tal y como podría ser la trayectoria de un alimentador primario en anillo.

La determinación de la ruta óptima requiere como datos de entrada únicamente la matriz de fallas mínimas (obtenida anteriormente) y la ubicación del nodo fuente. La ubicación del nodo fuente es importante ya que puede ser la representación de una subestación y por tanto, el inicio y el final de la trayectoria del alimentador primario.

La identificación del nodo fuente se la realiza de manera manual dentro de la herramienta computacional (Ver Anexo D, Manual de Usuario).

La función que determina la ruta óptima es la siguiente:

lazoAbiertoColoniaHormigas(dimST1, Dist, ST1, G, Tflinea, M, NF)

Esta función contiene las siguientes variables y datos de entrada:

ST1	:	Matriz de coordenadas geográficas de los transformadores.
Dist	:	Matriz de distancias entre transformadores.
dimST1	:	Dimensión de la matriz ST1.
G	:	Matriz de grafo de las rutas posibles.
Tflinea	:	Tasa de falla unitaria de la línea.
M	:	Matriz de coordenadas geográficas de calles y transformadores.
NF	:	La identificación del nodo fuente mediante numeración.

Gracias a la matriz de fallas mínimas, el algoritmo entrega como resultado la ruta óptima entre centros de transformación, tomando en cuenta la mínima tasa de fallas del circuito.

La herramienta computacional muestra de dos maneras la ruta óptima: gráficamente (Figura 4.2) y numéricamente (Figura 4.3).

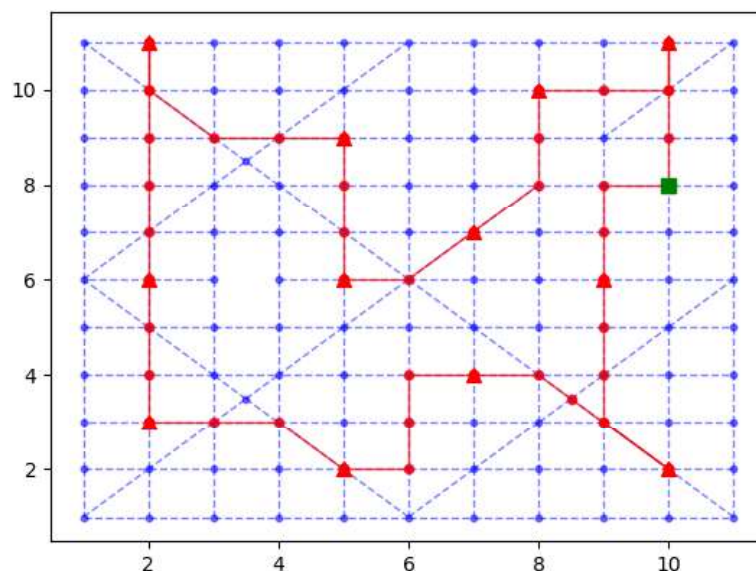


Figura 4.2. Ruta óptima del alimentador primario

En la Figura 4.2 se muestra gráficamente el recorrido óptimo del alimentador primario en color rojo. Además, es posible identificar la ubicación de la subestación (color verde) en las coordenadas (10, 8).

En la Figura 4.3 se puede visualizar (numéricamente) una parte del recorrido óptimo del primario, la distancia y la tasa de falla de cada tramo.

Dentro de la herramienta computacional, el algoritmo identifica a cada punto (formado por la intersección de líneas) mediante una numeración. Es a través de esta numeración que el algoritmo permite conocer el camino generado, tal y como se muestra a continuación:

La Figura 4.3 es un fragmento de los resultados del algoritmo de optimización por colonia de hormigas, en esta figura se observa que la ruta presenta los siguientes números: 125, 83, 3 y 137. Posteriormente se muestran las coordenadas en X e Y de cada uno de estos números.

Esto quiere decir que el recorrido empieza en el punto 125 con coordenadas (10, 8), a continuación se dirige hacia el punto 83 de coordenadas (10, 9), después va hacia el punto 3 de coordenadas (10, 10), finalmente se dirige hacia el punto 137 de coordenadas (10,

11). Estos cuatro puntos conforman un tramo del alimentador primario. Este proceso se repetirá hasta terminar el recorrido y regresar al punto inicial. De igual manera, lo mencionado anteriormente es posible visualizarlo en la Figura 4.2.

```

Ruta [125, 83, 3, 137]
Tasa Falla óptima (veces/año) = 0.0001305
Distancia (m) = 3.0

Ruta Coord. Coord.
Nodo X Y
[125. 10. 8.]
[83. 10. 9.]
[3. 10. 10.]
[137. 10. 11.]

-----

Ruta [137, 3, 43, 127]
Tasa Falla óptima (veces/año) = 0.0001305
Distancia (m) = 3.0

Ruta Coord. Coord.
Nodo X Y
[137. 10. 11.]
[3. 10. 10.]
[43. 9. 10.]
[127. 8. 10.]

```

Figura 4.3. Fragmento de resultados numéricos del algoritmo de optimización mediante colonia de hormigas

Los resultados numéricos de la optimización realizada en el alimentador primario de prueba, se encuentran detalladamente en el Anexo A.

4.4 APLICACIÓN METODOLÓGICA EN REDES REALES

Con la finalidad de mostrar el funcionamiento de los algoritmos de optimización y la herramienta computacional en redes reales, se han escogido dos alimentadores primarios que toman su energía de la subestación Barrionuevo #3, ubicada en la intersección de las calles Pedro Capiro y Lexo Brulis, al sur de Quito.

4.4.1 Aplicación metodológica en alimentador primario 3A

El alimentador primario denominado “3A” (Figura 4.4), es una red aérea que presenta una topología radial con una longitud de 11,85 km y brinda su servicio a los usuarios de los barrios Atahualpa Oriental y Villa Flora. Esta zona comprende un área aproximada de 0,456

km² y se encuentra dentro del perímetro formado por las calles: Rodrigo de Chávez, Pedro Vicente Maldonado, Serapio Japerabi, Luis Iturralde y Libiramba.

El nivel de voltaje de este alimentador primario es 22,8 kV y brinda su servicio aproximadamente a 5300 usuarios a través de 100 transformadores de diferentes características.

La información de transformadores, ubicación de centros de transformación y vías públicas, se encuentra detallada en el Anexo B.

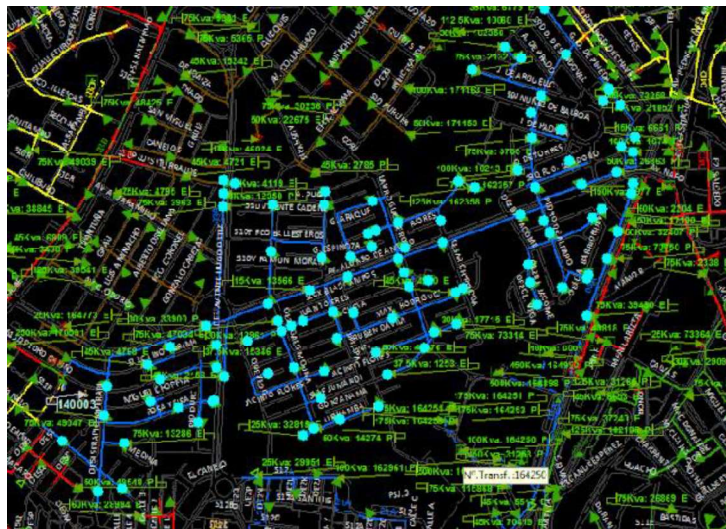


Figura 4.4. Representación del alimentador primario 3A en ARCGIS

Para la optimización del alimentador primario se debe ingresar: la información geográfica de la subestación, centros de transformación y vías públicas mediante un archivo Excel. (Ver Anexo D, Manual de Usuario).

El valor de la tasa de falla = 0,0435 (veces/año/km) es un valor típico para redes de distribución en sectores urbanos y se lo toma de la referencia [29].

La función encargada de determinar la distancia óptima entre centros de transformación entrega como resultado una representación gráfica (Figura 4.5) de todos los caminos posibles que conecten los centros de transformación, tomando en cuenta la menor tasa de fallas en cada tramo.

La Figura 4.5 muestra la representación de las distancias óptimas entre transformadores del primario 3A.

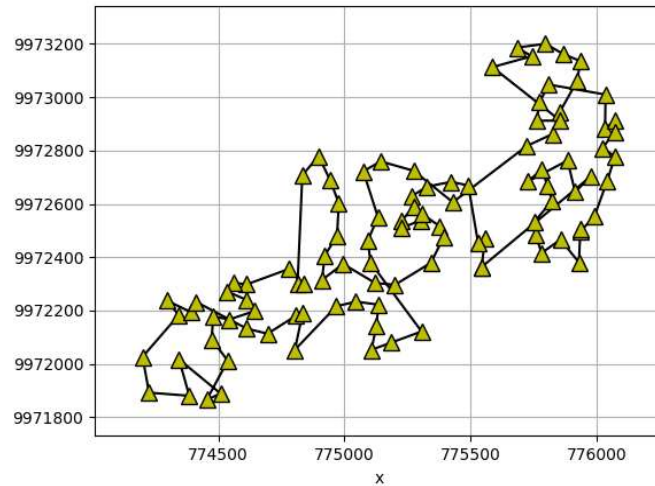


Figura 4.5. Distancias óptimas entre transformadores del primario 3A.

La función encargada de determinar la ruta óptima en anillo del alimentador primario entrega como resultado una imagen que muestra gráficamente: el recorrido óptimo del alimentador (trazado en color rojo), las ubicaciones de los transformadores (triángulos de color rojo) y la ubicación de la subestación (cuadrado en color verde). Esto se puede observar en la Figura 4.6.

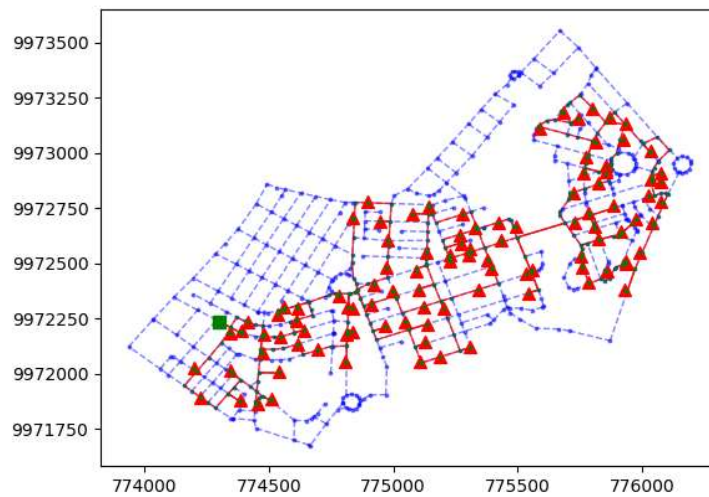


Figura 4.6. Ruta óptima del alimentador primario 3A en Python

La herramienta computacional muestra de forma complementaria una tabla con la siguiente información:

- Tasa de falla de cada tramo.
- Longitud de cada tramo.
- El recorrido del alimentador primario mediante coordenadas geográficas.

La Figura 4.7 es una parte de la tabla que contiene la información del recorrido óptimo, mencionada anteriormente.

Ruta [720.0, 365.0, 558.0, 561.0, 702.0]		
Tasa Falla óptima (veces/año) = 0.0063998070512756465		
Distancia (m) = 147.0		
No.	Coord.	Coord.
Nodo	X	Y
[[7.200000e+02	7.755450e+05	9.972363e+06]
[3.650000e+02	7.755830e+05	9.972380e+06]
[5.580000e+02	7.755560e+05	9.972458e+06]
[5.610000e+02	7.755520e+05	9.972469e+06]
[7.020000e+02	7.755590e+05	9.972472e+06]]

Ruta [702.0, 561.0, 558.0, 560.0, 724.0]		
Tasa Falla óptima (veces/año) = 0.0020993411424029868		
Distancia (m) = 48.0		
No.	Coord.	Coord.
Nodo	X	Y
[[7.020000e+02	7.755590e+05	9.972472e+06]
[5.610000e+02	7.755520e+05	9.972469e+06]
[5.580000e+02	7.755560e+05	9.972458e+06]
[5.600000e+02	7.755320e+05	9.972449e+06]
[7.240000e+02	7.755310e+05	9.972453e+06]]

Figura 4.7. Información complementaria del alimentador 3A

La información de todos los tramos que conforman el alimentador primario se encuentran en el Anexo B.

4.4.2 Análisis comparativo en alimentador primario 3A

Con el objetivo de realizar un análisis comparativo, se elaboran cálculos de índices de confiabilidad y flujos de potencia para el alimentador radial (actualmente en servicio) y para el alimentador en anillo propuesto como resultado de la aplicación metodológica.

Los cálculos de confiabilidad y flujos de potencia se han realizado mediante un módulo de confiabilidad y un módulo de flujos de carga correspondientemente; estos módulos se encuentran integrados dentro del software de simulación CYMDIST.

A continuación, se presenta en la Figura 4.8 un esquema del recorrido del primario radial modelado en CYMDIST.

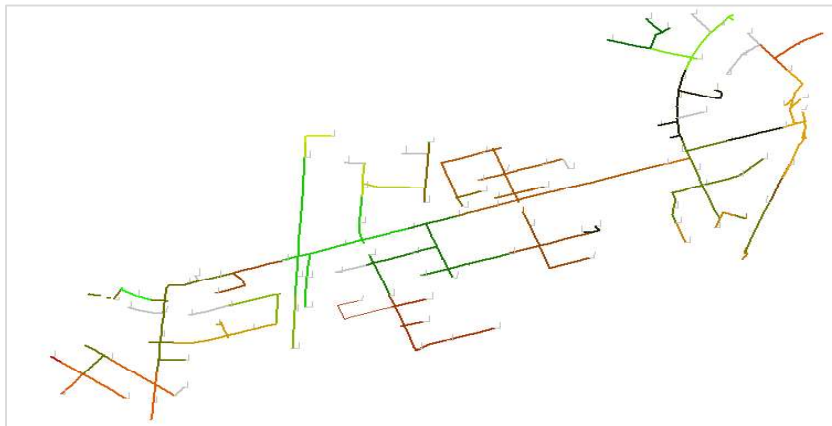


Figura 4.8. Esquema del alimentador primario radial 3A en CYMDIST

En la Tabla 4.4 se encuentran valores de los parámetros que se ingresaron en el módulo de confiabilidad de CYMDIST con el objetivo de realizar la modelación del alimentador primario radial aéreo. Estos valores son considerados como valores típicos para redes aéreas dentro de zonas urbanas [29],[30].

Tabla 4.4. Parámetros de entrada de confiabilidad primario aéreo 3A

Tasa de falla de transformador (veces/año)		0,01
Tasa de falla de red primaria (veces/año/km)		0,063
Tiempo de reparación por transformador MTTR (horas)		4:00
Tiempo de reparación por red primaria MTTR (horas)		4:00
Porcentaje de fallas	Trifásica (%)	6
	Bifásica (%)	14
	Monofásica (%)	80
Número de clientes/fase		17

De igual manera, para realizar la modelación del alimentador primario en anillo de tipo aéreo, se ingresaron en el módulo de confiabilidad de CYMDIST los parámetros que se encuentra en la Tabla 4.5; estos valores son considerados como valores típicos para zonas urbanas y fueron tomados de las referencias [29],[30].

Tabla 4.5. Parámetros de entrada de confiabilidad primario en anillo 3A

Tasa de falla de transformador (veces/año)		0,01
Tasa de falla de red primaria (veces/año/km)		0,0435
Tiempo de reparación por transformador MTTR (horas)		4:00
Tiempo de reparación por red primaria MTTR (horas)		1:30
Porcentaje de fallas	Trifásica (%)	6
	Bifásica (%)	14
	Monofásica (%)	80
Número de clientes/fase		17

Es importante notar que la tasa de falla y el tiempo de reparación de la red primaria han cambiado debido a que el alimentador propuesto presenta una configuración en anillo.

Se considera que el tiempo de reparación del primario es 1,5 horas; la razón se debe a que, en caso de falla en un tramo del conductor, la topología en anillo abierto permite aislar el tramo en falla y alimentar el primario desde otro ramal del anillo, esto reduce el tiempo necesario para la recuperación del servicio eléctrico [2].

Los resultados del análisis de flujos de carga han permitido conocer la variación de las caídas de voltaje en cada uno de los centros de transformación. La tabla comparativa que contiene los valores de voltaje en cada uno de los transformadores, se encuentra en el Anexo B.

La Figura 4.9 muestra (en porcentaje) el número de transformadores en los cuales el voltaje de entrada ha cambiado después de la optimización. Se puede observar que existe una menor caída de voltaje en el 61% de los transformadores; la caída de voltaje no ha variado en el 37% de los transformadores y finalmente, el 2% de los transformadores ha aumentado su caída de voltaje.

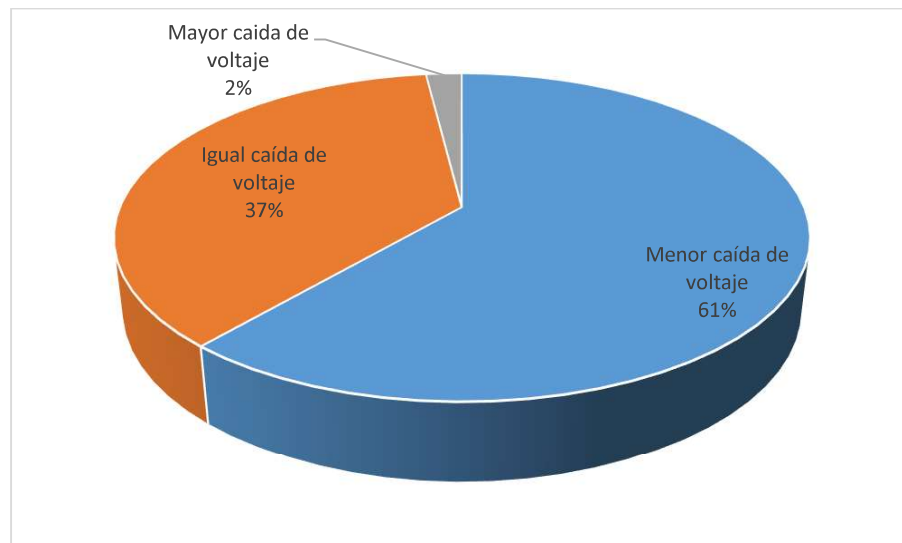


Figura 4.9. Porcentajes de cambios de voltaje en los terminales de los transformadores del primario 3A

Mediante la comparación de los resultados de los índices de confiabilidad mostrados en la Tabla 4.6, es posible notar que los índices de confiabilidad SAIFI, SAIDI Y CAIDI disminuyen de manera favorable. Esto muestra que la optimización de la red primaria mediante la herramienta computacional propuesta permite mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico de distribución y la calidad del servicio eléctrico.

Finalmente, en la Figura 4.10 se esquematiza la modelación en CYMDIST del alimentador primario propuesto, este esquema fue resultado de la herramienta computacional desarrollada en PYTHON.

Tabla 4.6. Tabla Comparativa alimentador primario 3A

Escenario	Saifi (int/cns-año)	Saidi (h/cns-año)	Caidi (h/cns-inter)	Longitud
Primario Radial existente	0,997	3,771	3,89	11,85
Primario Anillo Propuesto	0,461	1,776	3,865	11,44
Variación [%]	53,761	52,904	0,643	3,460

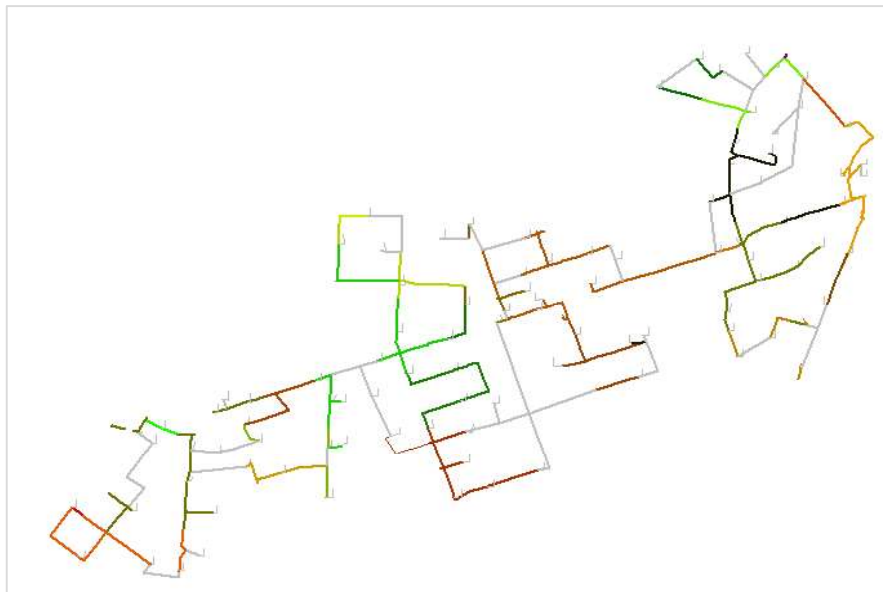


Figura 4.10. Ruta óptima del alimentador primario 3A en CYMDIST

4.4.3 Aplicación metodológica en alimentador primario 3D

El alimentador primario denominado “3D” (Figura 4.11), es una red aérea que presenta una topología radial con una longitud de 15,24 km y brinda su servicio a los usuarios de los barrios La Lorena, Cuatro de Diciembre y Mariscal de Ayacucho. Esta zona comprende un

área aproximada de 0,91 km² y se encuentra dentro del perímetro formado por las calles: Chilibulo, Chimborazo, Mariscal Sucre y Juan Camacaro.

El nivel de voltaje de este alimentador primario es 22,8 kV y brinda su servicio aproximadamente a 1325 usuarios a través de 53 transformadores de diferentes características.

La información de transformadores, ubicación de centros de transformación y vías públicas, se encuentra detallada en el Anexo D.



Figura 4.11. Representación del alimentador primario 3D en ARCGIS

Para la optimización del alimentador primario se debe ingresar: la información geográfica de la subestación, centros de transformación y vías públicas mediante un archivo Excel. (Ver Anexo D, Manual de Usuario).

El valor de la tasa de falla = 0,0435 (veces/año/km) es un valor típico para redes aéreas de distribución en sectores urbanos y se lo toma de la referencia [29].

La función encargada de determinar la distancia óptima entre centros de transformación entrega como resultado una representación gráfica (Figura 4.12) de todos los caminos posibles que conecten los centros de transformación, tomando en cuenta la menor tasa de fallas en cada tramo.

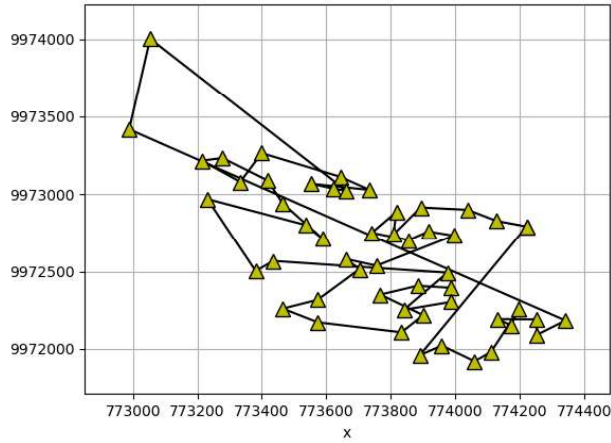


Figura 4.12. Distancias óptimas entre transformadores del primario 3D.

La función encargada de determinar la ruta óptima en anillo del alimentador primario entrega como resultado una imagen que muestra gráficamente el recorrido óptimo del alimentador primario (trazado en color rojo), las ubicaciones de los transformadores (triángulos de color rojo) y la ubicación de la subestación (cuadrado en color verde). Esto se puede ver en la Figura 4.13.

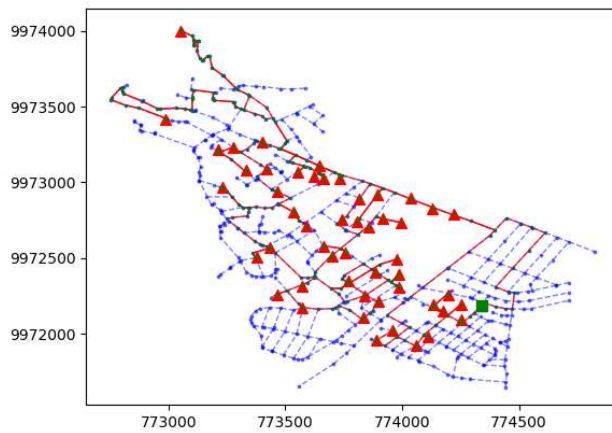


Figura 4.13. Ruta óptima del alimentador primario 03D en Python

La herramienta computacional muestra de forma complementaria una tabla con la siguiente información:

- Tasa de falla de cada tramo
- Longitud de cada tramo
- El recorrido del alimentador primario mediante coordenadas geográficas.

La Figura 4.14 es una parte de la tabla que contiene la información del recorrido óptimo, mencionada anteriormente.

Ruta [617.0, 53.0, 54.0, 632.0]		
Tasa Falla óptima (veces/año) = 0.004955576339825774		
Distancia (m) = 114.0		
No.	Coord.	Coord.
Nodo	X	Y
[[6.170000e+02	7.742220e+05	9.972793e+06]
[5.300000e+01	7.742180e+05	9.972785e+06]
[5.400000e+01	7.741320e+05	9.972834e+06]
[6.320000e+02	7.741290e+05	9.972829e+06]]

Ruta [632.0, 54.0, 459.0, 637.0]		
Tasa Falla óptima (veces/año) = 0.005619289299067229		
Distancia (m) = 129.0		
No.	Coord.	Coord.
Nodo	X	Y
[[6.320000e+02	7.741290e+05	9.972829e+06]
[5.400000e+01	7.741320e+05	9.972834e+06]
[4.590000e+02	7.740340e+05	9.972892e+06]
[6.370000e+02	7.740390e+05	9.972900e+06]]

Figura 4.14. Información complementaria del alimentador 3D

La información de todos los tramos que conforman el alimentador primario se encuentran en el Anexo C.

4.4.4 Análisis comparativo en alimentador primario 3D

Con el objetivo de realizar un análisis comparativo, se elaboran cálculos de índices de confiabilidad y flujos de potencia para el alimentador radial (actualmente en servicio) y para el alimentador en anillo propuesto como resultado de la aplicación metodológica.

Los cálculos de confiabilidad y flujos de potencia se han realizado mediante un módulo de confiabilidad y un módulo de flujos de carga correspondientemente; estos módulos se encuentran integrados dentro del software de simulación CYMDIST.

En la Figura 4.15 se presenta un esquema del recorrido del alimentador primario radial modelado en CYMDIST.

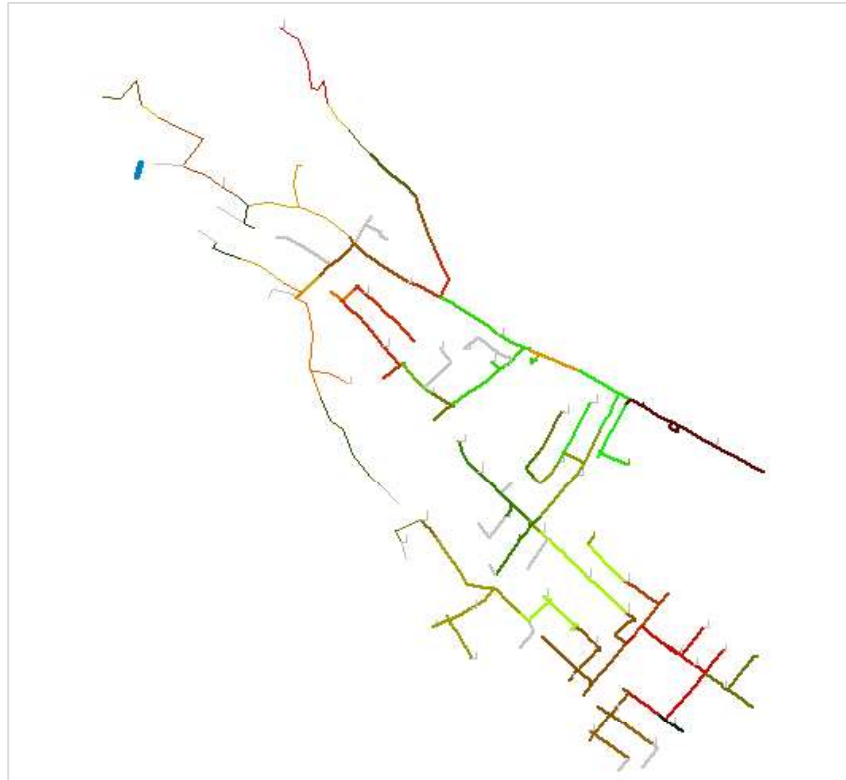


Figura 4.15. Esquema del alimentador primario radial 3D en CYMDIST

En la Tabla 4.7 se encuentran valores de los parámetros que se ingresaron en el módulo de confiabilidad de CYMDIST con la finalidad de realizar la modelación del alimentador primario radial aéreo. Estos valores son considerados como valores típicos para redes aéreas dentro de zonas urbanas [29],[30].

Tabla 4.7. Parámetros de entrada de confiabilidad primario aéreo radial 3D

Tasa de falla de transformador (veces/año)		0,01
Tasa de falla de red primaria (veces/año/km)		0,063
Tiempo de reparación por transformador MTTR (horas)		4:00
Tiempo de reparación por red primaria MTTR (horas)		4:00
Porcentaje de fallas	Trifásica (%)	6
	Bifásica (%)	14
	Monofásica (%)	80
Número de clientes/fase		17

Para realizar la modelación del alimentador primario en anillo de tipo aéreo, se ingresaron en el módulo de confiabilidad de CYMDIST los parámetros que se encuentra en la Tabla 4.8; estos valores son considerados como valores típicos para zonas urbanas y fueron tomados de las referencias [29],[30].

Es importante notar que la tasa de falla y el tiempo de reparación de la red primaria han cambiado debido a que el alimentador propuesto presenta una configuración en anillo.

Se considera que el tiempo de reparación del primario es 1,5 horas; la razón se debe a que, en caso de falla en un tramo del conductor, la topología en anillo abierto permite aislar el tramo en falla y alimentar el primario desde otro ramal del anillo, esto reduce el tiempo necesario para la recuperación del servicio eléctrico [2].

Los resultados del análisis de flujos de carga han permitido conocer la variación de las caídas de voltaje en cada uno de los centros de transformación.

La tabla comparativa de los valores de voltaje en cada uno de los centros de transformación se encuentra en el Anexo C.

Tabla 4.8. Parámetros de entrada de confiabilidad primario aéreo en anillo 3D

Tasa de falla de transformador (veces/año)		0,01
Tasa de falla de red primaria (veces/año/km)		0,0435
Tiempo de reparación por transformador MTTR (horas)		4:00
Tiempo de reparación por red primaria MTTR (horas)		1:30
Porcentaje de fallas	Trifásica (%)	6
	Bifásica (%)	14
	Monofásica (%)	80
Número de clientes/fase		17

La Figura 4.16 muestra (en porcentaje) el número de transformadores en los cuales el voltaje de entrada ha cambiado después de la optimización. Se puede observar que existe una menor caída de voltaje en el 65% de los transformadores, mientras que el 35% restante no ha experimentado caídas de voltaje en sus terminales.

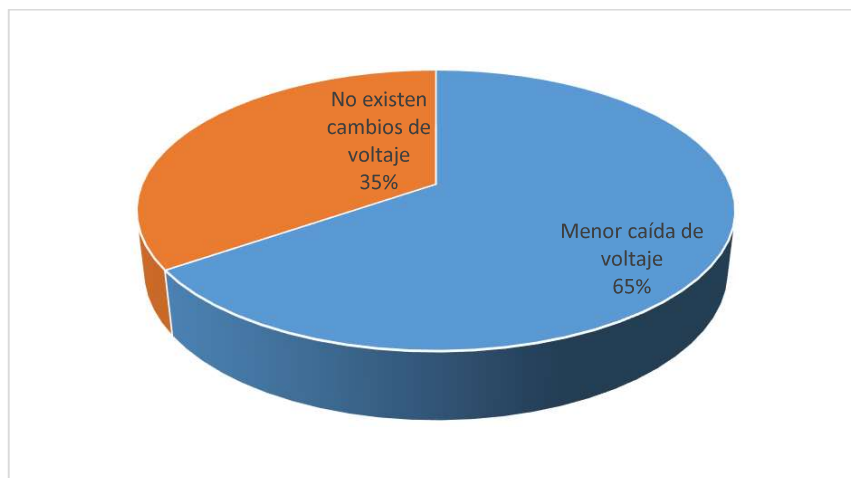


Figura 4.16. Porcentajes de cambios de voltaje en los terminales de los transformadores del primario 3D

Mediante la comparación de los resultados de los índices de confiabilidad mostrados en la Tabla 4.9, es posible notar que los índices de confiabilidad SAIFI, SAIDI Y CAIDI disminuyen de manera favorable. Esto muestra que la optimización de la red primaria mediante la herramienta computacional propuesta permite mejorar la confiabilidad del sistema eléctrico de distribución y la calidad del servicio eléctrico.

Finalmente en la Figura 4.17 se esquematiza la modelación en CYMDIST del alimentador primario propuesto, este esquema fue resultado de la herramienta computacional desarrollada en PYTHON.

Tabla 4.9. Tabla Comparativa alimentador primario 3D

Escenario	Saifi [int/cns-año]	Saidi [h/cns-año]	Caidi [h/cns-inter]	Longitud [km]
Primario Radial existente	1,224	5,259	4,296	0,91
Primario Anillo Propuesto	0,443	1,766	3,998	0,863
Variación [%]	63,807	66,534	6,937	5,165

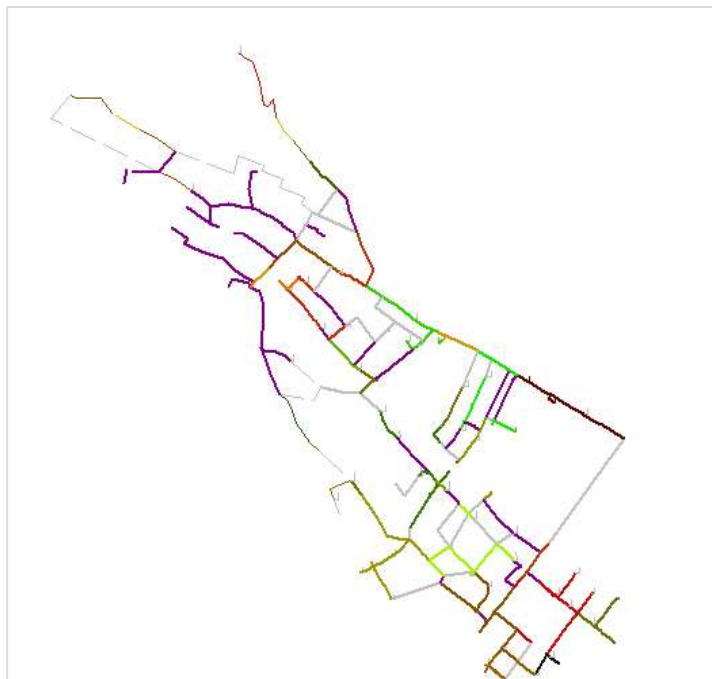


Figura 4.17. Ruta óptima del alimentador primario 3D en CYMDIST.

5. CONCLUSIONES

En el presente proyecto de titulación se ha realizado el proceso optimización de alimentadores primarios aéreos mediante el uso de algoritmos metaheurísticos de optimización. La implementación de estos algoritmos ha requerido, en su mayoría, información geográfica de vías públicas y centros de transformación obtenida a partir de sistemas de información geográfica (SIG) de empresas eléctricas de distribución.

Dentro de un software de programación libre conocido como PHYTON, se ha elaborado una herramienta computacional que permite determinar la ruta óptima entre centros de transformación pertenecientes a un alimentador primario, en función únicamente de la información geográfica de las vías públicas, los transformadores y tasas de fallas. La herramienta computacional basa su proceso de optimización en algoritmos metaheurísticos.

Python, el software de programación libre utilizado en este proyecto, ha permitido la creación de las funciones que se encargan de implementar los algoritmos matemáticos sobre los alimentadores primarios; este lenguaje de programación dispone de rutinas que han sido creadas por diferentes desarrolladores, esto presenta la posibilidad de utilizar estas rutinas y adecuarlas a las necesidades del usuario, sin tener que crear todo el código de programación.

Se ha realizado pruebas operativas mediante la implementación de ejemplos de alimentadores primarios aéreos reales. La implementación de estos ejemplos ha permitido poner a prueba el funcionamiento de la herramienta computacional y la implementación de los algoritmos de optimización.

La optimización de redes secundarias mediante el proceso y las herramientas descritas en este proyecto, han permitido obtener menores caídas de voltaje en los centros de transformación y mejorar los índices de confiabilidad de la red. Los análisis de confiabilidad y los flujos de carga han sido realizados en el software de simulación CYMDIST.

Para explicar el proceso de funcionamiento de la herramienta de software implementada, Se ha elaborado un manual de usuario que permitirá facilitar el uso y la comprensión de la herramienta computacional, ya que existen ciertos parámetros que se deben seguir en cuanto al ingreso de los datos. De esta manera el diseñador tendrá las herramientas necesarias para realizar un estudio del mejoramiento de la calidad y la confiabilidad del servicio eléctrico.

6. RECOMENDACIONES

En futuros trabajos de titulación, para mejorar la optimización de la ruta de alimentadores primarios haciendo uso de la metodología propuesta, se recomienda obtener (previamente) el número óptimo y la ubicación óptima de centros de transformación. Estos datos pueden ser obtenidos (al igual que en el presente proyecto) mediante la implementación de algoritmos. El número óptimo de centros de transformación puede ser obtenido mediante el uso de algoritmos genéticos, y la ubicación óptima puede determinarse a partir de la implementación del algoritmo de k-medoides.

Debido a que periódicamente se realizan mejoras dentro del software de simulación, es recomendable realizar actualizaciones frecuentes de las librerías de Python. La actualización del software de simulación se la puede hacer a través del gestor de entorno Anaconda; esto permitirá un mejor desempeño de la herramienta computacional.

La metodología propuesta en este trabajo permite determinar la ruta óptima de un alimentador primario que dependerá de la naturaleza de las variables de la función de coste. Es decir: si al coste se le asignan valores de distancia, el algoritmo determinará el camino más corto del alimentador primario; si al coste se le asignan valores de tiempo, el algoritmo determinará el camino que tome menos tiempo del alimentador primario, etc. Es por esta razón que se recomienda esta metodología para determinar rutas más cortas, más confiables o más económicas; todo depende de los requerimientos que podrían presentarse en futuros proyectos de titulación.

Para el correcto funcionamiento de la herramienta computacional, se recomienda seguir a detalle los pasos mencionados en el presente proyecto y el manual de usuario. Esta recomendación se la realiza con la finalidad de evitar resultados erróneos en el proceso de optimización.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] «Planification de l'expansion des systemes electriques.pdf». .
- [2] C. A. S. Intriago, «PLANIFICACIÓN DE REDES ELÉCTRICAS DE DISTRIBUCIÓN EN ZONAS URBANAS CONSOLIDADAS CONSIDERANDO CRITERIOS DE CONFIABILIDAD.», p. 112.
- [3] S. Heidari y M. Fotuhi-Firuzabad, «Reliability evaluation in power distribution system planning studies», en *2016 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, Beijing, 2016, pp. 1-6.
- [4] M. Sedghi, A. Ahmadian, y M. Aliakbar-Golkar, «Assessment of optimization algorithms capability in distribution network planning: Review, comparison and modification techniques», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 66, pp. 415-434, dic. 2016.
- [5] «Regulación ARCONEL 005_17.pdf». .
- [6] O. M. Wrom y O. L. Víctor, «MEJORAMIENTO DE ÍNDICES DE CONFIABILIDAD MEDIANTE LA OPTIMIZACIÓN DE RECURSOS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN», vol. 19, p. 11, 2005.
- [7] «Evaluación de Confiabilidad en Sistemas Eléctricos de Distribución.pdf». .
- [8] E. L. Lawler, «Combinatorial Optimization», p. 384.
- [9] «Calidad de Energía Eléctrica», *IECOR*. .
- [10] «Manual Electrico Viakon - Capitulo 4 Sist. Dist..pdf». .
- [11] S. R. Castaño, «Redes de Distribución de Energía», p. 926.
- [12] «Normativa de Expansión del Sistema de Distribución de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur.pdf». .
- [13] J. Cervantes y J. Dolores, «Sistemas de distribución de energía eléctrica / José Dolores Juárez Cervantes.»
- [14] «Estudio en el Cambio de Voltaje en la Subestación 17 de 6.3kV a 23kV para Mejorar el Servicio en el Área Noroccidental de Quito.pdf». .
- [15] «Análisis de Confiabilidad de Sistemas de Distribución Eléctrica.pdf». .

- [16]«CONELEC, "Regulación 004-01.pdf». .
- [17]«IEEE Std 1366-2012 (Revision of IEEE Std 1366-2003) IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices», p. 92.
- [18]M. Burgardt, G. Carballo, y G. Muínelo, «OPTIMIZACIÓN DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN EN BAJA y MEDIA TENSIÓN», p. 176.
- [19]«Definición de grafos — Definicion.de», *Definición.de*. [En línea]. Disponible en: <https://definicion.de/grafos/>. [Accedido: 10-may-2019].
- [20]J. Richard, «Matematicas Discretas», p. 697.
- [21]A. Salas, «Acerca del Algoritmo de Dijkstra», *ArXiv08100075 Cs*, oct. 2008.
- [22]E. Gladkikh, «Optimisation de l'architecture des réseaux de distribution d'énergie électrique», p. 161.
- [23]Z. Hong y F. Bian, «Novel Ant Colony Optimization for Solving Traveling Salesman Problem in Congested Transportation System», en *2008 IEEE Pacific-Asia Workshop on Computational Intelligence and Industrial Application*, Wuhan, China, 2008, pp. 122-125.
- [24]H. E. T. Chura, C. A. S. Delgado, E. E. A. Cotízales, y E. F. Espinoza, «APLICACIÓN DEL ALGORITMO DE COLONIA DE HORMIGAS AL PROBLEMA DEL AGENTE VIAJERO», p. 5.
- [25]«Algoritmos de Optimización Basados en Colonia de Hormigas Aplicados al Problema de Asignación Cuadrática y Otros Problemas Relacionados.pdf». .
- [26]«4.2 Búsqueda Local (Local Search)». [En línea]. Disponible en: <https://ccc.inaoep.mx/~emorales/Cursos/Busqueda/node58.html>. [Accedido: 11-may-2019].
- [27]«Óptimización por Colonia de Hormigas_Aplicaciones y Tendencias.pdf». .
- [28]«Brown - 2009 - Electric power distribution reliability.pdf». .
- [29]R. E. Brown, *Electric power distribution reliability*, 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2009.
- [30]J. L. Z. Villamarín y D. A. B. Loaiza, «Análisis de Confiabilidad del Sistema de Distribución de la Empresa Regional CENTROSUR», p. 159.

8. ANEXOS

ANEXO A. Información Referente al Alimentador Primario de Prueba.

ANEXO B. Información Referente al Alimentador Primario 3A

ANEXO C. Información Referente al Alimentador Primario 3D

ANEXO D. Manual de Usuario.

ORDEN DE EMPASTADO