

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

*Trabajo de titulación previo a
la obtención del título de
Ingeniero Eléctrico*

PROYECTO TÉCNICO CON ENFOQUE INVESTIGATIVO

**“APLICACIÓN DE UNA RED NEURONAL A UN SISTEMA
ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS DE
COMPORTAMIENTO DE SU CARGA EN BAJO VOLTAJE”**

AUTORES

GEOVANNY XAVIER CARPIO SUAREZ

PAÚL ALEXANDER DAGA LÓPEZ

TUTOR

ING. PABLO DANIEL ROBLES LOVATO, MSc.

CUENCA - ECUADOR

2019

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Geovanny Xavier Carpio Suárez, con documento de identificación N° 0923881510 y Paúl Alexander Daga López, con documento de identificación N° 110485128, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“APLICACIÓN DE UNA RED NEURONAL A UN SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE SU CARGA EN BAJO VOLTAJE”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: *Ingeniero Eléctrico*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, septiembre del 2019



.....
Geovanny Xavier Carpio Suarez

C.I. 0923881510



.....
Paúl Alexander Daga López

C.I. 1104851298

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “**APLICACIÓN DE UNA RED NEURONAL A UN SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE SU CARGA EN BAJO VOLTAJE**”, realizado por Geovanny Xavier Carpio Suárez y Paúl Alexander Daga López, obteniendo el *Proyecto Técnico con Enfoque Investigativo* que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, septiembre del 2019



.....
Ing. Pablo Daniel Robles Lovato, MsC.

C.I. 0101663342

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros Geovanny Xavier Carpio Suárez A con documento de identificación N° 0923881510 y Paúl Alexander Daga López con documento de identificación N° 1104851298, autores del trabajo de titulación: **“APLICACIÓN DE UNA RED NEURONAL A UN SISTEMA ELÉCTRICO DE DISTRIBUCIÓN MEDIANTE EL ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO DE SU CARGA EN BAJO VOLTAJE”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico con Enfoque Investigativo* es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, septiembre del 2019



.....
Geovanny Xavier Carpio Suárez

C.I. 0923881510



.....
Paúl Alexander Daga López

C.I. 1104851298

DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico a mis padres, Geovanni Carpio y Mónica Suarez, por su esfuerzo, dedicación, consejo y apoyo, siempre serán el motor de mi vida y gracias a ustedes he podido llegar a culminar una etapa, pese a las dificultades que se presentaron en el camino. De igual manera a mi hermana Ruth a quien le deseo lo mejor en su vida, gracias por tu apoyo y cariño. En especial dedico este proyecto a la memoria de mi abuelita Angelita, quien no pudo verme llegar a este objetivo, pero sé que desde el cielo ella siempre me mantiene bajo su cuidado, intercediendo por mí y sintiéndose orgullosa de su nieto. Te quiero y te extraño †.

Geovanny Xavier Carpio Suárez

Dedico este trabajo a Dios, a mi madre Fani López, a mi padre Gerardo Daga, por apoyarme incondicional en todo momento, por brindarme su confianza, sus consejos, su ejemplo de perseverancia y superación, los cuales guían mi camino.

A mis hermanos Pablo y Gabriela, que han sabido motivarme, brindarme su ejemplo, su amor en los momentos más difíciles y sobre todo por haber estado al pendiente de mí; a mis abuelitos Marcelo, Gerardo, Victorina, Juana que a pesar de la distancia siempre estuvieron conmigo apoyándome de una u otra manera; y a todos mis demás familiares, amigos que han participado en el proceso educativo y de vida.

Paúl Alexander Daga López

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios por permitirme cumplir una meta más en mi vida e iluminar cada día mi camino y luego a mis padres, Geovanni y Mónica, por el apoyo incondicional que siempre me han brindado, el amor y la paciencia que me han tenido desde pequeño.

Agradezco a mis tíos, Boris, Miguel, Catalina, Xavier, José y Lorena, a mis abuelos Miguel y Ruth, a mis tías Clemencia Bognoli e Hilda Becerra, pues cada uno de ellos han sabido brindarme algún consejo de vida, además de estar conmigo a lo largo de este reto.

Agradezco a las amistades que he formado a lo largo de mi vida, compañeros de carrera, docentes de la universidad, entre las personas más importantes a Joseline, Valentina y Christian quienes han compartido conmigo gran parte de este camino, mostrándome su sincera amistad y cariño. Sobre todo, a mi primo Andrés Cabrera con quien he compartido desde pequeño experiencias, conocimientos y sobre todo una gran amistad.

Además, sin ser menos importante al Ing. Pablo Robles Lovato MsC. por los conocimientos transmitidos a lo largo de la carrera, su guía en la culminación de este proyecto y sobre todo la amistad brindada. También a mi compañero Paúl Daga quien me ayudó a la elaboración de este proyecto, gracias por contar con tu apoyo, puntos de vista y sobre todo la amistad compartida a lo largo de la carrera.

Geovanny Xavier Carpio Suárez

Ante todo, agradecer a Dios, por la fortaleza para lograr esta meta y superar todos los diferentes obstáculos y retos a lo largo de mi carrera universitaria, agradezco a mis padres Fani y Gerardo; mis hermanos Pablo y Gabriela, por su apoyo, esfuerzo y motivación durante mis años de estudio.

Agradezco a mis abuelitos, a todos mis tíos, en especial a mi tío Fabián por su constante preocupación y estar pendiente de mi persona de una u otra manera. A mis primos y demás familiares que estuvieron brindándome sus consejos y formándome de la mejor manera.

A mis compañeros de carrera, docentes y amistades formadas a lo largo de mi vida, que me manifestaron su apoyo incondicional en todo momento y ante cualquier circunstancia, además por todos los recuerdos y experiencias convividas.

De igual manera agradecer al Ing. Pablo Robles Lovato MsC, por guiarnos en la realización de este trabajo, brindándonos todo su conocimiento y apoyo en el ámbito profesional y personal. Además, a mi amigo Geovanny Carpio por su apoyo, motivación y esfuerzo en la culminación de este trabajo, pero sobre todo por la amistad compartida en este proceso educativo.

Paúl Alexander Daga López

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza la aplicación de una RNA a un sistema eléctrico de distribución de bajo voltaje, la cual es entrenada en base al modelo general de flujos de potencia, respetando las restricciones de caída de voltaje y pérdidas técnicas por transporte de suministro eléctrico. Esta metodología permite que un sistema real que se encuentre en el área de concesión de una distribuidora sea modificado con el fin de encontrar el ahorro anual del sistema optimizado en bajo voltaje debido a las pérdidas técnicas del transporte de energía, como uno de los factores determinantes propios del flujo de potencia.

El estudio tiene como objetivo verificar la efectividad de una RNA para sistemas de distribución en cuanto a la optimización para bajo voltaje. En función de los resultados obtenidos por el método se realiza un análisis técnico-económico denominado razón beneficio costo, lo que nos permite verificar la viabilidad del método propuesto ya sea frente a un sistema existente o compararlo con sistemas optimizados.

ABSTRACT

In the present work, an ANN is applied to a low voltage electrical system distribution network, which is trained based on the general model of power flows, respecting the restrictions of voltage drop and technical losses due to electricity supply transport. This methodology allows a real electrical system distribution network that is in the concession area of a electrical company, to be modified in order to find the annual saving of the system optimized in low voltage due to the technical losses of the energy transport, as one of the determining factors proper to the power flow.

The study aims to verify the effectiveness of ANN in electrical systems distribution network for low voltage. Based on the results obtained by the method, a technical economic analysis is carried out called the cost benefit ratio, which allows us to verify the viability of the proposed method either against existing system or to compare it with optimized system.

TABLA DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vi
RESUMEN	viii
ABSTRACT.....	ix
TABLA DE CONTENIDOS	x
LISTA DE TABLAS	xiii
LISTA DE FIGURAS.....	xv
GLOSARIO	xvi
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCION	1
1.1. Problema de Estudio	1
1.2. Justificación	1
1.3. Alcance	1
1.4. Grupo Objetivo	2
1.5. Objetivos.....	2
1.5.1. Objetivo General.....	2
1.5.2. Objetivos Específicos.....	2
CAPÍTULO 2.....	3
2. ESTADO DEL ARTE.....	3
2.1. Red Neuronal	3
2.1.1. Elementos básicos de una RNA.....	4
2.1.2. Características Generales de una RNA.....	5
2.1.2.1. Topología de las RNA.....	5
2.1.2.2. Mecanismos de aprendizaje	6
2.1.3. Función de Activación.....	7
2.1.3.1. Función Escalón.....	7
2.1.3.2. Función Lineal	7
2.1.3.3. Función Sigmoidal	8
2.1.4. Recomendaciones para la inicialización de la arquitectura de una RNA	8
2.1.4.1. Reglas ad-hoc.....	8
2.1.4.2. Procedimientos de poda	9
2.1.5. Red Neuronal Back-Propagation.....	9
2.1.6. Aplicaciones.....	12
2.2. Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP)	13
2.2.1. Aspectos de los Sistemas de Potencia.....	14
2.2.2. Flujos de Potencia.....	14
2.2.3. Ubicación y conformación de un sistema de distribución	16
2.2.4. Estudio de cargas.....	17
2.2.5. Tipos de Cargas.....	17
2.3. Planificación del Sistema de Distribución	18
2.4. Reconfiguración de los Sistemas de Distribución	18
2.5. Fundamentos de análisis del Sistema de Distribución.....	19
2.6. Flujo de carga en alimentadores de distribución.....	20
2.6.1. Método de Ardvison para la resolución de flujos de carga.....	20
2.6.2. Modelo matemático para sistemas de distribución	22
2.6.2.1. Ecuaciones de Carson.....	22

	xi
2.6.2.2.	Modificación de las ecuaciones de Carson.....23
2.6.2.3.	Estructuras de redes aéreas en bajo voltaje.....24
2.6.3.	Cálculo de caídas de voltaje y pérdidas de potencia en redes de distribución. 24
2.6.3.1.	Alimentadores y ramales trifásicos de tres (Δ) y cuatro hilos (Y).....25
2.6.3.2.	Ramales monofásicos entre dos fases de un circuito conectado en Δ26
2.6.3.3.	Expresiones para las pérdidas activas.....30
2.7.	Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas (ACO)30
2.8.	Análisis Económico32
2.9.	Índices de Rentabilidad Económica.....33
2.9.1.	Valor actual neto (VAN).....33
2.9.2.	Razón Beneficio/Costo RBC.34
CAPÍTULO 3.....	35
3.	METODOLOGIA USADA PARA LA OPTIMIZACION35
3.1.	Adquisición de datos.....36
3.2.	Optimización mediante Colonia de Hormigas (ACO).....36
3.3.	Flujo de Potencia.....38
3.4.	Estructura RNA Propuesta39
3.4.1.	Entradas de la RNA40
3.4.2.	Salidas de la RNA41
3.5.	Entrenamiento de la RNA41
CAPÍTULO 4.....	44
4.	CASOS DE ESTUDIO44
4.1.	Primer Caso.....44
4.1.1.	Topología inicial para el caso 146
4.1.2.	Optimización de la RNA para el caso 148
4.1.5.	Análisis económico para el caso 151
4.2.	Segundo Caso.....53
4.2.1.	Topología inicial para el caso 256
4.2.2.	Optimización de la RNA para el caso 2.....58
4.2.3.	Análisis económico para el caso 261
4.3.	Tercer Caso63
4.3.1.	Topología inicial para el caso.66
4.3.2.	Optimización de la RNA para el caso 3.....69
4.3.3.	Análisis económico para el caso 374
4.3.4.	Optimización método ACO para el caso 375
CAPÍTULO 5.....	79
5.	ANÁLISIS DE RESULTADOS79
5.1.	Análisis de resultados en cambios de topología para los casos de estudio con la RNA.....79
5.1.1.	Análisis del cambio de topología para el sistema del caso 179
5.1.2.	Análisis del cambio de topología para el sistema del caso 279
5.1.3.	Análisis del cambio de topología para el sistema del caso 380
5.2.	Análisis de resultados en cambios de topología para el caso 3 de estudio entre la RNA y ACO.....81
5.3.	Análisis Económico para los casos de estudio.....82
CAPÍTULO 6.....	84
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES84
6.1.	Conclusiones84
6.2.	Recomendaciones85

	xii
Lista de Referencias	87
ANEXOS	90

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Expresiones para el cálculo de las caídas de voltaje en V, en los diferentes tipos de ramales.	28
Tabla 2. Expresiones para calcular las caídas de voltaje en %, en los diferentes tipos de ramales.	29
Tabla 3. Expresiones para el cálculo de “M” en los diferentes tipos de alimentadores y ramales.	29
Tabla 4. Expresiones para calcular las pérdidas de potencia activa en los diferentes tipos de ramales.	30
Tabla 5. Data inicial de los posibles caminos del sistema analizado.....	45
Tabla 6. Flujo de potencia actual en el sistema analizado	47
Tabla 7. Totales del sistema actual analizado	47
Tabla 8. Respuesta de optimización de la RNA entrenada para el sistema analizado.....	48
Tabla 9. Error porcentual de la predicción de la RNA entrenada para el sistema analizado...	49
Tabla 10. Flujo de potencia resultante de la RNA entrenada para el sistema analizado	50
Tabla 11. Totales del flujo de potencia resultante de la RNA entrenada para el sistema analizado	51
Tabla 12. Parámetros para el análisis económico	51
Tabla 13. Análisis económico entre la topología existente y la proyectada por la RNA entrenada para el sistema analizado	52
Tabla 14. Data inicial de los posibles caminos del sistema analizado.....	54
Tabla 15. Flujo de potencia actual en el sistema analizado	56
Tabla 16. Totales del sistema actual analizado	57
Tabla 17. Respuesta de optimización de la RNA entrenada para el sistema analizado.....	58
Tabla 18. Flujo de potencia resultante de la RNA entrenada para el sistema analizado	60
Tabla 19. Totales del flujo de potencia resultante de la RNA entrenada para el sistema analizado	61
Tabla 20. Análisis económico entre la topología existente y la proyectada por la RNA entrenada para el sistema analizado	61
Tabla 21. Data inicial de los posibles caminos del sistema analizado.....	64
Tabla 22. Flujo de potencia actual en el sistema analizado.	67
Tabla 23. Totales del sistema actual analizado	69
Tabla 24. Respuesta de optimización de la RNA entrenada para el sistema analizado.....	69
Tabla 25. Flujo de potencia resultante de la RNA entrenada para el sistema analizado	72
Tabla 26. Totales del flujo de potencia resultante de la RNA entrenada para el sistema analizado	74
Tabla 27. Análisis económico entre la topología existente y la proyectada por la RNA entrenada para el sistema analizado	74
Tabla 28. Flujo de potencia resultante mediante el método ACO para el sistema analizado ..	75
Tabla 29. Totales del flujo de potencia resultante mediante el método ACO para el sistema analizado	77
Tabla 30. Análisis económico entre la topología existente y la proyectada por el método ACO para el sistema analizado	78
Tabla 31. Comparación de caídas de voltaje porcentual en función de los cambios de topología por la RNA para el sistema analizado.....	79
Tabla 32. Comparación de caídas de voltaje porcentual en función de los cambios de topología por la RNA para el sistema analizado.....	80

Tabla 33. Comparación de caídas de voltaje porcentual en función de los cambios de topología por la RNA para el sistema analizado.....	81
Tabla 34. Comparación de caídas de voltaje porcentual en función de los cambios de topología entre la RNA y el método ACO para el sistema actual analizado	82
Tabla 35. RBC al aplicar la RNA entrenada en los casos de estudio	83
Tabla 36. Comparación del RBC para el caso 3 entre la RNA y el ACO	83
Tabla 37. RBC en los nodos de recepción para el sistema del caso 3 analizado	83

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelamiento de una neurona.	5
Figura 2. Función de activación Escalón	7
Figura 3. Función de activación Lineal.....	7
Figura 4. Función de activación Sigmoidal	8
Figura 5. Método de Carson conductores reflejados	23
Figura 6. Estructuras para bajo voltaje utilizados en el país [CATALOGO DIGITAL]	24
Figura 7. Modelo de impedancia para un ramal trifásico de 3 o 4 hilos.....	25
Figura 8. Modelo de un ramal monofásico de una red de distribución conectada en Δ	27
Figura 9. Etapas para el desarrollo del proyecto de investigación.....	35
Figura 10. Topología real para pruebas	37
Figura 11. Topología optimizada y camino de feromonas entre nodos.....	38
Figura 12. Flujo de potencia programado en MATLAB	39
Figura 13. Estructura RNA	40
Figura 14. RNA al iniciar al entrenamiento (Error).....	42
Figura 15. RNA al iniciar del entrenamiento (Gráfica)	42
Figura 16. RNA al finalizar el entrenamiento (Error).....	43
Figura 17. RNA al finalizar el entrenamiento (Gráfica)	43
Figura 18. Zona de estudio propuesta	44
Figura 19. Grafo del sistema analizado con todos los posibles caminos	44
Figura 20. Grafo actual del sistema analizado	46
Figura 21. Grafo resultante de la RNA entrenada para el sistema analizado	50
Figura 22. Grafo del sistema analizado con todos los posibles caminos	53
Figura 23. Grafo del sistema analizado con todos los posibles caminos Fuente: Autores	53
Figura 24. Grafo actual del sistema analizado	56
Figura 25. Grafo resultante de la RNA entrenada para el sistema analizado	59
Figura 26. Zona de estudio propuesta	63
Figura 27. Grafo del sistema analizado con todos los posibles caminos	63
Figura 28. Grafo actual del sistema analizado	66
Figura 29. Grafo resultante de la RNA para el sistema analizado	71
Figura 30. Optimización mediante el método ACO para el sistema analizado	75
Figura 31. Resultado para el caso 1	100
Figura 32. Resultado para el caso 2	101
Figura 33. Resultado para el caso 3	102

GLOSARIO

ACO: Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas

RNA: Red Neuronal Artificial

BV: Bajo Voltaje

E/S: Entradas y Salidas

FP: Factor de Potencia

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers

MV: Medio Voltaje

RBC: Razón Beneficio/Costo

SEP: Sistema Eléctrico de Potencia

S/E: Subestación Eléctrica

VAN: Valor Actual Neto

VAC: Valor Actual de los Costos de Inversión

VSLI: Alta Escala de Integración

Ni: Nodo de Envío

Nj: Nodo de Recepción

Target: Patrón del comportamiento esperado

EERCS: Empresa Eléctrica Regional Centro Sur

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCION

1.1. Problema de Estudio

Todo sistema eléctrico de potencia ya sea de bajo, medio o alto voltaje está sujeto a variaciones propias del sistema como caídas de voltaje y pérdidas técnicas de transporte de energía, debidas a su topología. Por lo expuesto es necesario minimizarlas, lo cual implica un ahorro de dinero tanto para el consumidor como para la empresa distribuidora.

1.2. Justificación

Sabiendo que el sistema de distribución en bajo voltaje es dinámico, es decir, muta con gran facilidad debido al incremento o decremento de la carga, se busca obtener un pronóstico de su comportamiento basado en los cambios de topología debido a patrones mínimos del flujo de potencia.

Por lo expuesto la optimización de la topología del sistema de bajo voltaje es una parte primordial para cumplir con los estándares de caídas de voltaje establecidas por la empresa distribuidora. La utilización de una RNA puede hacer posible lo mencionado, por lo cual se busca demostrar la factibilidad de esta.

La RNA trabaja en base a distintos escenarios optimizados para sectores residenciales urbanos de la ciudad. Esta misma puede ser capaz de predecir modificaciones en la topología con el fin de que el método de optimización pueda ser implementado en otro sector.

1.3. Alcance

El desarrollo de este proyecto de investigación busca comprobar la factibilidad de la implementación de una RNA como un método de optimización para un sistema eléctrico de distribución de bajo voltaje.

El diseño de este proyecto comprende la implementación de una RNA en el software MATLAB, mediante su complemento “nntools”, basado en el método ACO considerando el parámetro de caída de voltaje permitida por la empresa distribuidora.

La base de datos para el entrenamiento de la RNA se obtiene de la inclusión de varios escenarios propuestos para el sector de estudio. Estos escenarios tienen sus respectivas soluciones mediante flujo de potencia las cuales brindan las funciones objetivo de la RNA.

1.4. Grupo Objetivo

El estudio busca que las empresas distribuidoras de energía optimicen sus sistemas de distribución de bajo voltaje.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Diseñar una RNA para un sector específico de la ciudad de Cuenca, que se debe adaptar a una red de distribución de bajo voltaje, optimizando la topología existente y minimizando las pérdidas propias del flujo de potencia como caídas de voltaje y pérdidas técnicas por transporte de energía.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Conocer las características, aplicaciones, procesos, tipo de aprendizaje, ventajas y desventajas de una RNA.
- Implementar una RNA en el software MATLAB.
- Minimizar las pérdidas técnicas por transporte de energía en base al comportamiento de patrones propios del flujo de potencia.
- Instaurar la nueva topología en base a los resultados obtenidos del aprendizaje de la RNA propuesta.
- Realizar un análisis económico entre la topología existente del sistema y la topología obtenida por la RNA.

CAPÍTULO 2

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Red Neuronal

Una RNA es una unidad de procesamiento de información, basada en modelos matemáticos para emular la estructura cerebral del ser humano, la cual por su alta capacidad es usada para establecer relaciones de pronósticos y la evaluación, además de relaciones complejas y no lineales. Los primeros estudios realizados fueron en el año de 1943 por Warren McCulloch y Walter Pitts, hoy en día han sido empleadas ampliamente en el sector eléctrico. Entre sus principales ventajas: rápido tiempo de implementación, capacidad para generar modelos donde las E/S no se entienden, análisis de datos parsimoniosos, adaptabilidad, tolerancia a fallos, posibilidad de implementación de la tecnología VSLI (Very Large Scale Integration). [1]–[7]

Una RNA compara un valor umbral con la entrada del resultado calculado obtenido al multiplicar ponderosamente por cada uno de los pesos respectivamente, además de adicionar sus sesgos [2]. Está compuesta de varias neuronas conectadas, agrupadas en diferentes capas, las cuales colaboran entre sí para producir un estímulo de salida, por tanto, se encuentran definidas a la entrada como a la salida por el número de variables. [1], [3], [8]

Una RNA está definida por 3 factores:

- 1) Función de transferencia.
- 2) Arquitectura de la red.
- 3) Ley de aprendizaje.

Las cuales se definen en función del problema al que se va a dar solución [3]. La arquitectura de la red hace referencia a la forma en la que se unen los diferentes elementos (neuronas), mediante una serie de conexiones (pesos sinápticos) [5], se caracteriza por el hecho que sus neuronas se agrupan en capas por niveles.

2.1.1. Elementos básicos de una RNA.

Hay 3 tipos de elementos fundamentales: [1], [4]

- La capa de entrada.
- Las capas ocultas.
- La capa de salida

La capa de entrada se encarga únicamente de recibir las señales o datos desde el exterior, pasando estas mismas a las neuronas de la siguiente capa. Las capas ocultas no se conectan al exterior sino entre las capas de entrada y salida, en esta las neuronas realizan el procesamiento no lineal de las señales recibidas. La capa de salida proporciona los resultados de la red al exterior [1], [4]. Por lo general las interconexiones van dirigidas hacia adelante donde las neuronas de una capa se conectan con las neuronas de la otra capa y reciben el nombre de redes alimentadas hacia adelante o redes feed-forward. [4]

Se debe comenzar con una capa oculta e ir incrementándola en caso de que el rendimiento no sea eficiente. El aumentar el número de capas brindan un mayor potencial a la red, pero a su vez necesita de mayor cálculo y puede producir un ajuste excesivo, el cual puede mejorar la precisión, pero con respecto a los datos de evaluación puede generar grandes errores. El número óptimo de neuronas se elige en el proceso de entrenamiento de la red. [1], [3]

En la figura 1 se presenta el modelamiento de una neurona biológica la cual se compone de una entrada p , un valor de peso w , un bias b (permite que la neurona mueva su frontera de decisión), una función de suma Σ , una función de activación f y una salida a . [9]

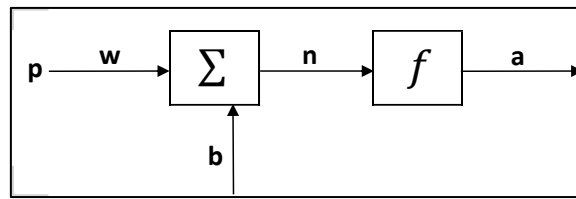


Figura 1. Modelamiento de una neurona.

Fuente: [9]

$$a = f(wp + b) \quad (1)$$

Dónde:

- *a: Salida*
- *f: Función de Activación*
- *w: Valor de Peso*
- *p: Entrada*
- *b: Bias*
- *n: Valor resultante*

2.1.2. Características Generales de una RNA.

2.1.2.1. Topología de las RNA.

Las RNA se clasifican según su número de capas, según su tipo de conexión entre neuronas o arquitectura (feed-forward y feed-back) y según su proceso de aprendizaje. [1]

Entre ellas [10]:

- *Redes Mono Capa:* Establecen conexiones entre las neuronas que pertenecen a la única capa de la red, son utilizadas en tareas relacionadas con la auto asociación (regenerar información de entrada que llega a la red de forma incompleta o dañada).
- *Redes Multicapa:* Disponen de un conjunto de neuronas agrupadas en diferentes niveles o capas. Para distinguir la capa a la que pertenece la

neurona, se observa el origen de las señales que recibe a la entrada y el destino de la señal a la salida. [10]

2.1.2.2. Mecanismos de aprendizaje

Existen dos tipos de mecanismos de aprendizaje el supervisado y el no supervisado.[10]

Redes con aprendizaje supervisado: Su proceso de aprendizaje se ejecuta mediante un entrenamiento controlado por un agente externo, el cual determina la respuesta que debe generar la red dada una entrada determinada, caso contrario el supervisor del entrenamiento puede modificar los pesos de las conexiones. [10]

- *Aprendizaje por corrección de error:* Ajusta los pesos entre las conexiones en función del error que existe entre el valor deseado y el obtenido en la salida. [10]
- *Aprendizaje por refuerzo:* Es más lento, el supervisor indica mediante una señal de refuerzo si la salida obtenida se ajusta a la deseada (éxito= +1 o fracaso= -1), en función de ello se ajustan los pesos mediante un mecanismo de probabilidades. [10]
- *Aprendizaje estocástico:* Realiza cambios aleatorios en los pesos y evalúa su efecto teniendo en cuenta el objetivo deseado. [10]

Redes con aprendizaje no supervisado: No requieren ningún tipo de influencia externa para ajustar los pesos en las conexiones de las neuronas. Estas redes encuentran características, regularidades, correlaciones o categorías que se pueden presentar en los datos de entrada. [10]

- *Aprendizaje hebbiano:* Extrae características o familiaridades de los datos de entrada. Ajusta los pesos en base a la correlación de los valores de activación de las dos neuronas conectadas. [10]
- *Aprendizaje competitivo o cooperativo:* Se basa en la competición entre neuronas para llevar a cabo una tarea dada, en otras palabras, las neuronas

compiten para activarse, quedando las perdedoras a sus valores de respuesta mínimos. [10]

2.1.3. Función de Activación.

2.1.3.1. Función Escalón.

Se asocia con neuronas binarias en las cuales, si la suma de las entradas es mayor o igual al umbral de la neurona, la activación es 1; caso contrario la activación es 0 o -1. [10]

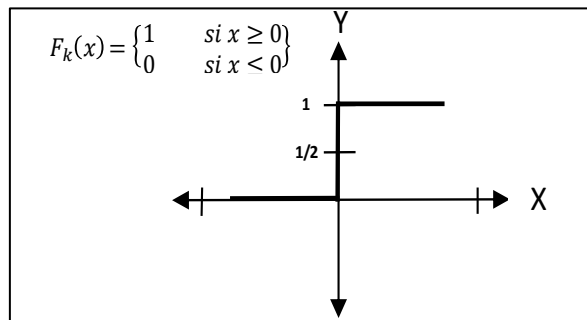


Figura 2. Función de activación Escalón

Fuente:[10]

2.1.3.2. Función Lineal

Es la más sencilla, llamada también función de identidad ya que responde a la expresión $F_k(u) = u$. [10]

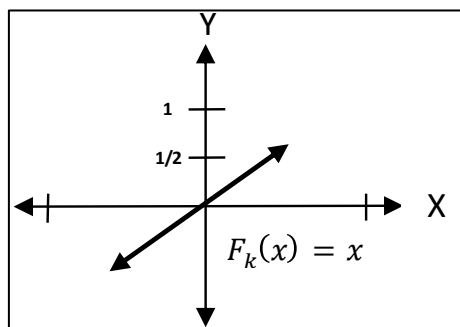


Figura 3. Función de activación Lineal

Fuente:[10]

2.1.3.3. Función Sigmoidal

El valor dado por la función es cercano a uno de los valores asintóticos, lo cual genera que la salida este en la zona alta o baja de la sigmoide. La importancia de esta función radica en que su derivada siempre es positiva y cercana a 0 para valores grandes ya sean positivos o negativos. [10]

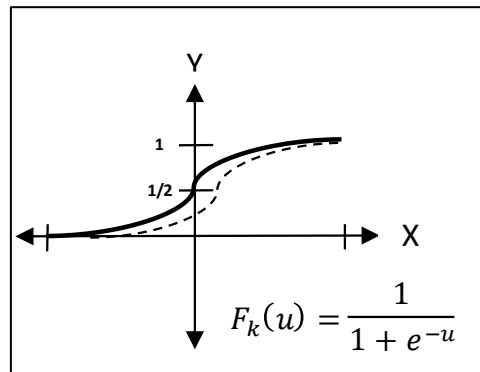


Figura 4. Función de activación Sigmoidal

Fuente:[10]

2.1.4. Recomendaciones para la inicialización de la arquitectura de una RNA

Actualmente no existe un procedimiento sencillo ni general para determinar el tamaño óptimo de una RNA, sin embargo, cabe recalcar que existen algunas reglas o procedimientos que suelen utilizarse como base para la construcción inicial de una RNA. [11]

Para determinar el número de neuronas que se encuentran en cada una de las capas ocultas, suele utilizarse las reglas ad-hoc, como también los procedimientos de poda. Los cuales han demostrado un comportamiento aceptable en diversas aplicaciones. [11]

2.1.4.1. Reglas ad-hoc

Entre las reglas más conocidas:

- *Regla de la pirámide geométrica:* La cantidad de neuronas en la capa oculta debe ser inferior al total de las variables de entrada, pero a su vez

debe ser superior a las variables de salida. Para una red con una capa oculta, el total de neuronas debe ser cercano a $\sqrt{n * m}$ donde n= número de variables de entrada y m= número de neuronas de salida. [11]

- *Regla de la capa oculta – capa entrada:* La cantidad de neuronas está relacionado con el número de neuronas de entrada. Suele aplicarse la regla del 2x1, es decir el número de neuronas ocultas no debe ser superior al doble del número de variables de entrada. [11]
- *Regla de la capa oculta – número de patrones:* Relaciona el número de neuronas en la capa oculta con el total de patrones presentes, por lo general se tiene una relación 1/30 (1 neurona cada 30 patrones). [11]

2.1.4.2. Procedimientos de poda

- Partir de una red neuronal de gran tamaño, eliminar neuronas y conexiones, hasta conseguir un tamaño adecuado y satisfactorio. [11]
- Partir de una red neuronal muy pequeña e ir incrementando su tamaño añadiendo neuronas, conexiones o capas hasta conseguir un tamaño adecuado y satisfactorio. [11]
- Partir de una red de tamaño suficiente, eliminar las conexiones y neuronas que se consideren poco relevantes de ser el caso. Luego añadir nuevas neuronas y volver a entrenar la red, lo cual se realiza hasta conseguir un tamaño adecuado y satisfactorio. [11]

2.1.5. Red Neuronal Back-Propagation.

Las RNA utilizadas serán de tipo Back-Propagation, son un tipo de red de aprendizaje supervisado, emplea un ciclo de propagación – adaptación de 2 fases [12]. Este tipo de neuronas reducen el valor del error al ajustar los pesos y sesgos en función de la salida y el objeto deseado. [1] [13]

Este algoritmo de aprendizaje consiste en retro propagar la señal desde la capa de salida hasta la capa de entrada, optimizando o modificando los valores de los pesos mediante

un proceso basado en la minimización de la función de coste. Para así lograr que la red converja hacia un estado que permita clasificar exitosamente todos los patrones de entrenamiento. [14], [15]

Para aplicar este método se necesita saber los valores de salida deseados y compararlos con los valores obtenidos por la RNA. [16]

El cambio de los pesos en las conexiones de las neuronas, no solo influyen en la entrada global, sino también en la activación y por ende en la salida de una neurona. Entonces es de gran utilidad considerar estas variaciones de la función de activación al modificarse el valor de los pesos.[10]

En función de los pesos almacenados en memoria, la RNA dará una salida: [12]

$$N = F2\{[W2] * F1([W1] * [M] + [B1]) + [B2]\} \quad (2)$$

Dónde:

- F1: Función de transferencia entre la capa de entrada y la capa oculta
- F2: Función de transferencia entre la capa de oculta y la capa de salida
- W1: Matriz de pesos de la capa oculta
- W2: Matriz de pesos de la capa de salida
- B1: Matriz de pesos de tendencia de la capa oculta (bias)
- B2: Matriz de pesos de tendencia de la capa de salida (bias)
- M: Entrada a la red
- N: Salida de la red

La ventaja más importante de este tipo de redes es que aprovecha el paralelismo de las redes neuronales para reducir el tiempo para encontrar similitud entre patrones dados. [17]

El algoritmo se divide en dos fases:

- *Propagación hacia adelante:* Las señales se propagan desde la capa de entrada hacia la capa de salida, obteniendo una salida y el error generado por dicha red. [14]
- *Propagación hacia atrás:* Según los errores cometidos en la capa de salida, se encarga de corregir el valor de los pesos entre las conexiones de las neuronas, desde la capa de salida hasta la capa de entrada a través de las capas ocultas. [14]

Para las RNA tipo Back-Propagation se debe tener en cuenta:

1. Presentar muestra de entrenamiento y su forma de propagación a través de RNA para obtener buenos resultados[18].
2. Usar coeficientes de peso y sesgo para crear la función neuronal adecuada.[18]
3. Calcular la entrada j_{th} en el nodo de la capa oculta.[18]

$$V_j = \sum W_{ij}X_i + b_j \quad (3)$$

Donde:

- b_j : Sesgo de entrada eal nodo j_{th} de la capa oculta
- W_{ij} : Peso de entrada variabe i_{th} al nodo j_{th} de la capa oculta
- V_j : Entrada al nodo j_{th} en la capa oculta
- X_i : Variable de entrada i_{th}

4. Calcular la salida del nodo j_{th} [18].

$$Z_j = f\left(\frac{1}{1 + \exp(-V_j)}\right) \quad (4)$$

Donde:

- Z_j : Salida del nodo j
- $f_{(x)}$: Función del sesgo

5. Calcular salida de la capa de salida [18].

$$h_k = \sum_{j=1}^m W_{jk} Z_j + b_k \quad (5)$$

$$Y_k = \left(\frac{1}{1 + \exp(-h_k)} \right) \quad (6)$$

Donde:

- h_k : Entrada en la capa de salida
- W_{jk} : Peso del nodo j en la capa oculta al nodo de la capa de salida
- b_k : Sesgo capa oculta al nodo k_{th} en la capa de salida
- Y_k : Salida Predicción RNA

6. Error de la salida[18].

$$\delta_k = -(d_k - Y_k) f'_k \quad (7)$$

$$f'_k = Y_k(1 - Y_k) \quad (8)$$

Donde:

- δ_k : Valor entre la predicción y el valor deseado
- d_k : valor deseado

7. Ajustar el coeficiente de ponderación y sesgos para errores mínimos δ_k . [18]

2.1.6. Aplicaciones

Las RNA son ampliamente utilizadas para resolver diversos problemas, que se dificulta a una persona o para algoritmos computacionales [14]. Su campo de aplicación:

- Procesamiento de imagen
- Procesamiento de voz
- Robótica
- Predicción de series de tiempo

- Procesamiento de señales
- Procesamiento automático
- Automotriz
- Aeroespacial
- Financiero
- Seguridad
- Defensa
- Medio ambiente
- Militares

Dentro del ámbito eléctrico tenemos aplicaciones como [4], [8], [19]:

- Predicción de la producción de energía eléctrica renovable.
- Predicción de la ubicación óptima de transformadores.
- Determinar el tiempo de fallas en un sistema de distribución
- Determinar zonas de fallas en circuitos de distribución.
- Pronóstico de la demanda.
- Predicción del consumo de energía eléctrica.
- Pronóstico de pérdidas en circuitos de distribución.
- Predicción de flujo de carga en subestaciones eléctricas.
- Protección diferencial de generadores asíncronos.

2.2. Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP)

Según la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), es una red o topología formada por generadores, líneas de transmisión y subtransmisión de potencia, incluyendo equipos asociados (transformadores, seccionadores, equipos de protección), como también las cargas asociadas por los consumidores. [20]

2.2.1. Aspectos de los Sistemas de Potencia

- Redes de subtransmisión tienen voltajes nominales entre 12.47kV-245KV. Que entregan la energía a la S/E de Distribución. En Ecuador está regulado a 69kV[20].
- La S/E de distribución, transforman la energía aun voltaje más bajo ya sea 13.8kV o 22kV para la distribución local. [20]
- Los alimentadores primarios trabajan a un rango de 4.16kV-34.5kV. Dependiendo de las regiones del Ecuador este voltaje puede ser comúnmente 22KV y 13.8kV. [20]
- Los transformadores de distribución tienen capacidades de 10-2500 kVA. [20]
- Red de distribución secundaria, conduce la energía desde el transformador de distribución a lo largo de la calle o del lindero posterior del predio del usuario. [20]
- Se puede entender por “SEP”, un sistema que constituye una red eléctrica, teniendo como función principal la generación, transmisión, distribución de energía eléctrica hacia los usuarios, cumpliendo condiciones y requerimientos de calidad, confiabilidad, seguridad y eficiencia. [20]

2.2.2. Flujos de Potencia

El análisis de flujos de potencia se lo realiza para determinar la situación actual de una red eléctrica, su comportamiento y posibles errores que se detecten según el sistema de análisis de datos que este SEP posea. [21]

El estudio de flujos de potencia es de uso frecuente en las empresas distribuidoras de Electricidad y es un requerimiento para la planificación de un país, económica y socialmente [5].

El flujo de potencia permite obtener los módulos y ángulos de fase de las tensiones de todos los nodos del sistema eléctrico de potencia, siempre que las potencias en cada nodo sean conocidas.

Basados en la formulación general de los flujos de potencia.

$$\overline{S}_k = \overline{V}_k \overline{I}_k = P_k - jQ_k = \overline{V}_k \sum_{m=1}^n \overline{Y}_{km} \cdot \overline{V}_m = P_{Gk} - P_{Dk} - j(Q_{Gk} - Q_{Dk}) \quad (9)$$

Donde

- $k = 1, \dots, n$; $2n$ ecuaciones no lineales
- $\overline{V}_m = \overline{V}_m \angle \delta_m$; $2n$ incógnitas
- $Y_{km} = G_{km} + jB_{km}$

Las variables identificadas como V, δ, P, Q , que corresponden al voltaje, ángulo de fase, potencia activa y potencia reactiva dependiendo del tipo de barra, posee valores constantes o se vuelven incógnitas.

- *Barra de carga*: También se la llama Barra PQ, Son aquellas barras donde se conocen las potencias tanto activa como reactiva y el resto de las variables quedan como incógnitas.
- *Barra de voltaje controlada*: Se la conoce también con el nombre de Barra PV, en esta se conocen los valores de voltaje y potencia activa de la barra.
- *Barra de referencia*: Conocida también como barra Slack, o barra Base, En este tipo de barra se conoce el voltaje y el ángulo de fase.
- *Barra de voltaje controlada de un transformador con taps variables*: En este tipo de barra se conocen los datos de voltaje, potencia activa y reactiva quedando como incógnita el ángulo de fase.

Las potencias activas y reactivas se encuentran dadas por las siguientes ecuaciones según la barra k en al que se trabaje

$$P_k = \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \cos \delta_{km} + B_{km} \sin \delta_{km}) \quad (10)$$

$$Q_k = \sum_{m=1}^n V_m (G_{km} \text{sen} \delta_{km} - B_{km} \text{cos} \delta_{km}) \quad (11)$$

La expansión en serie de Taylor con respecto a la barra ha permitido llegar a la linealización del flujo de potencia representado por la ecuación matricial.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix}$$

2.2.3. Ubicación y conformación de un sistema de distribución

Gran parte del presupuesto total del SEP está destinado al sistema de distribución. Ahí se encuentran las pérdidas técnicas por transporte de energía debida a la inexactitud en la modelación del sistema de distribución, se debe entender que el mismo posee una gran cantidad de elementos y dispositivos que lo conforman. [20]

La distribución de energía eléctrica es una actividad cuyas técnicas están en un proceso continuo de evolución: [20]

- Crecimiento de la carga.
- Estandarización de materiales, estructuras y montajes.
- Herramientas y equipos correctos.
- Metodología de trabajo adecuada y regulada.
- Plan de prevención de accidentes y mantenimiento.
- Grandes volúmenes de datos y planos.

2.2.4. Estudio de cargas.

Se comprueba el voltaje, la corriente, potencia activa y reactiva, factor de potencia y otros parámetros propios del sistema, en condiciones de operación. Con los datos se analizan condiciones y proyecciones de la red, lo que permite un estudio adecuado que dependerá de los resultados de las diferentes maniobras que puedan realizar el circuito: interconexión con otras redes, incremento de carga, modificaciones por topología alimentadores primarios o secundarios. [20]

2.2.5. Tipos de Cargas.

Se basa en tipos de servicios en los que se emplea la energía eléctrica, por ello dependen del tipo de consumidor y sus necesidades, además de tomarse en cuenta factores que modifican el sistema, como la densidad de carga y diversidad de consumidores por unidad de área. [20]

Su clasificación [20]:

- Residencial
 - Urbana
 - Suburbana
 - Rural
- Comercial
 - Áreas Céntricas
 - Centros Comerciales
 - Edificios Comerciales
- Industrial
 - Plantas Pequeñas
 - Plantas Grandes

2.3. Planificación del Sistema de Distribución

Los estudios de planificación son primordiales dentro de los objetivos de toda empresa distribuidora, ya que aseguran que la demanda sea cubierta de la manera más adecuada, cumpliendo requerimientos técnicos y económicos, aunque en el futuro se incremente. [22]

Resulta de vital importancia el análisis de pérdidas técnicas de potencia de energía, debido al gran número de elementos y el nivel de voltaje que se aplica. Por ello se debe identificar los puntos críticos y alternativas de continuidad de servicio con seguridad y calidad a pesar de que se presenten condiciones anormales, es aquí donde la optimización toma un papel muy importante pues comprende aspectos como: reducción de las pérdidas por transporte de energía, mejoramiento del perfil de voltaje, balance de cargas. [22]

2.4. Reconfiguración de los Sistemas de Distribución

Años atrás los sistemas de distribución presentaban diseños de topologías rígidas con limitadas posibilidades de cambio de configuración, sin embargo, debido a las mejoras en los dispositivos eléctricos han posibilitado hoy en día incluir un diseño más flexible y dinámico logrando su reconfiguración para modificar la topología, con el fin de mejorar la confiabilidad. [22]

Sin embargo, para obtener las mejores prestaciones que dichos dispositivos eléctricos nos brindan, es fundamental definir una topología óptima de la red, para que así el sistema presente la mejor solución posible. [22]

- 1) *Reconfiguración de un alimentador para mejorar el funcionamiento del sistema:* basado en la reducción de pérdidas técnicas por transporte de energía, con la finalidad que su operación sea llevada a un costo mínimo, cumpliendo con una serie de restricciones como el abastecimiento de carga, caídas de voltaje dentro de los límites permisibles, coordinación de los dispositivos de protección, manteniendo la configuración radial en la red.

Lo cual consiste en modificar la topología mediante el cierre de un interruptor de enlace y la apertura de un conmutador del alimentador para mantener el sentido radial de la red. [22]

- 2) *Reconfiguración de un alimentador restauración del servicio ante fallas:* se lleva a cabo mediante la operación de interruptores de seccionamiento y enlace, los cuales permiten restablecer el suministro de energía a la mayor cantidad de usuarios posibles y transferir las cargas no afectadas del alimentador afectado, hacia alimentadores adyacentes. Se debe tener en cuenta que esta reconfiguración se encuentra limitada por la capacidad de carga que pueda ser transferida y abastecida por el alimentador cercano de una manera segura. [22]

2.5. Fundamentos de análisis del Sistema de Distribución

El análisis en un sistema de distribución es fundamental, ya que está centrado en el análisis de operación de los alimentadores primarios bajo condiciones normales y ante fallas (cortocircuitos), mediante la ejecución de flujos de potencia, estos no deben limitarse únicamente a pérdidas técnicas por transporte de energía, ni regulación de voltaje, sino también a la reconfiguración por topología para la transferencia de carga cumpliendo con parámetros como caídas de voltaje en MV y BV. Para ello, se debe considerar [22]:

- Condiciones normales de operación.
- Cambio en el calibre del conductor y longitud de tramos.
- Reducción de pérdidas de potencia y energía.
- Mejora de perfiles de voltaje.
- Balance de cargas.
- Corrección del factor de potencia.
- Posibilidades de reconfiguración entre alimentadores.
- Ajuste y coordinación de protecciones.
- Crecimiento de cargas futuras.

2.6. Flujo de carga en alimentadores de distribución

Los flujos de carga en un alimentador que pertenece a un sistema de distribución son similares a los que se realizan en sistemas de transmisión, en donde se utiliza el método de componentes simétricos o se puede realizar por el modelo por fase. [23]

Para realizar el análisis de flujo de potencia se debe contar con una data inicial, la cual contiene: las cargas (P y Q), factor de potencia en cabecera y el modelo de carga. Lo que permite obtener una distribución de carga en kW y kVAR de cada nodo, voltajes en todos los nodos del alimentador, flujo de carga en kW, kVAR y kVA, factor de potencia (FP), caídas de voltaje y pérdidas de potencia totales como parciales por cada vano entre otras. [23]

2.6.1. Método de Ardvison para la resolución de flujos de carga.

Su metodología se basa en la demanda [kVA] que abastece al alimentador de distribución, el cálculo se realiza mediante varias iteraciones tramo a tramo. El modelo aplicado asume: [23]

- Factor de potencia uniforme a lo largo del alimentador de distribución.
- Factor de capacidad de los transformadores de distribución uniforme.
- Cargas balanceadas en el circuito.
- Variación de la demanda similar en los nodos y en la S/E.

El modelo para realizar este método utiliza:

$$C = \Delta P * [C_p \tau_e + k_{asep}] \quad (12)$$

$$\Delta P = k_{cir} * \left[\frac{(S_{ij})^2}{U^2} (R_{ij} L_{ij} * 10^{-3}) \right] \quad (13)$$

$$C = \sum_{k=1}^n \left[\frac{(S_{ij})^2}{U^2} (R_{ij} L_{ij} * 10^{-3}) \right] * [C_p \tau_e + k_{sep}] \quad (14)$$

Dónde:

- ΔP : Pérdidas de potencia activa. [kW]
- S_{ij} : Demanda en el nodo. [kVA]
- C : Costo de pérdidas.
- C_p : Costo de la energía.
- τ_e : Horas de operación anual. $\left[\frac{8760h}{\text{año}} \right]$
- k_{asep} : Costo de inversión amortizados.
- U : Voltaje nominal del sistema. [kV]
- k_{cir} : Coeficiente de ajuste que equivale a 1 para sistemas trifásicos en Delta o Estrella y equivale a $\sqrt{3}$ para sistemas monofásicos.
- R_{ij} : Parte real de la impedancia del conductor. [Ω]
- L_j : Longitud tomada desde el nodo 0 hasta el nodo j. [km]
- k : Indicador de la iteración actual.

Como cálculo previo. [23]

- Matriz de incidencia: En la que se indican los nodos que se relacionan entre si con "1" caso contrario "0".
- Impedancia de secuencia positiva: Se obtiene a partir de la matriz de secuencia de impedancias del modelo de conductores que conforma el sistema radial.

A partir de los resultados de la realización de la primera iteración, se realizan n iteraciones hasta que el resultado del error sea igual a 0 o menor. Por know how el número mínimo de iteraciones para obtener un alto rendimiento y errores mínimos considerados es 19. [23]

2.6.2. Modelo matemático para sistemas de distribución

2.6.2.1. Ecuaciones de Carson.

Parte importante de los sistemas eléctricos de potencia son las impedancias de los conductores aéreos en condiciones de falla lo que implican todos los caminos de retorno a tierra. [24], [25]

$$Z_{ii} = R_i + 4\omega P_{ii}G + j \left[X_i + 2\omega G I_n \frac{S_{ii}}{RD_i} + 4\omega Q_{ii}G \right] \Omega/\text{milla} \quad (15)$$

$$Z_{ij} = 4\omega P_{ij}G + j \left[2\omega G I_n \frac{S_{ij}}{D_{ij}} + 4\omega Q_{ij}G \right] \Omega/\text{milla} \quad (16)$$

Donde:

- Z_{ii} = es la impedancia propia del conductor i con retorno de tierra (Ω/milla).
- Z_{ij} = es la impedancia mutua entre los conductores i y j (Ω/milla).
- R_i = es la impedancia mutua entre los conductores i y j (Ω/milla).
- S_{ii} = distancia del conductor i a su imagen del conductor j en (ft).
- S_{ij} = distancia del conductor i a la imagen del conductor j pies (ft).
- D_{ij} = distancia entre el conductor i y j (ft).
- RD_i = es el radio del conductor i (ft).
- $\omega = 2\pi f$ = frecuencia angular del sistema (rad/s).
- f = frecuencia del sistema (Hz).
- $G = 0.1609347 * 10^{-3}$ (Ω/milla).

Los términos P y Q representan los términos de unas series infinitas procedentes de la resolución de una ecuación diferencial [24], [25].

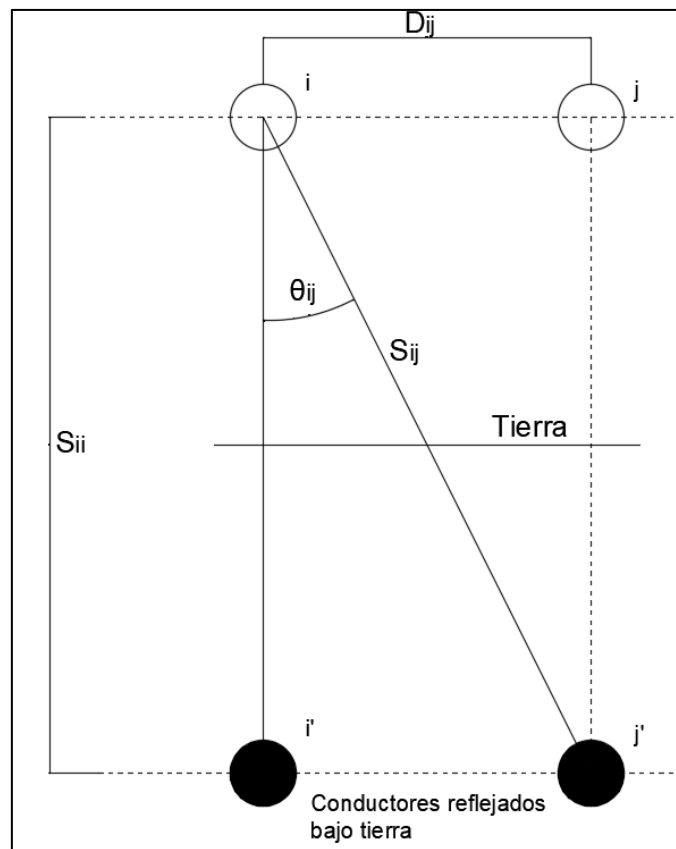


Figura 5. Método de Carson conductores reflejados

Fuente:[24], [25]

2.6.2.2. Modificación de las ecuaciones de Carson.

Las ecuaciones modificadas de Carson se obtienen mediante aproximaciones, teniendo en cuenta que la frecuencia de la red es 60 Hz y resistividad de la tierra es 100 Ωm [24], [25].

$$Z_{ii} = R_i + 0.09530 + j \left[0.12134 \left(\ln \left(\frac{1}{RMG_i} + 7,93402 \right) \right) \right] \Omega/milla \quad (17)$$

$$Z_{ij} = 0.09530 + j \left[0.12134 \left(\ln \left(\frac{1}{D_{ij}} + 7,93402 \right) \right) \right] \Omega/milla \quad (18)$$

2.6.2.3. Estructuras de redes aéreas en bajo voltaje.

El Ministerio de Energía y Recursos Naturales no Renovables en su página web posee las especificaciones técnicas de las estructuras utilizadas en los sistemas eléctricos de distribución, la estructura utilizada incluye aisladores rollo ANSI 53-2 con bastidores.

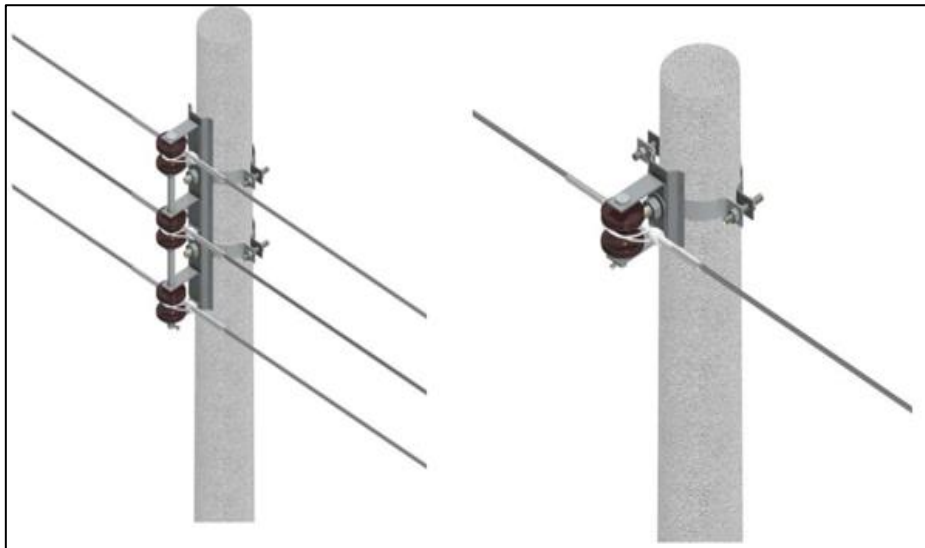


Figura 6. Estructuras para bajo voltaje utilizados en el país [CATALOGO DIGITAL]

Fuente:[26]

2.6.3. Cálculo de caídas de voltaje y pérdidas de potencia en redes de distribución.

Dependiendo de las características necesarias en una red, se puede emplear una configuración que cumpla con los límites establecidos en caídas de voltaje y pérdidas técnicas por transporte de energía. Para lo cual se analizan los tipos de configuración de circuitos en redes primarias como secundarias, haciendo referencia a parámetros de fase y secuencia. [22], [27]

2.6.3.1. Alimentadores y ramales trifásicos de tres (Δ) y cuatro hilos (Y)

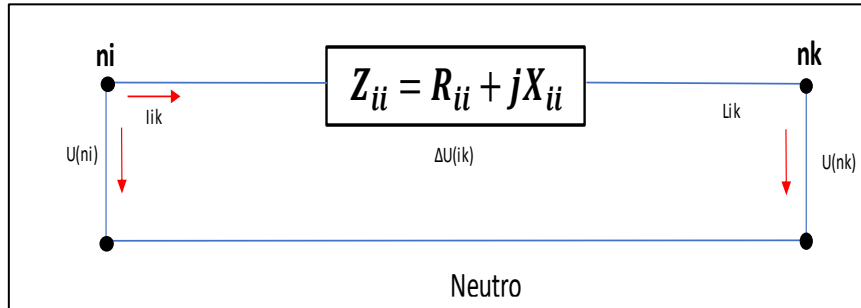


Figura 7. Modelo de impedancia para un ramal trifásico de 3 o 4 hilos.

Fuente: [22], [27]

En la figura 7 se muestra el modelamiento para la determinación de expresiones en sistemas trifásicos (Δ) y (Y). [22], [27]

Dónde:

- Z_{ik} : Impedancia de secuencia positiva del ramal en Ω/km
- I_{ik} : $I_{ik} \angle -\varphi$, corriente por el ramal para una carga con FP inductivo
- L_{ik} : Longitud del ramal en km
- U_{ni}, U_{nk} : Tensión en los postes "i" y "k"

La expresión específica para determinar la caída de voltaje en función de la demanda máxima es:

$$\Delta U_{ik} = I_{ik} * L_{ik} * Z_{ik} = \frac{DM_{3\phi-ik}}{\sqrt{3} * U_{nom}} * (\text{Cos}\varphi - j\text{Sen}\varphi)(R_{ik} + jX_{ik}) * L_{ik} \quad (19)$$

Dónde:

- $DM_{3\phi-ik}$: Demanda máxima trifásica en kVA que circula por el tramo "ik"
- U_{nom} : Voltaje nominal línea a tierra en kV

Teniendo en cuenta que para alimentadores menores a 15 km y niveles de voltaje de hasta 33kV, en ángulo entre las tensiones de envío y recibo tiene un valor muy pequeño de máximo 1°, permitiendo despreciar la parte imaginaria de la caída de voltaje, denominada componente transversal por estar desfasada 90°, obteniendo una expresión reducida [22]:

$$\Delta U_{3\phi} = \frac{DM_{3\phi-ik}}{\sqrt{3} * U_{nom}} * L_{ik} * (R_{ik} \cos\varphi + jX_{ik} \text{Sen}\varphi) \quad \text{Voltaje al neutro} \quad (20)$$

La EERCS ha fijado valores máximos de caídas de voltaje para mantener un servicio adecuado a sus consumidores, siendo el 6% en el área urbana y 4.5% en el área rural. [27]

Expresando la caída de voltaje en porcentaje con respecto al voltaje nominal del neutro en voltios:

$$\Delta U_{3\phi} \% = \frac{DM_{3\phi-ik}}{10 * U_{nom}^2} * L_{ik} * (R_{ik} \cos\varphi + jX_{ik} \text{Sen}\varphi) \quad (21)$$

2.6.3.2. Ramales monofásicos entre dos fases de un circuito conectado en Δ

Los ramales monofásicos alimentados por un transformador conectado en Δ , se forman con dos fases (AB, AC, BC). En la figura 8 se muestra uno de estos ramales entre los postes “i” y “k” formados por las fases “A” y “B” de un ramal primario. [27]

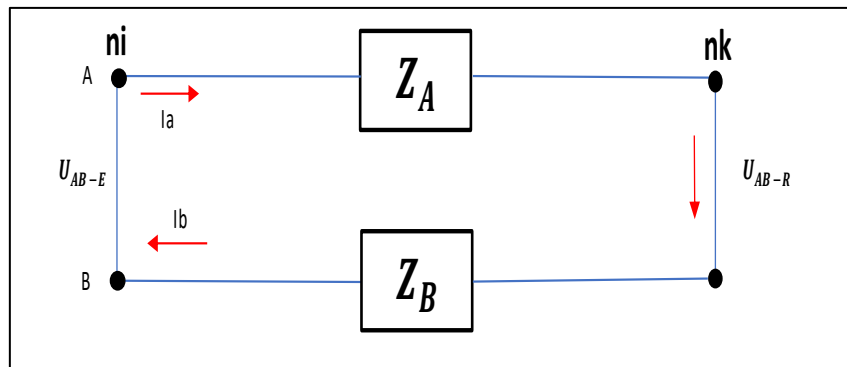


Figura 8. Modelo de un ramal monofásico de una red de distribución conectada en Δ.

Fuente:[22], [27]

Dónde:

- $Z_A = Z_B = Z$: Impedancia de cada fase Ω/km
- L_{ik} : Longitud del ramal en km
- $I_a = -I_b = I$: Corriente que circula por el ramal monofásico
- U_{AB-e}, U_{AB-R} : Tensión de envío "i" y tensión de recibo "k" del ramal

La expresión específica para determinar la caída de voltaje en función de la demanda máxima:

$$\Delta U_{AB} = U_{AB-e} - U_{AB-R} \quad (22)$$

$$\Delta U_{AB} = 2 * \frac{DM_{ik}}{U_{AB-nom}} * L_{ik} * (R_{ik} \cos \varphi + jX_{ik} \text{Sen} \varphi) \quad \text{Voltaje}_{L-L} \quad (23)$$

Dónde:

- DM_{ik} : Demanda máxima en kVA que circula por el tramo "ik"
- U_{nom} : Voltaje nominal en kV

Expresando la caída de voltaje en porcentaje con respecto al voltaje de línea:

$$\Delta U_{ik} \% = 2 * \frac{DM_{ik}}{10 * U_{AB-nom}^2} * L_{ik} * (R_{ik} \cos\varphi + jX_{ik} \sin\varphi) \quad (24)$$

Se nota claramente que la caída de voltaje en un sistema monofásico es 2 veces mayor en comparación a la de un sistema trifásico.

En la Tabla 1 y Tabla 2 se muestran las expresiones para el cálculo de caída de voltaje, correspondiente a los tipos de conexión establecidos en redes secundarias, tanto en términos de voltaje y porcentaje respectivamente. Además, en la Tabla 3 se muestra el parámetro “M” que considera la componente transversal de la caída de voltaje.

Tabla 1. Expresiones para el cálculo de las caídas de voltaje en V, en los diferentes tipos de ramales.

Fuente: [22], [27]

Circuito	Caída de Voltaje en Voltios
3F3C – 3F4C	$\Delta U_{ik} = \frac{DM_{ik}}{\sqrt{3} * U_{nom}} * L_{ik} * M_{ik}$
1F L-L (Δ)	$\Delta U_{ik} = 2 * \frac{DM_{ik}}{U_{AB-nom}} * L_{ik} * M_{ik}$
1F L-N (Y)	$\Delta U_{FN-ik} = \sqrt{3} * \frac{DM_{ik}}{U_{nom}} * L_{ik} * M_{ik}$
2F L-N (Carga 1F Balanceada)	$\Delta U_{FN-ik} = \frac{\sqrt{3} * DM_{ik}}{2 * U_{nom}} * L_{ik} * M'_{2FN-ik}$
2F-N (Carga de 2F Balanceada)	$\Delta U_{FN-ik} = \frac{DM_{ik}}{\sqrt{3} * U_{nom}} * L_{ik} * M'_{2FN-ik}$

Tabla 2. Expresiones para calcular las caídas de voltaje en %, en los diferentes tipos de ramales.

Fuente: [22], [27]

Circuito	Caída de Voltaje en %
3F3C – 3F4C	$\% \Delta U_{ik} = \frac{DM_{ik}}{10 * U_{nom}^2} * L_{ik} * M_{ik}$
1F L-L (Δ)	$\% \Delta U_{ik} = 2 * \frac{DM_{ik}}{10 * U_{AB-nom}^2} * L_{ik} * M_{ik}$
1F L-N (Y)	$\% \Delta U_{FN-ik} = 3 * \frac{DM_{ik}}{10 * U_{nom}^2} * L_{ik} * M_{ik}$
2F L-N (Carga 1F Balanceada)	$\% \Delta U_{FN-ik} = \frac{3 * DM_{ik}}{2 * 10 * U_{nom}^2} * L_{ik} * M_{2Fn-ik}$
2F-N (Carga de 2F Balanceada)	$\% \Delta U_{FN-ik} = \frac{DM_{ik}}{10 * U_{nom}^2} * L_{ik} * M_{2Fn-ik}$

Tabla 3. Expresiones para el cálculo de “M” en los diferentes tipos de alimentadores y ramales.

Fuente: [22], [27]

Circuito	Parámetro M en Ω/Km
3F3C – 3F4C	$M_{ik} = (R \cos \phi + X \sin \phi)_{ik}$
1F L-L (Δ)	$M_{ik} = (R \cos \phi + X \sin \phi)_{ik}$
1F L-N (Y)	$M_{ik} = (R \cos \phi + X \sin \phi)_{ik}$
2F L-N (Carga 1F Balanceada)	$M_{2Fn-ik} = [R(\cos \phi + \cos(60 + \phi)) + X(\sin \phi + \sin(60 + \phi))]$
2F-N (Carga de 2F Balanceada)	$M_{2Fn-ik} = R(\cos \phi + \sqrt{3} \cos(30 - \phi)) + X(\sin \phi + \sqrt{3} \sin(30 - \phi))$

2.6.3.3. Expresiones para las pérdidas activas.

De igual manera en la Tabla 4 se determina los valores de pérdidas de potencia activa en las líneas para los diferentes tipos de circuitos, las cuales son proporcionales al cuadrado de la corriente circulante por el vano y de su impedancia.

Tabla 4. Expresiones para calcular las pérdidas de potencia activa en los diferentes tipos de ramales.

Fuente:[22], [27]

<i>Circuito</i>	<i>Pérdidas de potencia en kW</i>
3F3C – 3F4C	$\Delta P_{3F-ik} = \left(\frac{DM_{ik}}{U_{nom}}\right)^2 * L_{ik} * R_{ik} * 10^{-3}$
1F L-L (Δ)	$\Delta P_{1F-LLik} = 2 * \left(\frac{DM_{1F-ik}}{U_{nom}}\right)^2 * L_{ik} * R_{ik} * 10^{-3}$
1F L-N (Y)	$\Delta P_{1F-LNik} = 3 * \left(\frac{DM_{1F-ik}}{U_{nom}}\right)^2 * r_{Eq-ik} * L_{ik} * 10^{-3}$
2F L-N (Carga 1F Balanceada)	$\Delta P_{2Fn-1F} = \frac{3}{4} * \left(\frac{DM_{1F-ik-total}}{U_{nom}}\right)^2 * (r_a + r_b + r_n) * L_{ik} * 10^{-3}$
2F-N (Carga de 2F Balanceada)	$\Delta P_{2Fn-1F} = 3 * \left(\frac{DM_{ik-Fn}}{U_{nom}}\right)^2 * (r_a + r_b + r_n) * L_{ik} * 10^{-3}$

- R_{ik} : Resistencia electrica d elos conductores de fase del alimentador
- R_{Eq-ik} : Resistencia equivalente del ramal

2.7. Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas (ACO)

Las hormigas cuando buscan alimento son capaces de encontrar el camino más corto, usando feromonas como medio de comunicación entre ellas, con el pasar del tiempo se vio que este comportamiento puede ser utilizado en problemas de optimización. [28]

Es un método heurístico que imita el comportamiento de las hormigas para encontrar la solución de mejor calidad a un problema de optimización altamente complejos.[28]–[30]

Este algoritmo construye una alternativa de solución, agregando paso a paso un elemento i de entre un conjunto de alternativas N_i^k conocido como vecindad del elemento k . Cada elemento posee una probabilidad P_i de ser elegido [29], [30]:

$$P_i = \frac{\tau_i^\alpha * n_i^\beta}{\sum_{l \in N_i^k} \tau_l^\alpha * n_l^\beta} \quad (25)$$

Donde τ_i es una cantidad numérica almacenada en una matriz de feromonas y define el grado de participación de ese elemento i en alternativas de solución. El factor n_i es un valor dado por el análisis de la sensibilidad del sistema, este define el impacto que produce dicho elemento i al ser adicionado a la alternativa que se construya. [29], [30]

Los parámetros α, β definen el grado de importancia de la información utilizada, si $\alpha > \beta$ se da mayor preferencia a la información proveniente de la matriz de feromonas, caso contrario prevalece la información heurística. [29], [30]

El proceso para construir una alternativa de solución se repite hasta completar varios individuos, donde cada uno de ellos producirá un incremento o decremento de feromona sobre los elementos que los conforman. [29]

Para evitar el estacionamiento de este algoritmo en alternativas de baja calidad, efectúa un proceso de evaporación en 2 etapas. [29], [30]

- *Evaporación Local:* Se realiza durante la construcción de cada solución, aplicando la ecuación (26) al elemento recientemente adicionado.

$$\tau_i = \tau_i(1 - \epsilon) \quad (26)$$

- *Evaporación Global:* Se ejecuta después de realizar los depósitos de feromonas, aplicando la formula (27) a cada elemento de la alternativa de solución.

$$\tau_i = \tau_i(1 - \rho) \quad (27)$$

Donde ϵ y ρ son parámetros de calibración y están en un intervalo de 0 a 1.

2.8. Análisis Económico

Debido a la importancia de tener óptimos niveles de voltaje para el mejor funcionamiento de la red, se deben considerar además del enfoque técnico, los parámetros económicos a los que se encuentran sujetas estas mejoras [23]:

- Niveles de voltaje dentro de los límites.
- Disminución de pérdidas.
- Costo de implementación.

El análisis técnico-económico, se debe tener en cuenta debido a que la operación óptima del sistema considera costos de inversión que se realizan para su correcto funcionamiento. [23]

Los costos de inversión y mantenimiento del cambio de topología están dados:

$$C_{top} = \sum_{i=1}^{ni} r_i * C_{top,i} \quad (28)$$

$$C_{top} = \sum_{i=1}^{ni} r_i [C_{a,ri} * A^{-1}(i_a, N) + C_{s,ri}] \quad (29)$$

Dónde:

- ni: Número de nodos del sistema.
- C_{top} : Costo de inversión y mantenimiento del cambio de topología $\left[\frac{\$}{\text{año}} \right]$
- $r_i = 1$. Si se cambio la topología del sistema en ese nodo caso contrario 0.
- $C_{a,ri}$: Costo de inversión. [\\$]
- $C_{s,ri}$: Costo anual de mantenimiento. $\left[\frac{\$}{\text{año}} \right]$
- $A^{-1}(i_a, N)$: Factor de retorno de capital.

$$A^{-1}(i_a, N) = i_a * \frac{(1+i_a)^N}{(1+i_a)^N - 1} \quad (30)$$

Además:

- i_a : Tasa de interes anual.
- N : Vida útil esperada.

2.9. Índices de Rentabilidad Económica

Pretende la obtención de una utilidad máxima con relación a un monto de inversión determinado. [7]

2.9.1. Valor actual neto (VAN).

Representa la diferencia entre el beneficio resultado del costo de las pérdidas técnicas por transporte de energía y el costo amortizado del sistema existente vs el sistema optimizado.[7]

$$VAN = \sum Beneficio - \sum Costo \quad (31)$$

$$Beneficio = \sum_{t=1}^{Te+Ta} \frac{Bt}{(1+ri)^t} \quad (32)$$

$$Costo = \sum_{t=1}^{Te+Ta} \frac{Ct}{(1+ri)^t} \quad (33)$$

Dónde:

- Bt : Beneficio en el año t
- Ct : Costo en el año t
- Te : Tiempo equivalente de pérdidas
- Ta : Años de vida útil
- ri : Tasa de interés pasiva

- t: 1,2,3 n.
- n: Número de años

2.9.2. Razón Beneficio/Costo RBC.

Análisis de la relación que existe entre los beneficios y los costos asociados a un proyecto de inversión [7].

$$RBC = \frac{VAN}{VAC} \quad (34)$$

Dónde:

- RBC: Razón Beneficio/Costo
- VAN: Valor Actual de los Ingresos Netos
- VAC: Valor Actual de los Costos de Inversión

Los criterios de decisión de la RBC se pueden interpretar:[23]

- $RBC > 1$: Representa que el beneficio de la inversión supera a los costos del sistema, por lo tanto, se recomienda realizar la inversión.
- $RBC = 1$: Representa que los costos y los beneficios son iguales, por lo tanto, no existen ganancias.
- $RBC < 1$: Representa que los costos superan a los beneficios, por lo tanto, no es recomendable realizar la inversión.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA USADA PARA LA OPTIMIZACION

En la Figura 9 se presenta las etapas correspondientes al proceso llevado a cabo para el desarrollo de este proyecto de investigación.

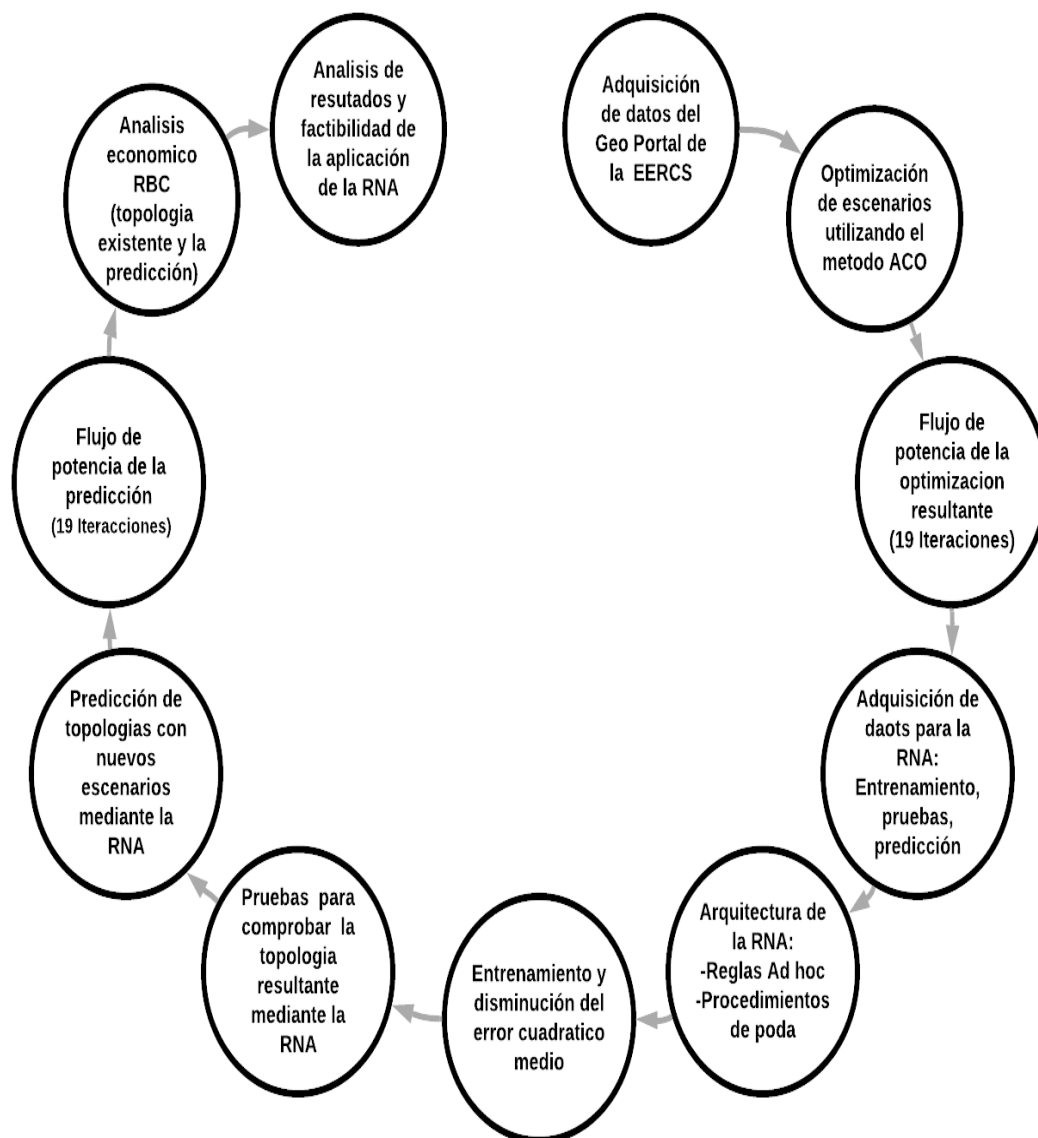


Figura 9. Etapas para el desarrollo del proyecto de investigación

Fuente: Autores

3.1. Adquisición de datos.

La CENTROSUR mediante el software ARCGIS, en su página web posee los datos necesarios para realizar una representación de las redes de distribución en medio, bajo voltaje, de los cuales:

- Coordenadas geográficas de los postes para bajo voltaje.
- Centro de carga por poste.
- Tipo de Conexión.
- Tipo de Conductores entre estaciones de transformación.

Mediante el uso de las coordenadas geográficas se calculó las distancias entre postes, dependiendo de cómo se encuentren conectados en el sistema actualmente. Se indica que; los postes poseen un número específico de puntos de carga, lo que permite encontrar las potencias referenciales, teniendo en cuenta el tipo de estrato en el que se encuentren, en este caso al ser residencial son estratos C, D o E de conformidad con la normativa interna de la CENTROSUR que es la distribuidora para la parte Austral del país.

La matriz de secuencia es calculada según el tipo de conductor que tengan entre cada poste, el tipo de estructura en el que está colocado, teniendo en cuenta si es una conexión monofásica, bifásica o trifásica.

3.2. Optimización mediante Colonia de Hormigas (ACO)

El sistema de optimización mediante colonia de hormigas permite encontrar el mejor camino entre varios nodos, los criterios de optimización pueden ser dos, por menor caída de voltaje o menor cantidad de pérdidas de potencia activa. La topología inicial para comprobar el funcionamiento del programa realizado se muestra en la figura.

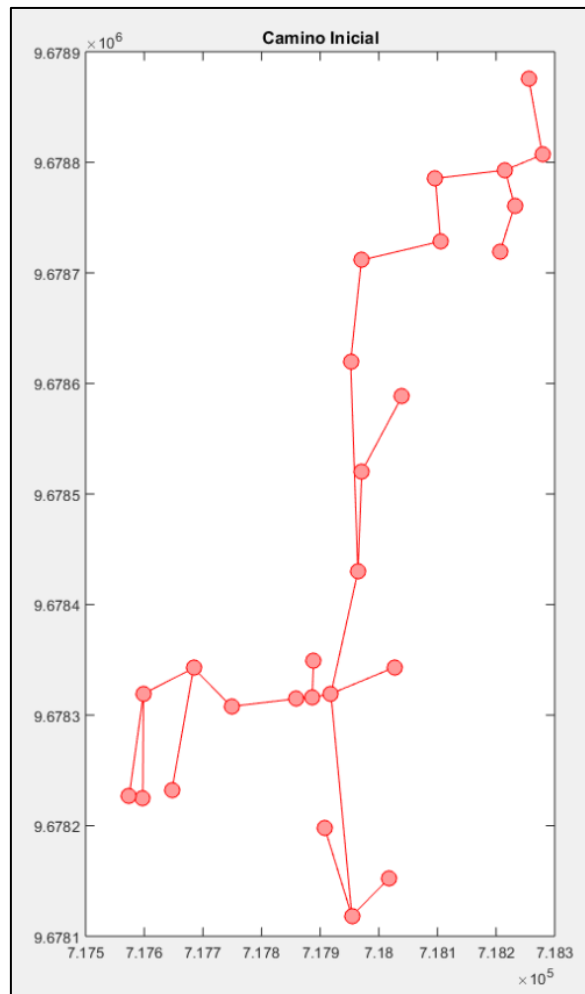


Figura 10. Topología real para pruebas

Fuente: Autores

En este caso se utiliza el criterio de caída de voltaje, el método consiste en generar caminos aleatorios los cuales representan el movimiento de una hormiga. Se envía varias hormigas en diferentes iteraciones, por cada iteración la feromona se va actualizando identificado el mejor camino que una u otra hormiga haya escogido. La mayor densidad de feromonas es aquella donde existió un número significativo de paso de hormigas, dado que fueron los mejores caminos.

Para este desarrollo se cuenta con 300 hormigas y 100 iteraciones, también se establece como valores iniciales de 0.5 para la tasa de evaporación, el valor de 1 tanto para el parámetro exponencial de la feromona como para el parámetro exponencial de la

visibilidad. La matriz de feromona inicial está en función de las caídas de voltaje calculadas anteriormente.

Se realiza un número significativo de iteraciones, especificadas anteriormente, que permitan identificar el camino más óptimo según la menor caída de voltaje. Obteniendo una nueva topología de conexión entre los nodos.

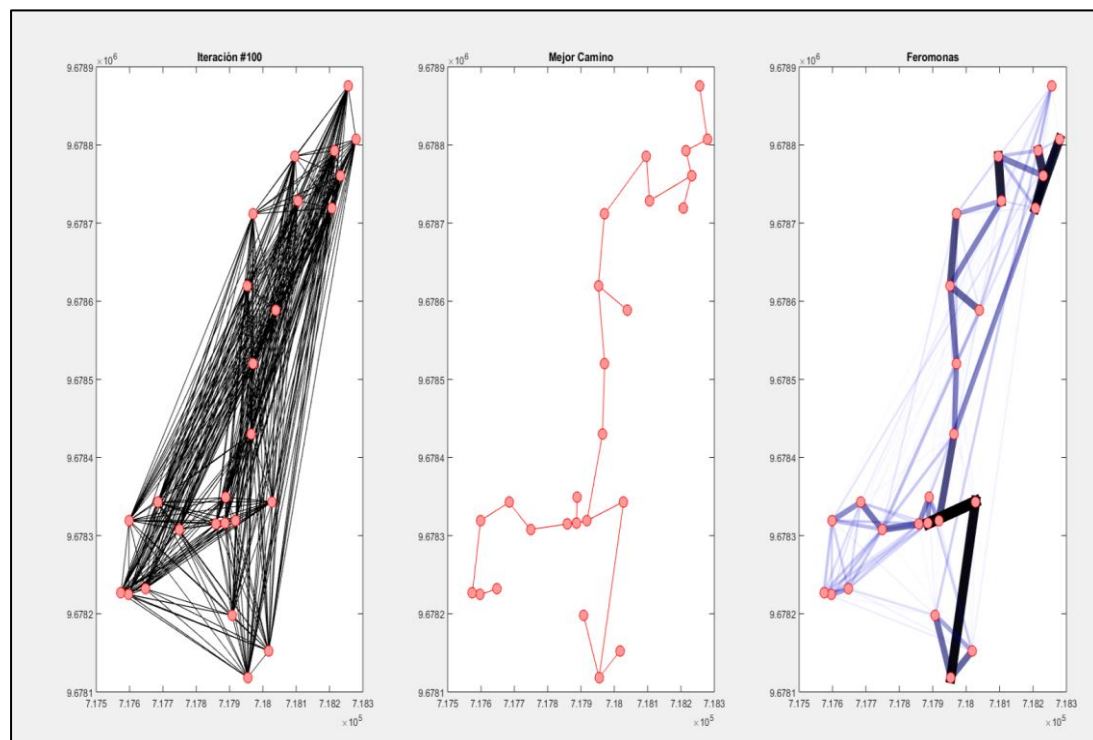


Figura 11. Topología optimizada y camino de feromonas entre nodos

Fuente: Autores

3.3. Flujo de Potencia

El flujo de potencia se lo realiza luego de que el modelo de optimización denominado ACO obtuvo una nueva topología, sin embargo, de esta manera se determinan las pérdidas de potencia activa y las caídas de voltaje en cada nodo. Esto se lo realiza teniendo en cuenta que aquellos nodos se deben reordenar, evitando errores en la aplicación del modelo.

La cantidad de iteraciones utilizadas fueron 19, el cual es el número mínimo de iteraciones para obtener un alto rendimiento según know how. El proceso de flujo de potencia activa se lo realiza tanto para la nueva topología como para la topología existente, con el fin de encontrar las diferencias, analizarlas y tener un criterio de la efectividad del modelo empleado. El flujo de potencia fue programado en el software MATLAB y a continuación se muestra en la figura un ejemplo de una data para la obtención de su flujo.

```
>> FlujoComienzo
Resultados de la ultima iteración

Resultado =
```

Nodoi	Nodoj	Li	Lj	Pi	Qi	Si	Pj	Qj	Sj	DV1	DVj	DVP
1	2	39	39	13.072	4.2968	13.76	13.072	4.2968	13.76	1.3488	1.3488	0.56199
2	3	31	70	11.183	3.6768	11.772	24.255	7.9737	25.532	1.9894	3.3382	1.3909
1	4	38	38	7.2391	2.3794	7.6201	7.2391	2.3794	7.6201	0.72776	0.72776	0.30323
4	5	23	61	4.3037	1.4148	4.5303	11.543	3.7942	12.15	0.70238	1.4301	0.59589
5	6	23	84	5.4727	1.7995	5.761	17.016	5.5938	17.911	1.0355	2.4656	1.0273
6	7	21	105	9.2361	3.038	9.7229	26.252	8.6317	27.634	1.4587	3.9243	1.6351
7	8	58	163	3.1296	1.0329	3.2957	29.381	9.6647	30.93	4.5102	8.4345	3.5144
8	9	36	199	11.191	3.6883	11.783	40.572	13.353	42.713	3.8668	12.301	5.1255
1	10	33	33	3.1255	1.0273	3.29	3.1255	1.0273	3.29	0.27287	0.27287	0.1137
2	11	10	49	1.9573	0.64368	2.0604	15.03	4.9405	15.821	0.39764	1.7464	0.72767
11	12	41	90	1.9578	0.64428	2.061	16.987	5.5848	17.882	1.8428	3.5892	1.4955
12	13	15	105	8.2384	2.7099	8.6727	25.226	8.2947	26.554	1.0013	4.5905	1.9127
10	14	27	60	1.957	0.6433	2.0601	5.0826	1.6706	5.3501	0.36305	0.63592	0.26497
14	15	27	87	4.3037	1.4148	4.5303	9.3863	3.0854	9.8804	0.67049	1.3064	0.54434
15	16	17	104	1.9574	0.64377	2.0605	11.344	3.7292	11.941	0.51022	1.8166	0.75693
16	17	40	144	1.9577	0.64426	2.061	13.301	4.3734	14.002	1.4078	3.2245	1.3435
17	18	49	193	5.474	1.8013	5.7627	18.775	6.1747	19.765	2.4346	5.6591	2.358
18	19	3	196	1.9595	0.64662	2.0634	20.735	6.8213	21.828	0.16464	5.8237	2.4266
19	20	27	223	1.9603	0.64784	2.0646	22.695	7.4692	23.893	1.6222	7.446	3.1025
20	21	15	238	4.3086	1.4215	4.537	27.004	8.8906	28.43	1.0725	8.5185	3.5494
10	22	37	70	1.9571	0.64331	2.0601	5.0826	1.6706	5.3501	0.49752	0.77039	0.32099
22	23	21	91	6.6029	2.1706	6.9505	11.685	3.8413	12.301	0.64924	1.4196	0.59151
23	24	33	124	7.2403	2.3811	7.6218	18.926	6.2224	19.922	1.6525	3.0722	1.2801
24	25	36	160	10.226	3.3653	10.765	29.152	9.5876	30.688	2.7773	5.8495	2.4373
25	26	37	197	7.2466	2.3898	7.6305	36.398	11.977	38.318	3.565	9.4145	3.9227
25	27	38	198	3.1315	1.0356	3.2983	32.283	10.623	33.986	3.2474	9.0969	3.7904
25	28	58	218	1.9632	0.65171	2.0685	31.115	10.239	32.756	4.7774	10.627	4.4278

Figura 12. Flujo de potencia programado en MATLAB

Fuente: Autores

3.4. Estructura RNA Propuesta

Para este proyecto de investigación se utiliza la “regla de la capa oculta - capa entrada”, obteniendo un valor de 28 neuronas para la capa oculta, combinándola con uno de los procedimientos de poda, que implica trabajar en una RNA de tamaño suficiente podar las conexiones y añadir nuevas neuronas. Esto hasta obtener un error cuadrático medio aceptable.

Luego de implementar diferentes arquitecturas, partiendo desde la más básica, se llega a la conclusión que la arquitectura óptima para resolver este problema consta de 1 capa oculta con 35 neuronas en ella. Utilizando la función de activación sigmoïdal para la capa de salida.

Cabe recalcar que al implementar diferentes topologías se logró determinar que el número de neuronas en la capa oculta no debía ser mayor a 38, ya que si esta se excediese genera un sobre entrenamiento, debido a que es mayor el número de mínimos locales por tanto su probabilidad de caer en un mínimo local que no necesariamente es el mejor aumenta considerablemente durante el proceso de entrenamiento. Lo cual aumentaría el error por ende su predicción no sería la más óptima.

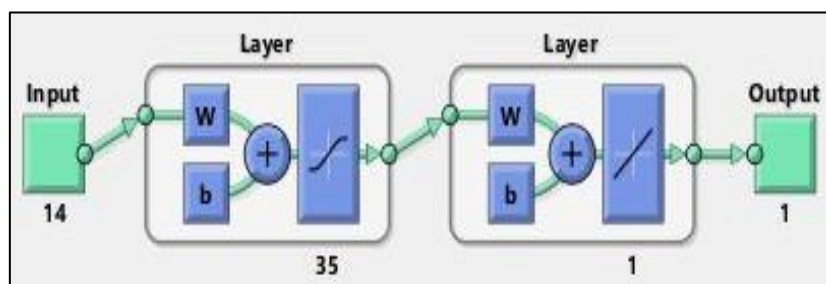


Figura 13. Estructura RNA

Fuente: Autores

Los datos de entrada y salida han sido normalizados para que la RNA no tenga mayor complejidad al momento del procesamiento. La normalización está en función de los valores máximos y mínimos obtenidos del flujo inicial y las respuestas del ACO.

3.4.1. Entradas de la RNA

Las entradas de la RNA en este caso son los parámetros del flujo de potencia inicial, que incluyen, nodos n_i y n_j , distancia entre nodos, distancias desde el puesto de transformación, potencias reactivas, activas y aparentes de envío y recepción, y la caída de voltaje porcentual en cada nodo.

3.4.2. Salidas de la RNA

Para el desarrollo de esta investigación se plantea como salida el resultado n_i de la topología obtenida por el sistema ACO, es decir los nodos de envío debido que estos modificaran al sistema en función del nodo de recepción n_j el cual se mantendrá constante, solo se utiliza este parámetro como resultado ya que; el objetivo no es que la RNA aprenda a realizar flujos de potencia, sino que aprenda a optimizar topologías, el flujo se puede realizar normalmente con estos nodos en un proceso posterior.

3.5. Entrenamiento de la RNA

El entrenamiento de la RNA se realiza creando una base de datos con varios escenarios posibles dentro del sistema a analizar. A partir del sistema original desde el transformador se propone variaciones de sus parámetros:

- Número de clientes y estratos en cada nodo.
- Tipo de conexión entre cada nodo.
- Distancias entre nodos.

Con variaciones aleatorias en los parámetros mencionados se obtiene una gran cantidad de posibles escenarios.

Los escenarios son tratados por el sistema ACO realizado, con el fin de encontrar la base de datos para el target, estos son los resultados requeridos.

Organizado los datos obtenidos para cada escenario, se entrena la RNA, varias veces, así esta aprende a gestionar las topologías en función del sistema ACO, bajo el parámetro de caídas de voltaje, con un error cuadrático medio estimado en su aprendizaje de $1 * 10^{-5}$.

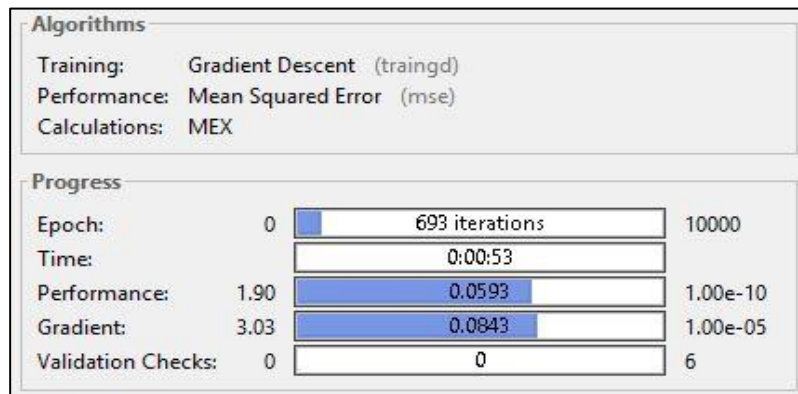


Figura 14. RNA al iniciar al entrenamiento (Error)

Fuente: Autores

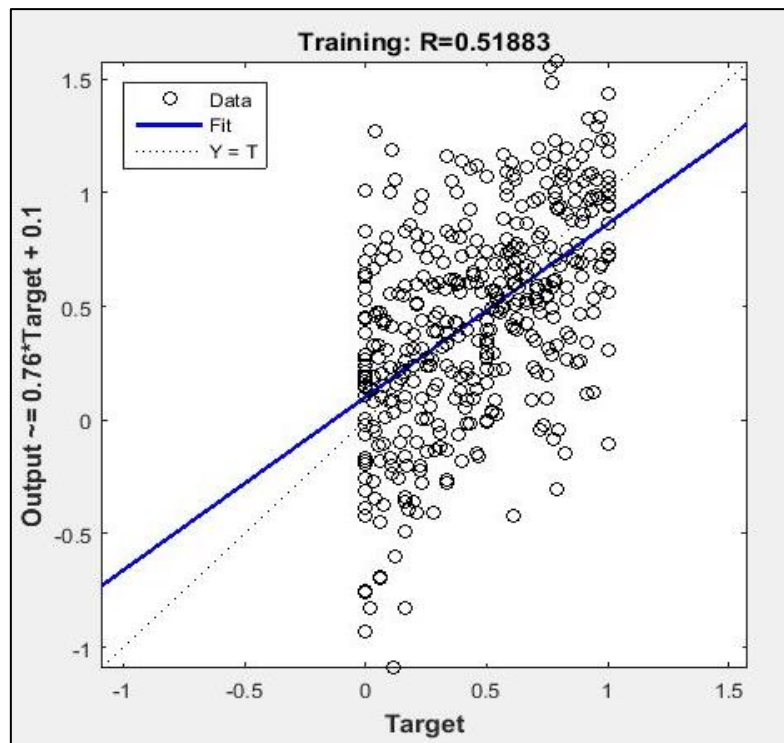


Figura 15. RNA al iniciar del entrenamiento (Gráfica)

Fuente: Autores

Una vez realizado el entrenamiento, la RNA logra obtener un error cuadrático medio de aprendizaje de $4,65 \times 10^{-6}$ entre el target y sus salidas.

Algorithms			
Training:	Gradient Descent (traingd)		
Performance:	Mean Squared Error (mse)		
Calculations:	MEX		
Progress			
Epoch:	0	0 iterations	10000
Time:		0:00:00	
Performance:	4.65e-06	4.65e-06	1.00e-10
Gradient:	1.00e-05	1.00e-05	1.00e-05
Validation Checks:	0	0	6

Figura 16. RNA al finalizar el entrenamiento (Error)

Fuente: Autores

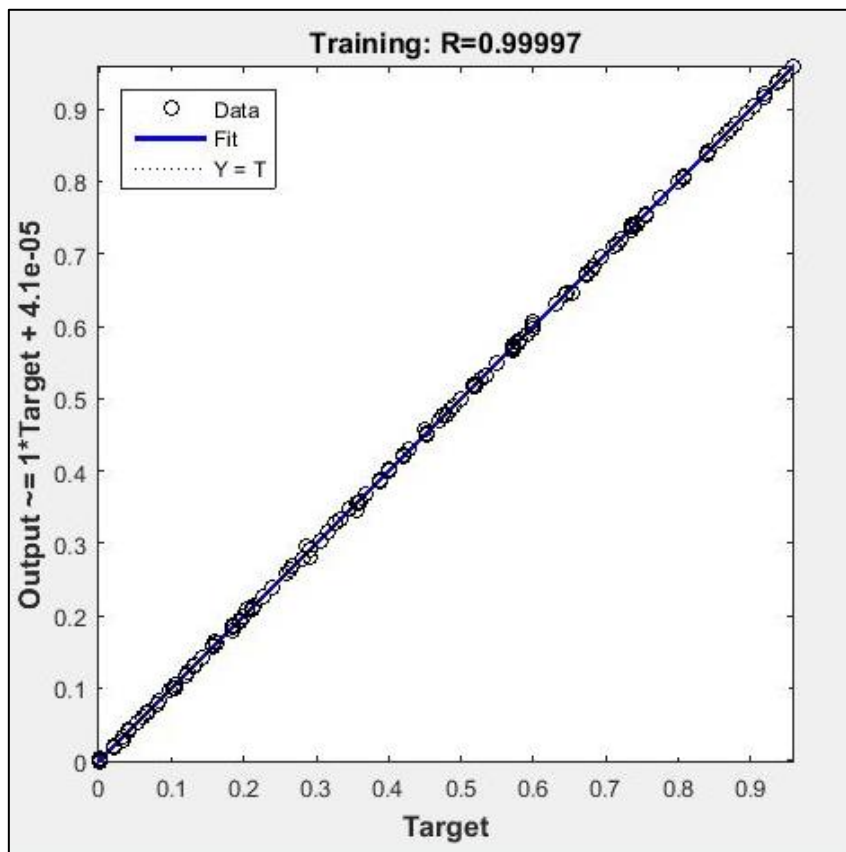


Figura 17. RNA al finalizar el entrenamiento (Gráfica)

Fuente: Autores

CAPÍTULO 4

4. CASOS DE ESTUDIO

Para comprobar el correcto funcionamiento de la RNA es necesario proceder a realizar pruebas, lo que implica distintas topologías y caídas de voltaje por nodo.

4.1. Primer Caso

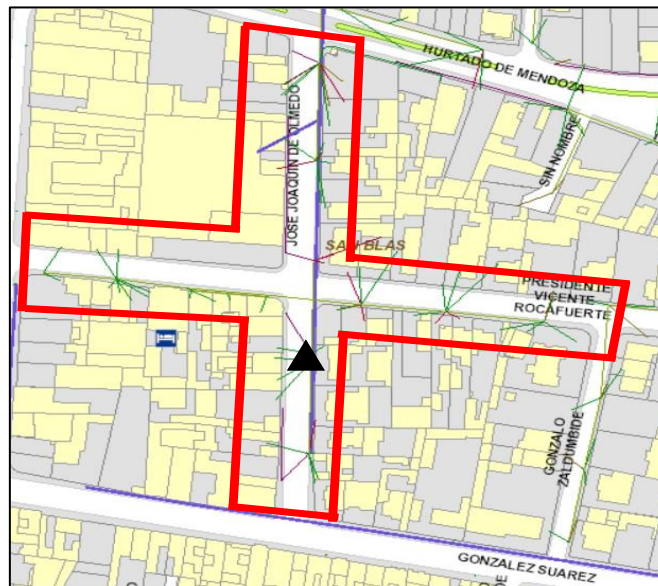


Figura 18. Zona de estudio propuesta

Fuente: GeoPortal CENTROSUR

En la Fig.18 se presentan todos los posibles caminos para el despliegue de la red, en la Tabla 5 su data inicial.

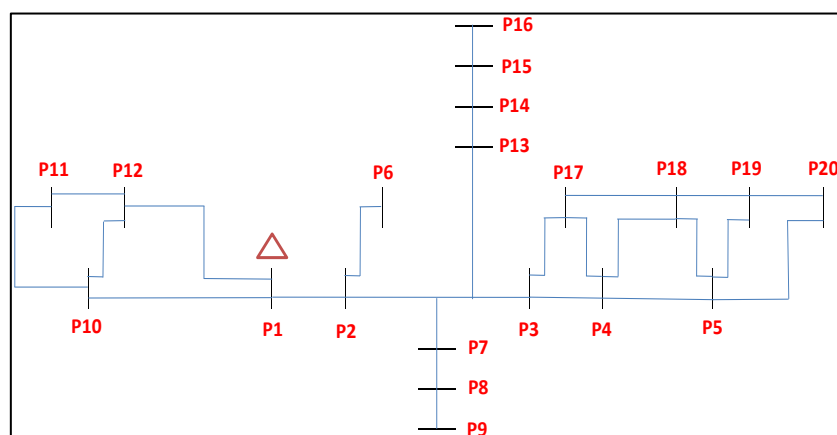


Figura 19. Grafo del sistema analizado con todos los posibles caminos

Fuente: Autores

Tabla 5. Data inicial de los posibles caminos del sistema analizado

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>L [m]</i>	<i>Usuarios</i>	<i>Configuración</i>	<i>Calibre</i>
1	2	3	4	3F4C	1/0
2	3	44	4	3F4C	1/0
2	6	22	3	3F4C	1/0
3	4	48	13	3F4C	1/0
3	17	26	1	1F2C	2
4	17	48	1	1F2C	2
4	18	16	1	1F2C	2
17	18	33	1	1F2C	2
4	5	48	13	3F4C	1/0
5	18	59	1	1F2C	2
5	19	29	1	1F2C	2
5	20	17	1	1F2C	2
18	19	32	1	1F2C	2
19	20	32	1	1F2C	2
2	7	45	19	3F4C	1/0
3	7	37	19	3F4C	1/0
7	8	34	13	3F4C	1/0
8	9	37	4	3F4C	1/0
1	10	47	7	3F4C	1/0
1	12	26	1	1F2C	2
10	12	25	1	1F2C	2
10	11	18	1	1F2C	2
11	12	35	1	1F2C	2
2	13	42	19	3F4C	1/0
3	13	34	19	3F4C	1/0
13	14	32	1	3F4C	1/0
14	15	28	16	3F4C	1/0
15	16	28	14	3F4C	1/0

4.1.1. Topología inicial para el caso 1

En el estudio la topología define el estado inicial del sistema, Fig. 19.

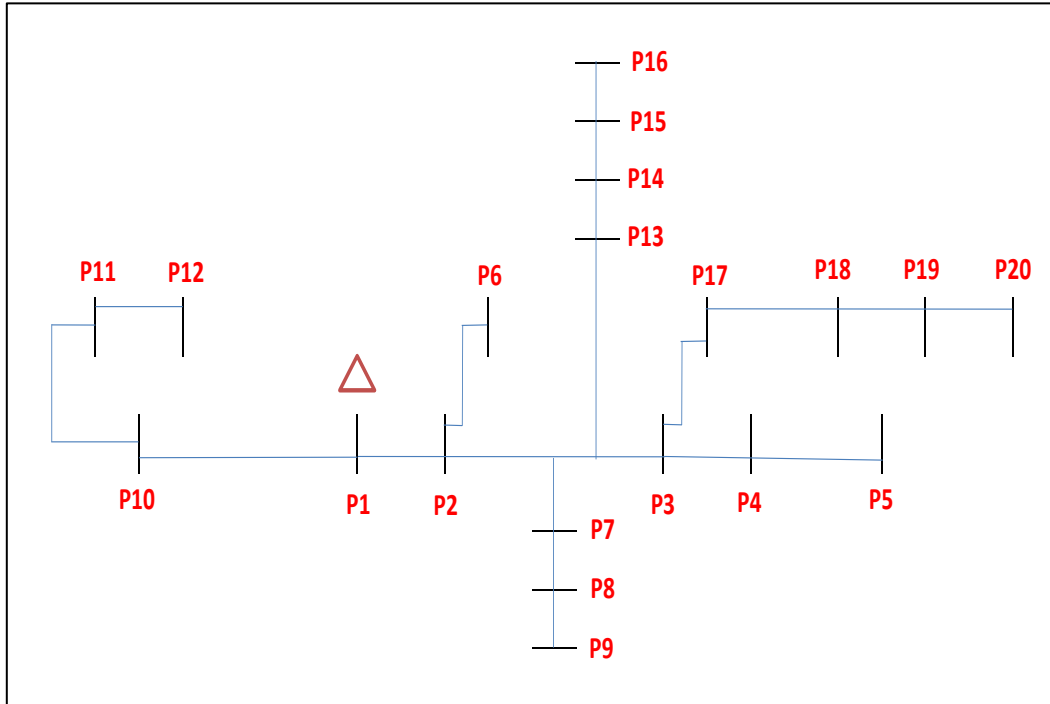


Figura 20. Grafo actual del sistema analizado

Fuente: [22], [27]

En función del grafo de la Fig. 19 su flujo de potencia del sistema refleja potencias, conexiones y distancias entre nodos, además de la matriz de incidencia obtenida. En la Tabla 6 se expone una versión parcial del flujo de potencia completo, solo con valores de relevancia para esta investigación.

Tabla 6. Flujo de potencia actual en el sistema analizado

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>Li [m]</i>	<i>Lj [m]</i>	<i>Si [kVA]</i>	<i>ΔVnj [V]</i>	<i>ΔVnj [%]</i>
1	2	3	3	5,760001818	0,043722782	0,018217826
2	3	44	47	5,760113903	1,32629661	0,552623588
3	4	48	95	14,80120196	4,523413285	1,884755535
4	5	48	143	14,80441788	9,519691741	3,966538225
2	6	22	25	4,530048338	0,616529729	0,256887387
2	7	45	48	20,61060955	3,046462167	1,269359236
7	8	34	82	14,80253883	6,589101399	2,745458916
8	9	37	119	5,764791698	10,98497016	4,577070898
1	10	47	47	8,670064515	1,031075933	0,429614972
10	11	18	65	2,060680059	3,462104766	1,442543652
11	12	35	100	2,061487792	9,099137339	3,791307224
2	13	42	45	20,61057145	2,846266926	1,185944552
13	14	32	77	2,061137268	5,148619569	2,145258154
14	15	28	105	17,75409096	8,421615831	3,509006596
15	16	28	133	15,79933708	12,81534667	5,33972778
3	17	26	73	2,060747877	4,043312626	1,684713594
17	18	33	106	2,062360913	10,54588653	4,394119389
18	19	32	138	2,063943055	17,68794853	7,369978554
19	20	32	170	2,087714827	25,67014343	10,6958931

En la Tabla 7 los valores totales del sistema.

Tabla 7. Totales del sistema actual analizado

<i>P [kW]</i>	<i>Q[kVAR]</i>	<i>S[kUA]</i>	<i>fp</i>
155,88	51,349	164,125	0,94979

4.1.2. Optimización de la RNA para el caso 1

El flujo de potencia para el caso 1, se normaliza y se ingresa a la RNA entrenada, los resultados se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Respuesta de optimización de la RNA entrenada para el sistema analizado

<i>Nodo i normalizado</i>	<i>Nodo i resultante</i>
4,75E-04	1,0090
0,05278	2,0029
0,10519	2,9986
0,15770	3,9962
0,05206	1,9891
0,05282	2,0035
0,31646	7,0127
0,36821	7,9960
0,00032	1,0060
0,47753	10,0732
0,00032	1,0062
0,05237	1,9951
0,63189	13,0059
0,68393	13,9947
0,73685	15,0001
0,10497	2,9944
0,84143	16,9873
0,89467	17,9987
0,21050	4,9996

Los resultados obtenidos por la RNA y el método ACO se exponen en la Tabla 9, el error refleja que la metodología de la RNA es factible para fines de optimización de topología en sistemas de distribución de bajo voltaje.

Tabla 9. Error porcentual de la predicción de la RNA entrenada para el sistema analizado

<i>Método ACO</i>	<i>Red Neuronal</i>	<i>Error %</i>
<i>Nodo i</i>	<i>Nodo i</i>	<i>Nodo i</i>
1	1,0090	0,9018
2	2,0029	0,1457
3	2,9986	0,0456
4	3,9962	0,0941
2	1,9891	0,5429
2	2,0035	0,1743
7	7,0127	0,1812
8	7,9960	0,0505
1	1,0060	0,5986
10	10,0732	0,7315
1	1,0062	0,6168
2	1,9951	0,2447
13	13,0059	0,0452
14	13,9947	0,0376
15	15,0001	0,0009
3	2,9944	0,1853
17	16,9873	0,0749
18	17,9987	0,0072
5	4,9996	0,0088

El flujo de potencia resultado de nueva topología obtenida por medio de la RNA, refleja si el sistema fue optimizado según el parámetro de caídas de voltaje propuesto, en la Fig. 20 su grafo resultante, además del flujo de potencia de esta, observada en la Tabla 10.

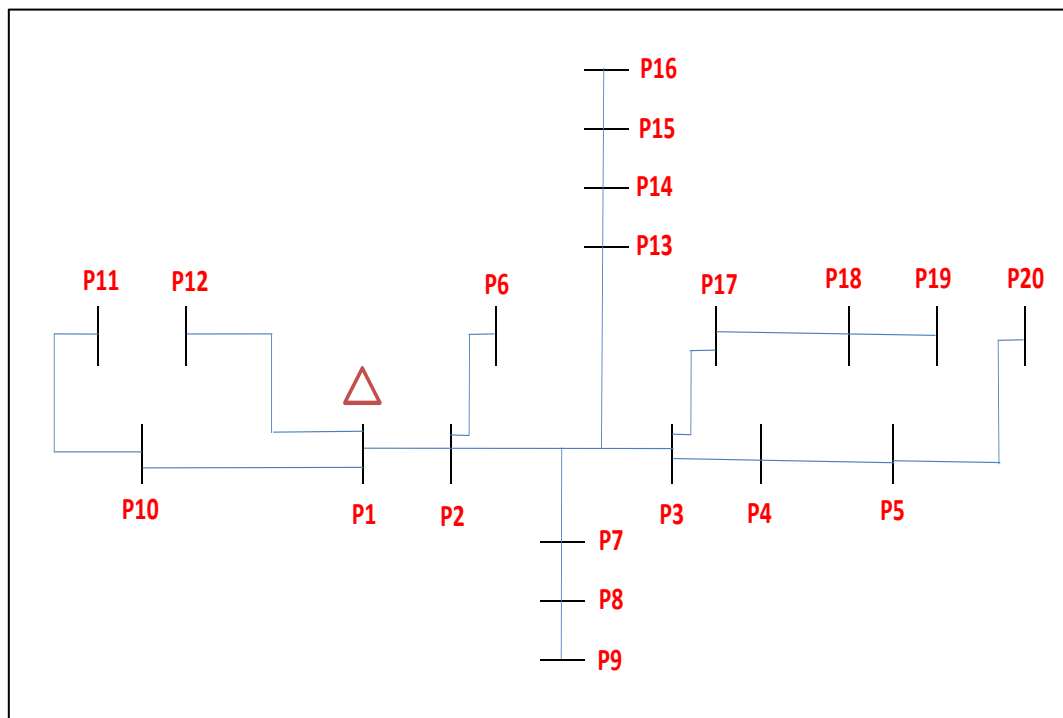


Figura 21. Grafo resultante de la RNA entrenada para el sistema analizado

Fuente: [22], [27]

Tabla 10. Flujo de potencia resultante de la RNA entrenada para el sistema analizado

Nodo i	Nodo j	L_i [m]	L_j [m]	S_i [kVA]	ΔV_{nj} [V]	ΔV_{nj} [%]
1	2	3	3	5,760001818	0,043722782	0,018217826
2	3	44	47	5,760113903	1,32629661	0,552623588
3	4	48	95	14,80120196	4,523413285	1,884755535
4	5	48	143	14,80441788	9,519691741	3,966538225
2	6	22	25	4,530048338	0,616529729	0,256887387
2	7	45	48	20,61060955	3,046462167	1,269359236
7	8	34	82	14,80253883	6,589101399	2,745458916

Continúa en la siguiente página

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>Li [m]</i>	<i>Lj [m]</i>	<i>Si [kVA]</i>	<i>ΔVnj [V]</i>	<i>ΔVnj [%]</i>
8	9	37	119	5,764791698	10,98497016	4,577070898
1	10	47	47	8,670064515	1,031075933	0,429614972
10	11	18	65	2,060680059	3,462104766	1,442543652
1	12	26	26	2,06001002	0,673970716	0,280821131
2	13	42	45	20,61057145	2,846266926	1,185944552
13	14	32	77	2,061137268	5,148619569	2,145258154
14	15	28	105	17,75409096	8,421615831	3,509006596
15	16	28	133	15,79933708	12,81534667	5,33972778
3	17	26	73	2,060747877	4,043312626	1,684713594
17	18	33	106	2,062360913	10,54588653	4,394119389
18	19	32	138	2,063943055	17,68794853	7,369978554
5	20	17	160	2,087714827	18,7893724	7,828905167

Tabla 11. Totales del flujo de potencia resultante de la RNA entrenada para el sistema analizado

<i>P [kW]</i>	<i>Q[kVAR]</i>	<i>S[kUA]</i>	<i>fp</i>
155,88	51,3469	164,1238	0,94980

4.1.5. Análisis económico para el caso 1

En el análisis económico se debe toma como referencia los parámetros de la Tabla 12.

Tabla 12. Parámetros para el análisis económico

<i>Tiempo de vida [años]</i>	<i>Costo de perdidas [USD]</i>	<i>Tiempo equivalente de perdidas [h/año]</i>	<i>Tasa pasiva [%]</i>	<i>Tasa de crecimiento [%]</i>
15	0,10	7008	4,80	4,15

En la tabla 13 se observa sus costos de pérdidas a lo largo de 15 años, tanto del sistema existente como el optimizado por la RNA, incluido el beneficio, costo y VAN entre estos.

Tabla 13. Análisis económico entre la topología existente y la proyectada por la RNA entrenada para el sistema analizado

Año	Existente		Proyectado		Beneficio	Costo	VAN
	ΔP [kW]	KAP [USD]	ΔP [kW]	KAP [USD]	[USD]	[USD]	[USD]
0	0,1840	218,58	0,1770	210,30	8,28	14,01	-5,06
1	0,1996	201,51	0,1920	193,88	7,28	13,37	-5,65
2	0,2165	218,59	0,2083	210,31	7,54	12,76	-4,76
3	0,2348	237,11	0,2260	228,13	7,80	12,17	-3,90
4	0,2547	257,19	0,2451	247,46	8,07	11,62	-3,05
5	0,2763	278,99	0,2659	268,42	8,36	11,08	-2,22
6	0,2997	302,62	0,2884	291,16	8,65	10,58	-1,40
7	0,3251	328,26	0,3128	315,83	8,95	10,09	0,20
8	0,3527	356,07	0,3393	342,59	9,27	9,63	0,99
9	0,3826	386,24	0,3681	371,61	9,59	9,19	1,76
10	0,4150	418,96	0,3992	403,10	9,93	8,77	2,53
11	0,4501	454,46	0,4331	437,25	10,28	8,37	3,30
12	0,4883	492,96	0,4698	474,29	10,64	7,98	4,06
13	0,5296	534,72	0,5096	514,47	11,01	7,62	4,82
14	0,5745	580,03	0,5527	558,06	11,39	7,27	5,57
15	0,6232	629,17	0,5996	605,34	11,79	6,94	0,20

En la Tabla 13 se observa que desde el séptimo año luego de haber implementado el cambio de topología el VAN es positivo. En 15 años existe un beneficio de USD 148,82; y un costo de USD 161,43; obteniendo un RBC de 0,979; para este caso en particular, lo cual indica que no es muy rentable aplicarlo ya que los costos exceden a los beneficios.

4.2. Segundo Caso

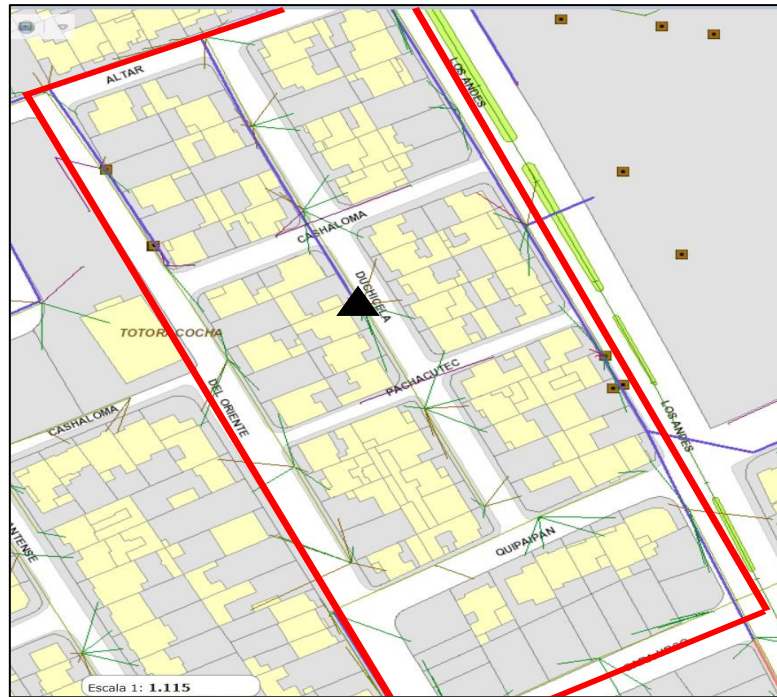


Figura 22. Grafo del sistema analizado con todos los posibles caminos

Fuente: GeoPortal CENTROSUR

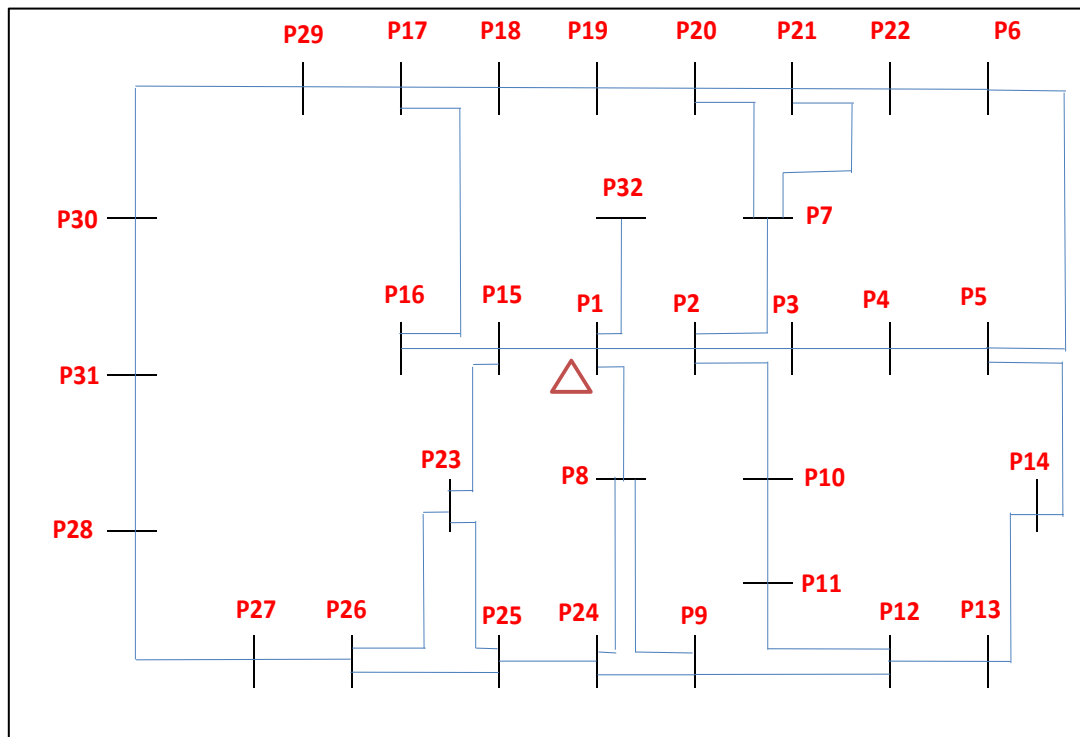


Figura 23. Grafo del sistema analizado con todos los posibles caminos

Fuente: Autores

Tabla 14. Data inicial de los posibles caminos del sistema analizado

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>L [m]</i>	<i>Usuarios</i>	<i>Configuración</i>	<i>Calibre</i>
1	2	37	12	3F4C	2/0
2	3	41	6	3F4C	2/0
3	4	28	8	3F4C	2/0
4	5	32	12	3F4C	2/0
5	6	33	4	3F4C	2/0
6	22	41	7	3F4C	2/0
2	7	65	6	3F4C	2/0
7	21	42	7	3F4C	2/0
21	22	36	7	3F4C	2/0
7	20	45	9	3F4C	2/0
2	10	39	1	3F4C	2/0
10	11	32	1	3F4C	2/0
11	12	8	4	3F4C	2/0
12	13	36	5	3F4C	2/0
13	14	29	8	3F4C	2/0
12	24	31	8	3F4C	2/0
5	14	33	8	3F4C	2/0
1	15	33	4	3F4C	2/0
15	16	21	11	3F4C	2/0
16	17	29	3	3F4C	2/0
17	18	16	1	3F4C	2/0
18	19	26	10	3F4C	2/0
19	20	49	9	3F4C	2/0
20	21	45	7	3F4C	2/0

Continúa en la siguiente página

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>L [m]</i>	<i>Usuarios</i>	<i>Configuración</i>	<i>Calibre</i>
21	22	36	7	3F4C	2/0
15	23	32	1	3F4C	2/0
23	25	33	12	3F4C	2/0
23	26	48	3	3F4C	2/0
1	8	23	1	3F4C	2/0
8	24	37	8	3F4C	2/0
24	25	36	12	3F4C	2/0
25	26	41	3	3F4C	2/0
26	27	22	1	3F4C	2/0
27	28	13	3	3F4C	2/0
27	28	44	3	3F4C	2/0
28	31	34	12	3F4C	2/0
17	29	26	8	3F4C	2/0
29	30	44	9	3F4C	2/0
30	31	43	12	3F4C	2/0
1	32	31	1	3F4C	2/0
8	9	55	6	3F4C	2/0
9	12	31	4	3F4C	2/0

4.2.1. Topología inicial para el caso 2

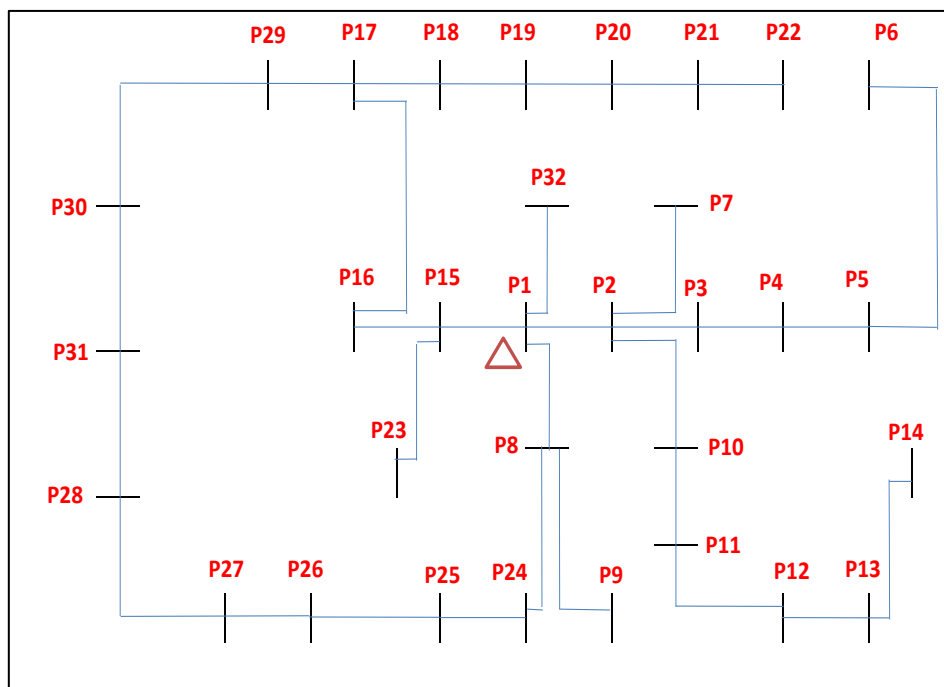


Figura 24. Grafo actual del sistema analizado

Fuente: Autores

Tabla 15. Flujo de potencia actual en el sistema analizado

Nodo i	Nodo j	L_i [m]	L_j [m]	S_i [kVA]	ΔV_{nj} [V]	ΔV_{nj} [%]
1	2	37	37	13,76012707	1,279594657	0,53316444
2	3	41	78	7,620646799	3,482926611	1,451219421
3	4	28	106	9,72186027	5,672057611	2,363357338
4	5	32	138	13,76504082	9,281816711	3,86742363
5	6	33	171	5,767963822	13,48413863	5,618391095
2	7	65	102	7,620845852	4,772782195	1,988659248
1	8	23	23	2,06000177	0,119079251	0,049616355
8	9	55	78	7,620132573	1,457203768	0,607168237
2	10	39	76	2,060345078	2,830377373	1,179323905
10	11	32	108	2,060626526	4,268644908	1,778602045

Continúa en la siguiente página

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>Li [m]</i>	<i>Lj [m]</i>	<i>Si [kVA]</i>	<i>ΔVnj [V]</i>	<i>ΔVnj [%]</i>
11	12	8	116	5,7611763	4,744096417	1,97670684
12	13	36	152	6,952581652	7,513169732	3,130487388
13	14	29	181	9,725340249	10,45345391	4,355605797
1	15	33	33	5,760019859	0,477728257	0,199053441
15	16	21	54	12,77033633	1,455776672	0,606573613
16	17	29	83	4,530800773	3,136763818	1,306984924
17	18	16	99	2,061133944	4,147183109	1,727992962
18	19	26	125	11,77308718	6,558848809	2,732853671
19	20	49	174	10,76717455	12,4317336	5,179889
20	21	45	219	8,682630014	18,81015307	7,837563778
21	22	36	255	8,689608232	24,70279197	10,29282999
15	23	32	65	2,060072101	1,10667283	0,461113679
8	24	37	60	9,720151025	1,214558814	0,506066172
24	25	36	96	13,76113601	3,525723423	1,469051426
25	26	41	137	4,532248554	6,625387954	2,760578314
26	27	22	159	2,062982889	8,403032201	3,501263417
27	28	13	172	4,534199283	9,601887915	4,000786631
17	29	26	109	9,722125297	5,279438747	2,199766145
29	30	44	153	10,76526562	10,09718399	4,207159998
30	31	43	196	13,77169082	16,2963833	6,790159709
1	32	31	31	2,060002386	0,160498269	0,066874279

Tabla 16. Totales del sistema actual analizado

<i>P [kW]</i>	<i>Q[kVAR]</i>	<i>S[kUA]</i>	<i>fp</i>
220.85	72.744	232.52	0.9498

4.2.2. Optimización de la RNA para el caso 2

Tabla 17. Respuesta de optimización de la RNA entrenada para el sistema analizado

<i>Nodo i normalizado</i>	<i>Nodo i resultante</i>
-0,00202	0,93749485
0,02920	1,90520899
0,06627	3,05429261
0,09786	4,03373815
0,12984	5,02501072
0,03215	1,99674112
0,00269	1,08332336
0,22701	8,03735885
0,03282	2,01734676
0,28212	9,8457017
0,25995	9,05841173
0,34466	11,8845099
0,38604	12,9671425
0,00150	1,04644439
0,45187	15,0079435
0,48482	16,0294913
0,52049	17,1350894
0,54901	18,0194154
0,19282	6,97756527
0,19346	6,99729411
0,64561	21,0139796
0,45115	14,9857033

Continúa en la siguiente página

<i>Nodo i</i> <i>normalizado</i>	<i>Nodo i</i> <i>resultante</i>
0,22581	8,00025498
0,70942	22,9920213
0,71021	23,0165522
0,80542	25,9678928
0,83872	27,000172
0,51649	17,0113268
0,90430	29,0332705
0,87118	28,0065782
-0,00015	0,99525656

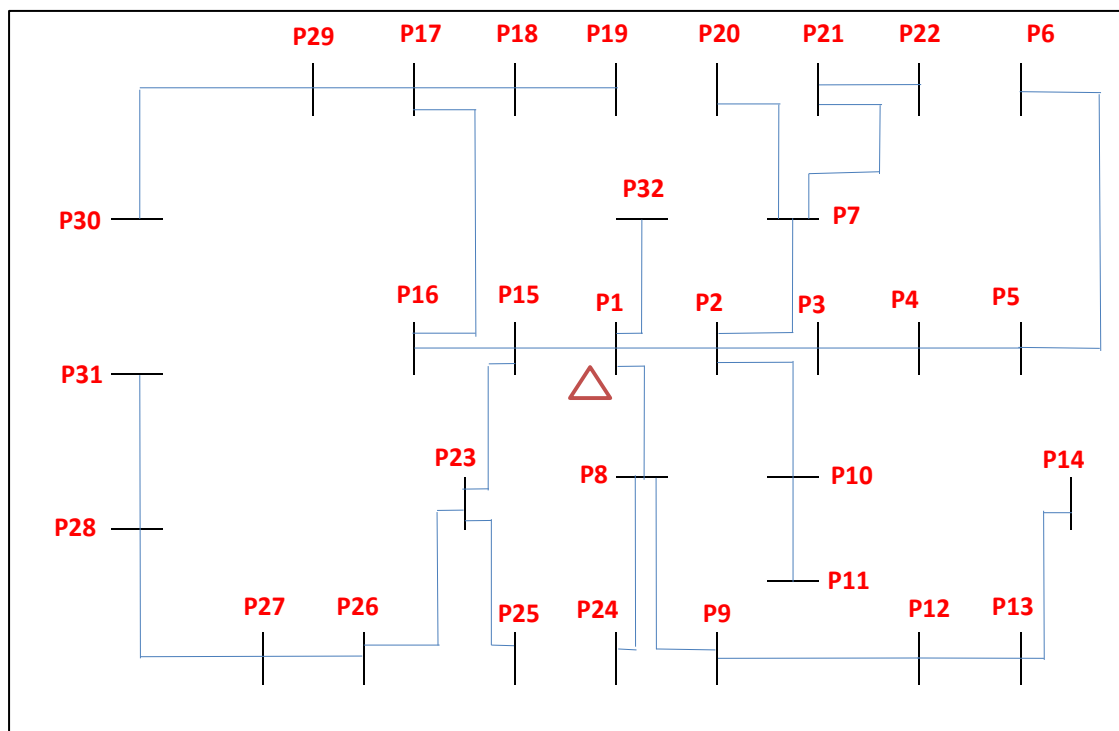


Figura 25. Grafo resultante de la RNA entrenada para el sistema analizado

Fuente: [22], [27]

Tabla 18. Flujo de potencia resultante de la RNA entrenada para el sistema analizado

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>Li [m]</i>	<i>Lj [m]</i>	<i>Si [kVA]</i>	<i>ΔVnj [V]</i>	<i>ΔVnj [%]</i>
1	2	37	37	13,76012707	1,279594657	0,53316444
2	3	41	78	7,620646799	3,482926611	1,451219421
3	4	28	106	9,72186027	5,672057611	2,363357338
4	5	32	138	13,76504082	9,281816711	3,86742363
5	6	33	171	5,767963822	13,48413863	5,618391095
2	7	65	102	7,620845852	4,772782195	1,988659248
1	8	23	23	2,06000177	0,119079251	0,049616355
8	9	55	78	7,620132573	1,457203768	0,607168237
2	10	39	76	2,060345078	2,830377373	1,179323905
10	11	32	108	2,060626526	4,268644908	1,778602045
9	12	31	109	5,760471391	2,66030295	1,108459563
12	13	36	145	6,951318943	4,686639679	1,952766533
13	14	29	174	9,723256198	7,028140124	2,928391718
1	15	33	33	5,760019859	0,477728257	0,199053441
15	16	21	54	12,77033633	1,455776672	0,606573613
16	17	29	83	4,530800773	3,136763818	1,306984924
17	18	16	99	2,061133944	4,147183109	1,727992962
18	19	26	125	11,77308718	6,558848809	2,732853671
7	20	45	147	10,76275559	8,409031364	3,503763068
7	21	42	144	8,672359718	7,945870647	3,310779436
21	22	41	185	8,675035956	11,93840286	4,974334523
15	23	32	65	2,060072101	1,10667283	0,461113679
8	24	37	60	9,720151025	1,214558814	0,506066172
23	25	33	98	13,76082791	2,89671132	1,20696305

Continúa en la siguiente página

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>Li [m]</i>	<i>Lj [m]</i>	<i>Si [kVA]</i>	<i>ΔVnj [V]</i>	<i>ΔVnj [%]</i>
23	26	48	113	4,530312652	2,596692396	1,081955165
26	27	22	135	2,060508648	3,393606359	1,414002649
27	28	13	148	4,53096337	4,012613865	1,671922444
17	29	26	109	9,722125297	5,279438747	2,199766145
29	30	44	153	10,76526562	10,09718399	4,207159998
28	31	34	182	13,76353196	6,808297626	2,836790678
1	32	31	31	2,060002386	0,160498269	0,066874279

Tabla 19. Totales del flujo de potencia resultante de la RNA entrenada para el sistema analizado

<i>P [kW]</i>	<i>Q[kVAR]</i>	<i>S[kUA]</i>	<i>fp</i>
220,82	72,660	232,471	0,94989

4.2.3. Análisis económico para el caso 2

Tabla 20. Análisis económico entre la topología existente y la proyectada por la RNA entrenada para el sistema analizado

<i>Año</i>	<i>Existente</i>		<i>Proyectado</i>		<i>Beneficio</i>	<i>Costo</i>	<i>VAN</i>
	<i>ΔP [kW]</i>	<i>KΔP [USD]</i>	<i>ΔP [kW]</i>	<i>KΔP [USD]</i>	<i>[USD]</i>	<i>[USD]</i>	<i>[USD]</i>
0	0,8039	1.584,88	0,6114	1.205,38	198,20	226,90	-28,69
1	0,8720	2.140,22	0,6632	1.627,74	279,29	216,50	62,79
2	0,9458	2.321,54	0,7194	1.765,65	289,08	206,59	82,49
3	1,0260	2.518,23	0,7803	1.915,24	299,21	197,13	102,08
4	1,1129	2.731,58	0,8464	2.077,50	309,69	188,10	121,59
5	1,2072	2.963,00	0,9181	2.253,51	320,54	179,48	141,06
6	1,3095	3.214,04	0,9959	2.444,43	331,77	171,26	160,51
7	1,4204	3.486,34	1,0803	2.651,53	343,40	163,42	179,98

Continúa en la siguiente página

<i>Año</i>	<i>Existente</i>		<i>Proyectado</i>		<i>Beneficio</i>	<i>Costo</i>	<i>VAN</i>
	ΔP [kW]	$K\Delta P$ [USD]	ΔP [kW]	$K\Delta P$ [USD]	[USD]	[USD]	[USD]
8	1,5408	3.781,71	1,1718	2.876,17	355,43	155,93	199,50
9	1,6713	4.102,10	1,2711	3.119,85	367,89	148,79	219,10
10	1,8129	4.449,64	1,3788	3.384,17	380,78	141,98	238,80
11	1,9665	4.826,63	1,4956	3.670,88	394,12	135,47	258,65
12	2,1331	5.235,55	1,6223	3.981,89	407,93	129,27	278,66
13	2,3138	5.679,11	1,7598	4.319,24	422,22	123,35	298,88
14	2,5098	6.160,26	1,9089	4.685,18	437,02	117,70	319,32
15	2,7225	6.682,17	2,0706	5.082,12	452,33	112,31	340,02

En la Tabla 20 se observa que desde el primer año luego de haber implementado el cambio de topología el VAN es positivo. En 15 años existe un beneficio de USD 5588,90; y un costo de USD 2614,15; obteniendo un RBC de 2,138; para este caso en particular, lo cual indica que es rentable aplicarlo ya que los costos no exceden al beneficio.

4.3. Tercer Caso

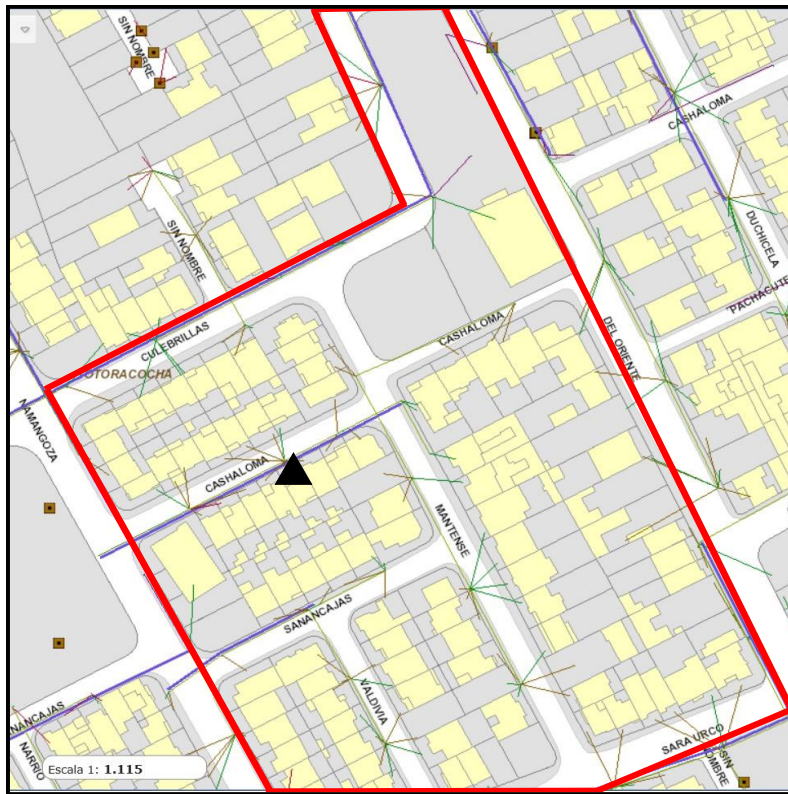


Figura 26. Zona de estudio propuesta

Fuente: GeoPortal CENTROSUR

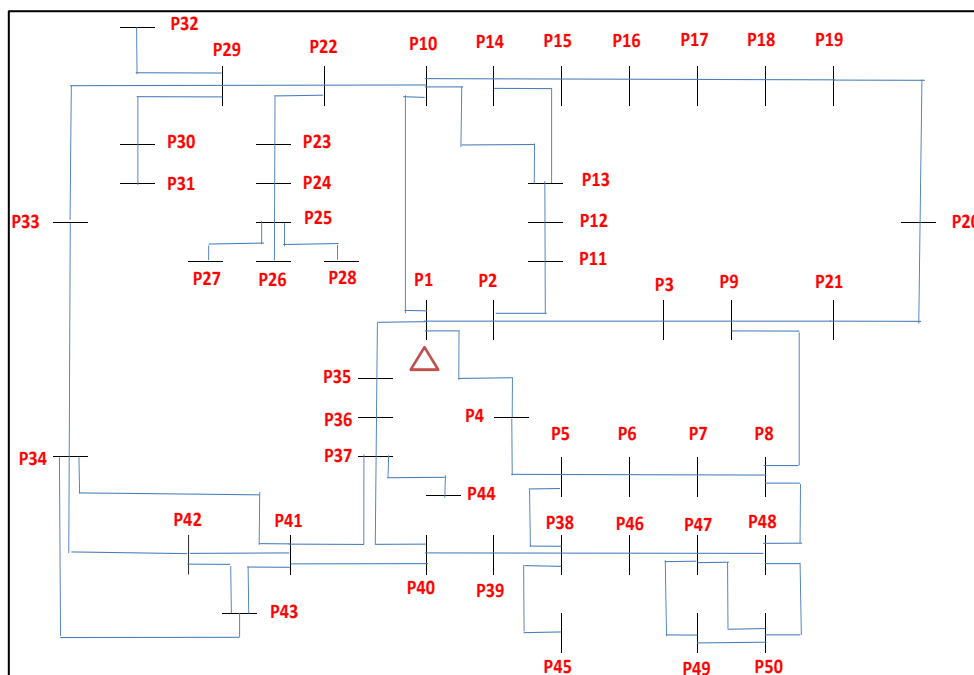


Figura 27. Grafo del sistema analizado con todos los posibles caminos

Fuente: Autores

Tabla 21. Data inicial de los posibles caminos del sistema analizado

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>L [m]</i>	<i>Usuarios</i>	<i>Configuración</i>	<i>Calibre</i>
1	2	39	12	3F4C	2/0
2	3	31	10	3F4C	2/0
3	9	49	10	3F4C	2/0
1	4	38	6	3F4C	2/0
4	5	23	3	3F4C	2/0
5	6	23	4	3F4C	2/0
6	7	21	8	3F4C	2/0
7	8	58	2	3F4C	2/0
8	9	36	10	3F4C	2/0
9	21	33	3	3F4C	2/0
1	10	33	2	3F4C	2/0
2	11	10	1	3F4C	2/0
11	12	41	1	3F4C	2/0
12	13	15	7	3F4C	2/0
13	14	32	1	3F4C	2/0
10	13	27	7	3F4C	2/0
10	14	27	1	3F4C	2/0
14	15	27	3	3F4C	2/0
15	16	17	1	3F4C	2/0
16	17	40	1	3F4C	2/0
17	18	49	4	3F4C	2/0
18	19	3	1	3F4C	2/0
19	20	27	1	3F4C	2/0
20	21	15	3	3F4C	2/0

Continúa en la siguiente página

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>L [m]</i>	<i>Usuarios</i>	<i>Configuración</i>	<i>Calibre</i>
10	22	37	1	3F4C	2/0
22	23	21	5	3F4C	2/0
23	24	33	6	3F4C	2/0
24	25	36	9	3F4C	2/0
25	26	37	6	3F4C	2/0
25	27	38	2	3F4C	2/0
25	28	58	1	3F4C	2/0
22	29	4	1	3F4C	2/0
29	30	35	4	3F4C	2/0
30	31	23	7	3F4C	2/0
29	32	24	4	3F4C	2/0
29	33	38	7	3F4C	2/0
33	34	25	2	3F4C	2/0
34	42	25	9	3F4C	2/0
34	43	35	1	3F4C	2/0
1	35	27	3	3F4C	2/0
35	36	20	7	3F4C	2/0
36	37	32	8	3F4C	2/0
37	40	24	1	3F4C	2/0
37	44	28	1	3F4C	2/0
37	41	51	3	3F4C	2/0
41	42	33	9	3F4C	2/0
41	43	42	1	3F4C	2/0
5	38	27	3	3F4C	2/0
38	39	13	2	3F4C	2/0

Continúa en la siguiente página

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>L [m]</i>	<i>Usuarios</i>	<i>Configuración</i>	<i>Calibre</i>
39	40	29	1	3F4C	2/0
40	41	37	3	3F4C	2/0
40	44	15	1	3F4C	2/0
38	45	20	3	3F4C	2/0
38	46	30	7	3F4C	2/0
46	47	28	3	3F4C	2/0
47	48	36	5	3F4C	2/0
47	49	28	1	3F4C	2/0
47	50	43	2	3F4C	2/0
48	50	37	2	3F4C	2/0
49	50	22	2	3F4C	2/0

4.3.1. Topología inicial para el caso.

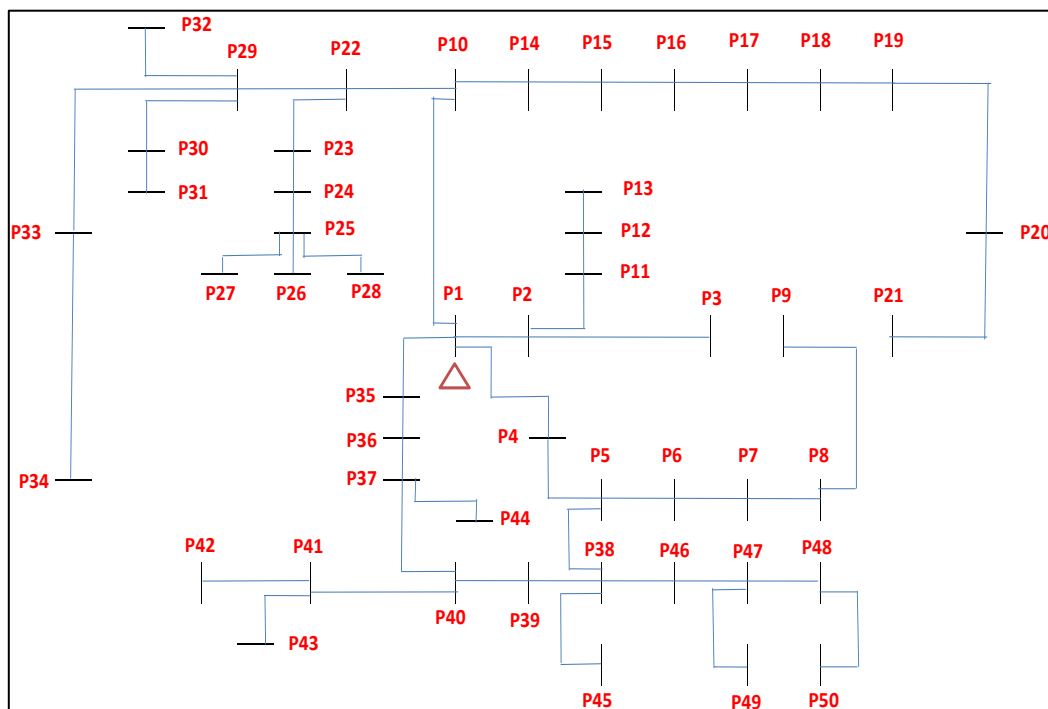


Figura 28. Grafo actual del sistema analizado

Fuente: Autores

Tabla 22. Flujo de potencia actual en el sistema analizado.

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>Li [m]</i>	<i>Lj [m]</i>	<i>Si [kVA]</i>	<i>Sj [kVA]</i>	ΔV_{nj} [V]	ΔV_{nj} [%]
1	2	39	39	13,76013394	13,76013394	1,3487	0,5619
2	3	31	70	11,77082766	25,53096158	3,3380	1,3908
1	4	38	38	7,620040021	7,620040021	0,7277	0,3032
4	5	23	61	4,530163344	12,15020336	1,4301	0,5958
5	6	23	84	5,760488801	17,91069214	2,4655	1,0273
6	7	21	105	9,721454372	27,63214644	3,9241	1,6350
7	8	58	163	3,292829985	30,92497455	8,4336	3,5140
8	9	36	199	11,77658541	42,70155855	12,2993	5,1247
1	10	33	33	3,290006479	3,290006479	0,2728	0,1136
2	11	10	49	2,060222468	15,82035639	1,7463	0,7276
11	12	41	90	2,060522064	17,88087835	3,5891	1,4954
12	13	15	105	8,671342921	26,5522212	4,5902	1,9126
10	14	27	60	2,06003115	5,350037629	0,6359	0,2649
14	15	27	87	4,530154048	9,880191674	1,3063	0,5443
15	16	17	104	2,060268982	11,94046063	1,8166	0,7569
16	17	40	144	2,060512131	14,00097268	3,2243	1,3434
17	18	49	193	5,761367511	19,76234008	5,6586	2,3577
18	19	3	196	2,061694677	21,82403379	5,8232	2,4263
19	20	27	223	2,062310467	23,88634254	7,4450	3,1021
20	21	15	238	4,533489452	28,41983099	8,5172	3,5488
10	22	37	70	2,060036342	5,350042821	0,7703	0,3209
22	23	21	91	6,950249734	12,30029255	1,4196	0,5915
23	24	33	124	7,620892677	19,9211852	3,0720	1,2800
24	25	36	160	10,76273304	30,683918	5,8489	2,4370

Continúa en la siguiente página

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>Li [m]</i>	<i>Lj [m]</i>	<i>Si [kVA]</i>	<i>Sj [kVA]</i>	$\Delta V_{nj} [V]$	$\Delta V_{nj} [\%]$
25	26	37	197	7,625247737	38,3091637	9,4131	3,9221
25	27	38	198	3,294151655	33,9780656	9,0956	3,7898
25	28	58	218	2,064249606	32,7481601	10,6251	4,4271
22	29	4	74	2,060073703	7,41011652	0,8448	0,3520
29	30	35	109	5,760342961	13,1704595	2,0034	0,8347
30	31	23	132	8,671142331	21,8416018	3,2662	1,3609
29	32	24	98	5,760308347	13,1704249	1,6393	0,6830
29	33	38	112	8,670525341	16,0806419	2,3807	0,9919
33	34	25	137	3,290932756	19,3715744	3,5981	1,4992
1	35	27	27	4,53001005	4,53001005	0,3074	0,1280
35	36	20	47	8,670148543	13,2001586	0,9709	0,4045
36	37	32	79	9,720752862	22,9209114	2,8144	1,1727
5	38	27	88	4,530444163	16,6806475	2,5621	1,0675
38	39	13	101	3,290730848	19,9713783	3,2147	1,3394
39	40	29	130	2,061145282	22,0325231	4,8209	2,0087
40	41	37	167	4,532138591	26,5646612	7,2921	3,0383
41	42	33	200	10,76505756	37,329718	10,3898	4,3291
41	43	42	209	2,063111658	28,6277693	10,3157	4,2982
37	44	28	107	2,061211986	24,9821228	4,5728	1,9053
38	45	20	108	4,530881546	21,211529	3,6285	1,5118
38	46	30	118	8,671375841	25,3520233	4,4739	1,8641
46	47	28	146	4,532366285	29,8843888	6,5776	2,7406
47	48	36	182	6,954482959	36,8388703	9,9123	4,1301
47	49	28	174	2,063226425	31,9476112	8,8269	3,6778
48	50	37	219	3,29641156	40,1352727	13,6475	5,6864

Tabla 23. Totales del sistema actual analizado

<i>P [kW]</i>	<i>Q[kVAR]</i>	<i>S[kVA]</i>	<i>fp</i>
252,95	83,2629	266,3087	0,94986

4.3.2. Optimización de la RNA para el caso 3

Tabla 24. Respuesta de optimización de la RNA entrenada para el sistema analizado

<i>Nodo i normalizado</i>	<i>Nodo i resultante</i>
0,00078	1,03843
0,01944	1,95260
0,00056	1,02745
0,06006	3,94288
0,08271	5,05263
0,10062	5,93062
0,12188	6,97197
0,04123	3,02027
-0,00302	0,85199
0,01735	1,85037
0,20835	11,10932
0,18412	10,02184
0,17838	9,84081
0,26889	14,17563
0,29511	15,26016
0,30399	15,89538
0,32761	17,05287
0,34737	18,02103

Continúa en la siguiente página

<i>Nodo i</i> <i>normalizado</i>	<i>Nodo i</i> <i>resultante</i>
0,36799	19,03165
0,38810	20,01704
0,18621	10,12451
0,42962	22,05137
0,45839	23,26105
0,46901	23,98147
0,48984	25,00208
0,48928	24,97449
0,49060	25,03938
0,43022	22,08093
0,56616	28,84175
0,58945	29,88317
0,57449	29,14994
0,56791	28,82772
0,64576	32,84237
-0,00026	0,98747
0,69450	35,03029
0,71402	35,98697
0,08172	5,00436
0,75302	37,89787
0,74011	37,16526
0,73671	37,09877
0,67352	34,00250
0,67182	33,91915

Continúa en la siguiente página

<i>Nodo i</i> <i>normalizado</i>	<i>Nodo i</i> <i>resultante</i>
0,73290	36,91216
0,75467	37,97904
0,75583	38,03548
0,91557	45,86297
0,93917	47,01946
0,93997	47,05877
0,93855	46,98873

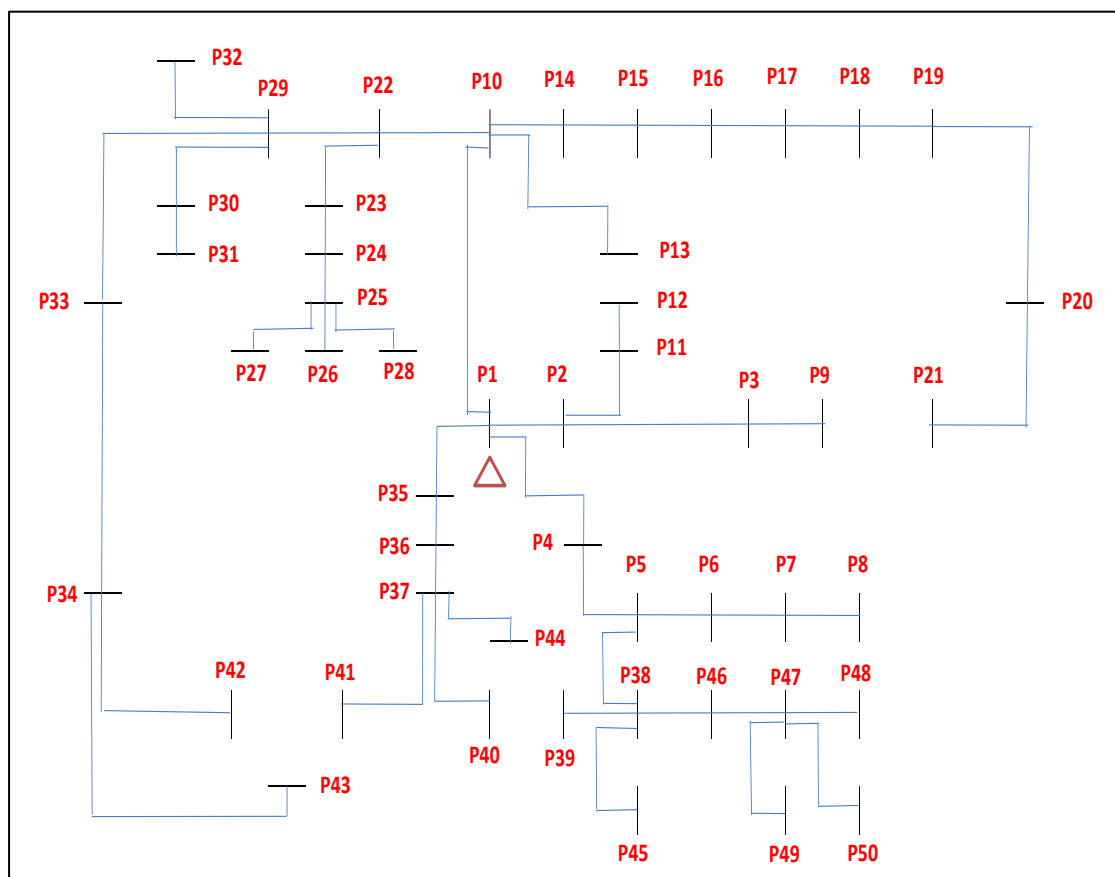


Figura 29. Grafo resultante de la RNA para el sistema analizado

Fuente: [22], [27]

Tabla 25. Flujo de potencia resultante de la RNA entrenada para el sistema analizado

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>Li [m]</i>	<i>Lj [m]</i>	<i>Si [kVA]</i>	<i>Sj [kVA]</i>	ΔV_{nj} [V]	ΔV_{nj} [%]
1	2	39	39	13,76013394	13,7601339	1,3487	0,5619
2	3	31	70	11,77082766	25,5309616	3,3380	1,3908
1	4	38	38	7,620040021	7,62004002	0,7277	0,3032
4	5	23	61	4,530163344	12,1502034	1,4301	0,5958
5	6	23	84	5,760488801	17,9106921	2,4655	1,0273
6	7	21	105	9,721454372	27,6321464	3,9241	1,6350
7	8	58	163	3,292829985	30,9249745	8,4336	3,5140
3	9	49	119	11,77300443	37,3039656	7,9330	3,3054
1	10	33	33	3,290006479	3,29000648	0,2728	0,1136
2	11	10	49	2,060222468	15,8203564	1,7463	0,7276
11	12	41	90	2,060522064	17,8808784	3,5891	1,4954
10	13	27	60	8,670155676	11,9601622	1,0844	0,4518
10	14	27	60	2,06003115	5,35003763	0,6359	0,2649
14	15	27	87	4,530154048	9,88019167	1,3063	0,5443
15	16	17	104	2,060268982	11,9404606	1,8166	0,7569
16	17	40	144	2,060512131	14,0009727	3,2243	1,3434
17	18	49	193	5,761367511	19,7623401	5,6586	2,3577
18	19	3	196	2,061694677	21,8240338	5,8232	2,4263
19	20	27	223	2,062310467	23,8863425	7,4450	3,1021
20	21	15	238	4,533489452	28,419831	8,5172	3,5488
10	22	37	70	2,060036342	5,35004282	0,7703	0,3209
22	23	21	91	6,950249734	12,3002926	1,4196	0,5915
23	24	33	124	7,620892677	19,9211852	3,0720	1,2800
24	25	36	160	10,76273304	30,683918	5,8489	2,4370

Continúa en la siguiente página

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>Li [m]</i>	<i>Lj [m]</i>	<i>Si [kVA]</i>	<i>Sj [kVA]</i>	ΔV_{nj} [V]	ΔV_{nj} [%]
25	26	37	197	7,625247737	38,3091637	9,4131	3,9221
25	27	38	198	3,294151655	33,9780656	9,0956	3,7898
25	28	58	218	2,064249606	32,7481601	10,6251	4,4271
22	29	4	74	2,060073703	7,41011652	0,8448	0,3520
29	30	35	109	5,760342961	13,1704595	2,0034	0,8347
30	31	23	132	8,671142331	21,8416018	3,2662	1,3609
29	32	24	98	5,760308347	13,1704249	1,6393	0,6830
29	33	38	112	8,670525341	16,0806419	2,3807	0,9919
33	34	25	137	3,290932756	19,3715744	3,5981	1,4992
1	35	27	27	4,53001005	4,53001005	0,3074	0,1280
35	36	20	47	8,670148543	13,2001586	0,9709	0,4045
36	37	32	79	9,720752862	22,9209114	2,8144	1,1727
5	38	27	88	4,530444163	16,6806475	2,5621	1,0675
38	39	13	101	3,290730848	19,9713783	3,2147	1,3394
37	40	24	103	2,061166647	24,9820775	4,3216	1,8006
37	41	51	130	4,531777788	27,4526887	6,3340	2,6391
34	42	25	162	10,76266893	30,1342432	5,4920	2,2883
34	43	35	172	2,061434163	21,4330079	5,4840	2,2850
37	44	28	107	2,061211986	24,9821228	4,5728	1,9053
38	45	20	108	4,530881546	21,211529	3,6285	1,5118
38	46	30	118	8,671375841	25,3520233	4,4739	1,8641
46	47	28	146	4,532366285	29,8843888	6,5776	2,7406
47	48	36	182	6,954482959	36,8388703	9,9123	4,1301
47	49	28	174	2,063226425	31,9476112	8,8269	3,6778
47	50	43	189	3,293778106	33,1781638	10,1650	4,2354

Tabla 26. Totales del flujo de potencia resultante de la RNA entrenada para el sistema analizado

<i>P [kW]</i>	<i>Q[kVAR]</i>	<i>S[kVA]</i>	<i>fp</i>
252,95	83,2430	266,2969	0,9498

4.3.3. Análisis económico para el caso 3

Tabla 27. Análisis económico entre la topología existente y la proyectada por la RNA entrenada para el sistema analizado

<i>Año</i>	<i>Existente</i>		<i>Proyectado RNA</i>		<i>Beneficio</i>	<i>Costo</i>	<i>VAN</i>
	<i>ΔP [kW]</i>	<i>KΔP [USD]</i>	<i>ΔP [kW]</i>	<i>KΔP [USD]</i>	<i>[USD]</i>	<i>[USD]</i>	<i>[USD]</i>
0	1,1263	2.318,06	1,1071	2.278,54	39,52	33,93	5,58
1	1,2217	3.300,47	1,2009	3.244,20	53,69	32,38	21,31
2	1,3252	3.580,09	1,3026	3.519,06	55,57	30,90	24,67
3	1,4375	3.883,41	1,4130	3.817,20	57,52	29,48	28,04
4	1,5593	4.212,42	1,5327	4.140,60	59,53	28,13	31,40
5	1,6914	4.569,30	1,6626	4.491,41	61,62	26,84	34,78
6	1,8347	4.956,42	1,8034	4.871,93	63,78	25,61	38,16
7	1,9901	5.376,34	1,9562	5.284,69	66,01	24,44	41,57
8	2,1587	5.831,84	2,1219	5.732,42	68,33	23,32	45,01
9	2,3416	6.325,93	2,3017	6.218,08	70,72	22,25	48,47
10	2,5400	6.861,87	2,4967	6.744,89	73,20	21,23	51,96
11	2,7552	7.443,23	2,7083	7.316,33	75,76	20,26	55,50
12	2,9887	8.073,83	2,9377	7.936,19	78,42	19,33	59,08
13	3,2419	8.757,87	3,1866	8.608,56	81,17	18,45	62,72
14	3,5165	9.499,85	3,4566	9.337,90	84,01	17,60	66,41
15	3,8144	10.304,70	3,7494	10.129,03	86,95	16,80	70,16

En la Tabla 27 se observa que desde la implementación del cambio de topología el VAN es positivo. En 15 años existe un beneficio de USD 1075,78; y un costo de USD

390,95; dando un RBC de 2,752; para este caso en particular, lo cual indica que es rentable aplicarlo ya que los costos no exceden al beneficio.

4.3.4. Optimización método ACO para el caso 3

Se analiza la optimización mediante el método ACO, para este caso, con el fin de comparar la eficiencia entre ambos métodos.

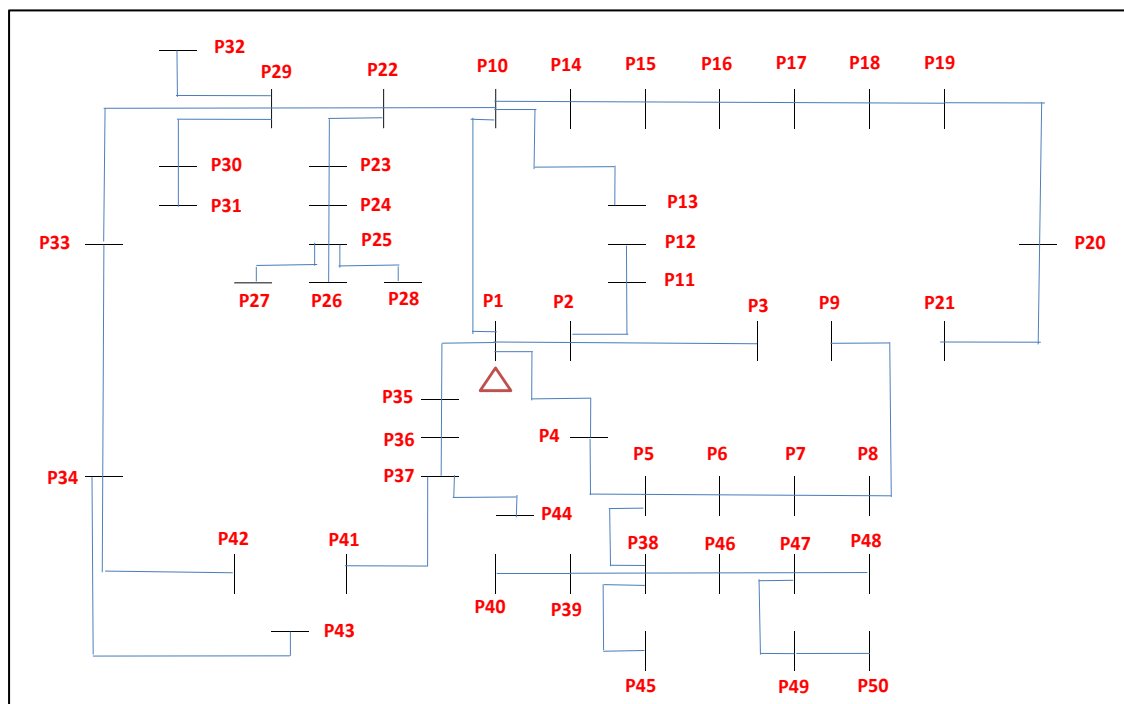


Figura 30. Optimización mediante el método ACO para el sistema analizado

Fuente: [22], [27]

Tabla 28. Flujo de potencia resultante mediante el método ACO para el sistema analizado

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>Li [m]</i>	<i>Lj [m]</i>	<i>Si [kVA]</i>	<i>Sj [kVA]</i>	ΔV_{nj} [V]	ΔV_{nj} [%]
1	2	39	39	13,76013	13,76013	1,3487	0,5619
2	3	31	70	11,77083	25,53096	3,3380	1,3908
1	4	38	38	7,62004	7,62004	0,7277	0,3032
4	5	23	61	4,530163	12,1502	1,4301	0,5
5	6	23	84	5,760489	17,91069	2,4655	1,0273

Continúa en la siguiente página

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>Li [m]</i>	<i>Lj [m]</i>	<i>Si [kVA]</i>	<i>Sj [kVA]</i>	$\Delta V_{nj} [V]$	$\Delta V_{nj} [\%]$
7	8	58	163	3,29283	30,92497	8,4336	3,5140
8	9	36	199	11,77659	42,70156	12,2993	5,1247
1	10	33	33	3,290006	3,290006	0,2728	0,1136
2	11	10	49	2,060222	15,82036	1,7463	0,7276
11	12	41	90	2,060522	17,88088	3,5891	1,4954
10	13	27	60	8,670156	11,96016	1,0844	0,45187
10	14	27	60	2,060031	5,350038	0,6359	0,2649
14	15	27	87	4,530154	9,880192	1,3063	0,5443
15	16	17	104	2,060269	11,94046	1,8166	0,7569
16	17	40	144	2,060512	14,00097	3,2243	1,3434
17	18	49	193	5,761368	19,76234	5,6586	2,3577
18	19	3	196	2,061695	21,82403	5,8232	2,4263
19	20	27	223	2,06231	23,88634	7,4450	3,1021
20	21	15	238	4,533489	28,41983	8,5172	3,5488
10	22	37	70	2,060036	5,350043	0,7703	0,3209
22	23	21	91	6,95025	12,30029	1,4196	0,5915
23	24	33	124	7,620893	19,92119	3,0720	1,2800
24	25	36	160	10,76273	30,68392	5,8489	2,4370
25	26	37	197	7,625248	38,30916	9,4131	3,9221
25	27	38	198	3,294152	33,97807	9,0956	3,7898
25	28	58	218	2,06425	32,74816	10,6251	4,4271
22	29	4	74	2,060074	7,410117	0,8448	0,3520
29	30	35	109	5,760343	13,17046	2,0034	0,8347
30	31	23	132	8,671142	21,8416	3,2662	1,3609
29	32	24	98	5,760308	13,17042	1,6393	0,6830

Continúa en la siguiente página

<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	<i>Li [m]</i>	<i>Lj [m]</i>	<i>Si [kVA]</i>	<i>Sj [kVA]</i>	ΔV_{nj} [V]	ΔV_{nj} [%]
29	33	33	112	8,670525341	16,08064	2,3807	0,9919
33	34	10	137	3,290932756	19,37157	3,5981	1,4992
1	35	41	27	4,53001005	4,53001	0,3074	0,1280
35	36	27	47	8,670148543	13,20016	0,9709	0,4045
36	37	27	79	9,720752862	22,92091	2,814492	1,1727
5	38	27	88	4,530444163	16,68065	2,5621	1,0675
38	39	17	101	3,290730848	19,97138	3,2147	1,3394
39	40	40	130	2,061145282	22,03252	4,8209	2,0087
37	41	49	130	4,531777788	27,45269	6,3340	2,6391
34	42	3	162	10,76266893	30,13424	5,4920	2,2883
34	43	27	172	2,061434163	21,43301	5,4840	2,2850
37	44	15	107	2,061211986	24,98212	4,5728	1,9053
38	45	37	108	4,530881546	21,21153	3,6285	1,5118
38	46	21	118	8,671375841	25,35202	4,4739	1,8641
46	47	33	146	4,532366285	29,88439	6,5776	2,7406
47	48	36	182	6,954482959	36,83887	9,9123	4,1301
47	49	37	174	2,063226425	31,94761	8,8269	3,6778
49	50	38	196	3,294421539	35,24203	10,7769	4,4903

Tabla 29. Totales del flujo de potencia resultante mediante el método ACO para el sistema analizado

<i>P [kW]</i>	<i>Q[kVAR]</i>	<i>S[kVA]</i>	<i>fp</i>
252,9540	83,2501	266,3011	0,9498

Tabla 30. Análisis económico entre la topología existente y la proyectada por el método ACO para el sistema analizado

Año	Existente		Proyectado ACO		Beneficio	Costo	VAN
	ΔP [kW]	KAP [USD]	ΔP [kW]	KAP [USD]	[USD]	[USD]	[USD]
0	1,1263	2.318,06	1,1079	2.280,19	37,87	32,58	5,30
1	1,2217	3.300,47	1,2018	3.246,54	51,45	31,08	20,37
2	1,3252	3.580,09	1,3036	3.521,60	53,26	29,66	23,60
3	1,4375	3.883,41	1,4140	3.819,96	55,12	28,30	26,82
4	1,5593	4.212,42	1,5338	4.143,59	57,06	27,01	30,05
5	1,6914	4.569,30	1,6638	4.494,65	59,05	25,77	33,29
6	1,8347	4.956,42	1,8047	4.875,44	61,12	24,59	36,54
7	1,9901	5.376,34	1,9576	5.288,50	63,27	23,46	39,80
8	2,1587	5.831,84	2,1235	5.736,56	65,48	22,39	43,09
9	2,3416	6.325,93	2,3034	6.222,57	67,78	21,36	46,41
10	2,5400	6.861,87	2,4985	6.749,76	70,15	20,38	49,77
11	2,7552	7.443,23	2,7102	7.321,62	72,61	19,45	53,16
12	2,9887	8.073,83	2,9398	7.941,92	75,15	18,56	56,60
13	3,2419	\$8.757,87	3,1889	8.614,78	\$77,79	17,71	60,08
14	3,5165	\$9.499,85	3,4591	9.344,64	80,51	16,90	63,62
15	3,8144	\$10.304,70	3,7521	10.136,34	83,33	16,12	67,21

En la Tabla 30 se observa que desde la implementación del cambio de topología el VAN es positivo. En 15 años existe un beneficio de USD 1031,02; y un costo USD 375,31; obteniendo un RBC de 2,747; para este caso en particular., lo cual indica que es rentable aplicarlo ya que los costos no exceden al beneficio.

CAPÍTULO 5

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Análisis de resultados en cambios de topología para los casos de estudio con la RNA

5.1.1. Análisis del cambio de topología para el sistema del caso 1

En la Tabla 31, se presenta los cambios resultantes al momento de utilizar la RNA con respecto al sistema actual del caso 1, donde se puede observar dos variaciones de topología. Estas variaciones son justificadas por la reducción de las caídas de voltaje porcentual en los nodos de recepción n_j .

Tabla 31. Comparación de caídas de voltaje porcentual en función de los cambios de topología por la RNA para el sistema analizado

<i>Existente</i>			<i>Proyectado RNA</i>		
<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	$\Delta V_{nj} [\%]$	<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	$\Delta V_{nj} [\%]$
11	12	3,791307224	1	12	0,280821131
19	20	10,6958931	5	20	7,828905167

5.1.2. Análisis del cambio de topología para el sistema del caso 2

En la Tabla 32, se presenta los cambios resultantes al momento de utilizar la RNA con respecto al sistema actual del caso 2, donde se puede observar seis variaciones de topología, lo cual implica un cambio en las caídas de voltaje porcentual de once nodos de recepción n_j , incluyendo los mencionados anteriormente.

Tabla 32. Comparación de caídas de voltaje porcentual en función de los cambios de topología por la RNA para el sistema analizado

<i>Existente</i>			<i>Proyectado RNA</i>		
<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	$\Delta V_{nj} [\%]$	<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	$\Delta V_{nj} [\%]$
11	12	1,97670684	9	12	1,108459563
12	13	3,130487388	12	13	1,952766533
13	14	4,355605797	13	14	2,928391718
19	20	5,179889	7	20	3,503763068
20	21	7,837563778	7	21	3,310779436
21	22	10,29282999	21	22	4,974334523
24	25	1,469051426	23	25	1,20696305
25	26	2,760578314	23	26	1,081955165
26	27	3,501263417	26	27	1,414002649
27	28	4,000786631	27	28	1,671922444
30	31	6,790159709	28	31	2,836790678

5.1.3. Análisis del cambio de topología para el sistema del caso 3

En la Tabla 33, se presenta los cambios resultantes al momento de utilizar la RNA con respecto al sistema actual del caso 3, donde se puede observar siete variaciones de topología. Estas variaciones son justificadas por la reducción de las caídas de voltaje porcentual en los nodos de recepción n_j .

Tabla 33. Comparación de caídas de voltaje porcentual en función de los cambios de topología por la RNA para el sistema analizado

<i>Existente</i>			<i>Proyectado RNA</i>		
<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	$\Delta V_{nj} [\%]$	<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	$\Delta V_{nj} [\%]$
8	9	5,124723853	3	9	3,305455665
12	13	1,912613221	10	13	0,451870135
39	40	2,008738676	37	40	1,800681852
40	41	3,038397762	37	41	2,639172119
41	42	4,329120189	34	42	2,288368529
41	43	4,298225037	34	43	2,285014901
48	50	5,686489085	47	50	4,235434721

5.2. Análisis de resultados en cambios de topología para el caso 3 de estudio entre la RNA y ACO

En la Tabla 34, se presenta la comparación entre el método de optimización ACO y la RNA. La optimización realizada por la RNA tiene variaciones tanto con el sistema actual como con el ACO.

Algunos nodos de envío del método ACO coinciden con la respuesta de la RNA, dado que esta fue entrenada en base a este modelo, sin embargo, por el aprendizaje de otros casos la RNA ha provisto otros cambios de topología, demostrando así que el sistema actual puede ser mejor optimizado, que solo aplicando el modelo ACO.

Tabla 34. Comparación de caídas de voltaje porcentual en función de los cambios de topología entre la RNA y el método ACO para el sistema actual analizado

<i>Existente</i>			<i>Proyectado RNA</i>			<i>Proyectado ACO</i>		
<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	$\Delta V_{nj} [\%]$	<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	$\Delta V_{nj} [\%]$	<i>Nodo i</i>	<i>Nodo j</i>	$\Delta V_{nj} [\%]$
8	9	5,1247	3	9	3,3054	-	-	-
12	13	1,9126	10	13	0,4518	-	-	-
39	40	2,0087	37	40	1,8006	-	-	-
40	41	3,0383	37	41	2,6391	37	41	2,6391
41	42	4,3291	34	42	2,2883	34	42	2,2883
41	43	4,2982	34	43	2,2850	34	43	2,2850
48	50	5,6864	47	50	4,2354	49	50	4,4903

5.3. Análisis Económico para los casos de estudio

Realizar un cambio de topología implica hacer un análisis económico teniendo en cuenta el costo de inversión y el beneficio que este va a representar en cierto periodo de tiempo. En este proyecto de investigación se ha realizado un análisis económico que representan dichos cambios de topología en función de lo obtenido por la RNA, en un periodo de 15 años.

Para el caso 1, se debe tener en cuenta que este sistema se encuentra en una zona urbana cerca del centro histórico de la ciudad, donde los nodos (postes), ya se encuentran optimizados en su construcción, por ende, el RBC en 15 años no es significativo como se puede observar en la Tabla 35.

Además, se determina que para los casos 2 y 3, RBC es más significativo, debido a que estos sistemas no se encuentran optimizados de la mejor manera. Por lo que la aplicación de la optimización de la RNA es recomendable.

Tabla 35. RBC al aplicar la RNA entrenada en los casos de estudio

<i>Caso1</i>	<i>Caso2</i>	<i>Caso3</i>
0,979	2,138	2,752

Dado que en el caso 3 se ha realizado un análisis económico tanto con la aplicación del método ACO como con la RNA, se presenta en la Tabla 36 los resultados, demostrando que la topología conseguida por la RNA tiene un mayor beneficio, por lo que ratifica su aplicación.

Tabla 36. Comparación del RBC para el caso 3 entre la RNA y el ACO

<i>Caso3 con RNA</i>	<i>Caso3 con ACO</i>
2,752	2,747

Analizando algunos de los cambios de topología resultantes de la RNA individualmente y utilizando el modelo RBC los resultados se reflejan en la Tabla 37.

Tabla 37. RBC en los nodos de recepción para el sistema del caso 3 analizado

<i>Nodo j</i>	<i>Costo [USD]</i>	<i>Beneficio [USD]</i>	<i>RBC</i>
13	4,35	10,57	2,43
42	7	22,13	3,16
43	7,12	15,59	2,19
50	6,05	24,61	4,06

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones

- El desarrollo óptimo de una RNA depende de la arquitectura y su método de aprendizaje, dentro del cual se tiene en cuenta el número de capas y número de neuronas por capa, si se excediese uno de estos dos parámetros se puede generar un sobre entrenamiento, lo que perjudicaría a la predicción de la RNA, demostrado en la implementación para esta investigación.
- Para esta investigación se utiliza una capa oculta con 35 neuronas y una capa de salida con 1 neurona, ya que, en pruebas, al incrementar el número de capas provoca que el error cuadrático se incremente. Mientras que al aumentar el número de neuronas con las capas mencionadas anteriormente el error cuadrático no tiene una variación significativa. Para aplicaciones con RNA se recomienda usar una capa oculta ya que esta es capaz de solucionar cualquier tipo de topología, como se ha utilizado en los casos de estudio de esta investigación.
- El patrón de entrenamiento (target) requiere ser lo suficientemente amplio, para así poder abarcar la mayor cantidad de escenarios posibles, en el caso de esta investigación se utilizaron en total 50 escenarios, para 3 sectores en la ciudad de Cuenca dentro de un sistema de distribución de bajo voltaje. Para que la RNA tenga mayor precisión en sus predicciones por cambios de topología de un sistema. El “target” se obtuvo mediante el método de optimización de colonia de hormigas (ACO).

- La aplicación de la optimización mediante una RNA es factible, dado que al momento de realizar cambios de topología las pérdidas técnicas por caída de voltaje y transporte de energía han sido reducidas en valores significativos con respecto a los sistemas actuales de estudio y también a las respuestas obtenidas por el método de optimización ACO.
- La instauración de la topología resultante de la RNA se la realiza siempre y cuando el análisis económico represente un ahorro considerable para la empresa distribuidora de energía en un periodo de tiempo mínimo de 15 años, que generalmente es la vida útil de los elementos que conforma un sistema eléctrico de distribución.
- En la actualidad existen diferentes métodos de optimización de topologías para sistemas de distribución, como lo son ACO, Dijkstra, entre otros. Mediante esta investigación se ha podido comprobar que la aplicación de una RNA para este objetivo es satisfactoria reduciendo pérdidas técnicas y generando beneficios económicos para la empresa distribuidora de energía.

6.2. Recomendaciones

- La efectividad de la respuesta de la RNA depende específicamente de la base de datos con la que se entrene, esta debe ser lo suficientemente amplia, con la mayor cantidad de escenarios posibles, con el fin de que la RNA aprenda y mejore sus predicciones.
- Para realizar la aplicación de cualquier RNA, indistintamente el objetivo que esta tenga se debe contar con equipos lo suficientemente capaces de soportar un tiempo de trabajo intenso y evitar la saturación de la memoria del CPU. Las características mínimas que esta debe tener son 8Gb de memoria RAM, un disco duro SSD o HDD de mínimo 256Gb de almacenamiento y un procesador Intel Core i5 o superior.

- Se propone entrenar la RNA para el cambio de topología en zonas rurales, caídas de voltaje de 4.5%, con el fin de analizar su efectividad y análisis económico en estas zonas las cuales se prevé una mejor optimización respecto a zonas urbanas conforme a lo establecido en la normativa interna de la empresa eléctrica regional CENTROSUR.
- La información utilizada de la plataforma de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A debe ser la más actual posible, reduciendo los tiempos de análisis de la información del sistema y evitando errores en la base de datos para la RNA.
- Un trabajo futuro en base a este proyecto de investigación podría ser la implementación del crecimiento de la demanda en la base de datos de la RNA, siempre y cuando esta solo se enfoque en predicción mas no en cambios para el corto plazo.
- Se puede implementar una RNA bajo el criterio de pérdidas de potencia con el método ACO, esta debe ser diferente a la creada en este proyecto de investigación dado que, si se entrenase la RNA realizada, bajo este criterio presentaría confusiones en sus predicciones.

Lista de Referencias

- [1] W. S. Alaloul, M. S. Liew, N. A. Wan Zawawi, B. S. Mohammed, and M. Adamu, “An Artificial neural networks (ANN) model for evaluating construction project performance based on coordination factors,” *Cogent Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 1–18, 2018.
- [2] D. A. Asfani et al., “The modelling of low voltage arc flash based on artificial neural network,” *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, vol. 14, no. 4, pp. 1389–1405, 2018.
- [3] S. Moshrefi, K. Shahriar, A. Ramezanzadeh, and K. Goshtasbi, “Prediction of ultimate strength of shale using artificial neural network,” *Shahrood Univ. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 91–105, 2018.
- [4] A. Santiesteban Velázquez, J. Osvaldo, N. González, D. R. Peña, and D. J. García, “Pronostico De Consumo De Energía Eléctrica Usando Redes Neuronales Artificiales,” *Tlatemoani*, no. 16, pp. 19–28, 2014.
- [5] E. Soria and A. Blanco, “Redes neuronales artificiales,” *Autores Científicos Técnicos y Académicos*, pp. 25–33, 2018.
- [6] A. Flores, “Redes neuronales como sistemas complejos adaptativos,” *Encuentros en la Biología*, vol. 4, no. 135, pp. 53–54, 2011.
- [7] F. Arevalo and A. Moscoso, “Optimización de transformadores en función de su perfil y crecimiento de la demanda,” 2016.
- [8] A. Lastre, E. Mendéz, and A. Cordovéz, “Redes Neuronales Artificiales para la predicción de flujos de carga en subestaciones eléctricas.,” in *Cibernética e Informática*, 2016, no. CISCI, pp. 44–49.
- [9] G. Sanjinés and J. Aliaga, “Análisis y pronóstico de la demanda de potencia eléctrica en Bolivia: Una aplicación de redes neuronales,” 2010.
- [10] J. Moreno, “Diseño de una Red Neuronal para la predicción de valores del diagrama de Moody,” 2017.
- [11] J. Zepeda, A. Aguilar, Á. Hernández, and M. Salgado, “Metodología para determinar la topología , patrones de parámetros eléctricos y entrenamiento de una Red Neuronal Artificial para un control inteligente .,” vol. 5, no. 1, pp. 103–113, 2015.

- [12] R. A. Hincapié, “Aplicación de redes neuronales artificiales en la protección de distancia en líneas de transmisión,” *Scientia et Technica*, vol. 10, no. 24, pp. 97–102, 2004.
- [13] D. J. Matich, “Redes neuronales: Conceptos básicos y aplicaciones.,” in *Informatica Aplicada a la Ingenieria de Procesos*, 2001, pp. 1–55.
- [14] E. Andrade, “Estudio de los principales tipos de redes neuronales y las herramientas para su aplicación,” 2013.
- [15] J. Castillo-calderón, B. Solórzano-castillo, and J. Moreno-moreno, “Design of a Neural Network for the Prediction of the coefficient of Primary Losses in Turbulent Flow Regime,” pp. 21–27, 2018.
- [16] D. López, “Diseño y construcción de una Red Neuronal Artificial de propósito general,” 2007.
- [17] B. Armengol, “Desarrollo de una arquitectura de redes neuronales para el cálculo del flujo de potencia,” 2010.
- [18] J. Yuan, C. Farnham, C. Azuma, and K. Emura, “Predictive artificial neural network models to forecast the seasonal hourly electricity consumption for a University Campus,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 42, pp. 82–92, 2018.
- [19] S. Fé, D. Miraglia, D. Jaime, and A. Cabrera, “Empleo de redes neuronales artificiales en redes de distribución eléctrica,” vol. 3, no. 3, pp. 65–71, 2010.
- [20] C. X. Carpio and H. A. Quiñónez, “Estudio eléctrico para transferencias automáticas en alimentadores primarios de medio voltaje de CNEL EP Unidad de Negocio El Oro, estudio de caso al alimentador más crítico ante falla,” 2018.
- [21] S. Granger, *Análisis de Sistemas de Potencia*. México DF, 1996.
- [22] T. Guamán and J. Velecela, “Análisis técnico de la interconexión entre el alimentador 124 de la S/E Azogues 1 y el alimentador 221 de la S/E Azogues 2 pertenecientes a la Empresa Eléctrica Azogues C.A,” 2018.
- [23] M. Chimbo and H. Molina, “Ubicación óptima de reguladores de voltaje en el sistema de medio voltaje correspondiente a la Subestación Portovelo , aplicando segregación de flujo de carga al mas crítico,” 2018.
- [24] D. Arévalo and J. Guzman, “Interconexión de redes eléctricas en bajo voltaje aplicado a la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C. A.,” 2019.
- [25] W. Kersting, “Distribution System Modeling and Analysis, ” Fourth Edi. 2017.

- [26] MEER, “Manual de las propiedades de construcción (UC),” en Homologación de las unidades de propiedad (UP), vol. 2, 2013.
- [27] I. Cueva and L. Zhunio, “Óptima ubicación de estaciones de transformación y topología en sistemas de distribución en baja tensión para la Empresa Eléctrica Regional Centrosur,” 2017.
- [28] D. Pinzón, “Diseño óptimo de sistemas de distribución,” 2014.
- [29] C. Peñuela, J. Franco, and E. Toro, “Application of Ant Colony Optimization to course timetabling problem,” pp. 49–54, 2008.
- [30] C. Peñuela, M. Granada, and R. Gallego, “Multi-Objective Optimization Using Ants Colony for Placed Capacitors on Distribution Systems,” 2007.

ANEXOS

A1. Determinación de la demanda por el tipo de estrato

<i>ESTRATOS</i>						
	<i>“A1”</i>	<i>“A”</i>	<i>“B”</i>	<i>“C”</i>	<i>“D”</i>	<i>“E”</i>
<i>#</i>	<i>501-1000</i>	<i>311-500</i>	<i>181-310</i>	<i>111-180</i>	<i>61-110</i>	<i>1-60</i>
<i>Clientes</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>
	<i>DMD (kVA)</i>	<i>DMD (kVA)</i>	<i>DMD (kVA)</i>	<i>DMD (kVA)</i>	<i>DMD (kVA)</i>	<i>DMD (kVA)</i>
1	6,16	5,70	4,22	3,13	2,53	2,06
2	9,85	9,12	6,75	5,01	4,05	3,29
3	13,54	12,53	9,28	6,89	5,56	4,53
4	17,24	15,96	11,81	8,77	7,08	5,76
5	20,78	19,23	14,24	10,57	8,54	6,95
6	23,65	21,60	15,91	11,75	9,43	7,62
7	26,49	24,34	17,97	13,30	10,70	8,67
8	29,56	27,20	20,09	14,88	11,98	9,72
9	32,40	29,92	22,12	16,41	13,23	10,76
10	35,25	32,62	24,14	17,92	14,47	11,77
11	38,10	35,29	26,13	19,42	15,68	12,77
12	40,94	37,98	28,13	20,91	16,89	13,76
13	44,01	40,82	30,23	22,48	18,16	14,80
14	46,85	43,50	32,23	23,97	19,37	15,79
15	49,70	46,17	34,21	25,45	20,58	16,78
16	52,55	48,82	36,18	26,92	21,77	17,75
17	55,39	51,47	38,14	28,38	22,94	18,71
18	58,24	54,13	40,12	29,86	24,14	19,69

Continúa en la siguiente página

ESTRATOS						
	"A1"	"A"	"B"	"C"	"D"	"E"
#	501-1000	311-500	181-310	111-180	61-110	1-60
Clientes	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)
19	60,87	56,60	41,96	31,23	25,26	20,61
20	63,93	59,40	44,02	32,75	26,48	21,60
21	66,56	61,89	45,88	34,15	27,62	22,53
22	69,41	64,52	47,83	35,59	28,79	23,48
23	71,81	66,84	49,57	36,91	29,87	24,38
24	72,25	67,78	50,40	37,66	30,58	25,06
25	74,44	69,98	52,07	38,95	31,65	25,96
26	78,82	73,65	54,69	40,80	33,07	27,04
27	81,45	76,15	56,56	42,20	34,21	27,99
28	85,17	79,35	58,86	43,85	35,50	28,98
29	86,48	80,92	60,11	44,87	36,39	29,78
30	89,11	83,34	61,90	46,20	37,46	30,65
31	91,74	85,82	63,75	47,58	38,58	31,57
32	94,37	88,29	65,59	48,96	39,70	32,49
33	96,99	90,76	67,42	50,33	40,82	33,40
34	99,40	93,00	69,09	51,57	41,82	34,22
35	102,03	95,46	70,91	52,93	42,92	35,13
36	104,44	97,76	72,64	54,23	43,99	36,00
37	107,07	100,21	74,45	55,58	45,08	36,90
38	109,47	102,50	76,17	56,87	46,14	37,77
39	112,10	104,95	77,98	58,22	47,23	38,66

Continúa en la siguiente página

ESTRATOS						
	"A1"	"A"	"B"	"C"	"D"	"E"
#	501-1000	311-500	181-310	111-180	61-110	1-60
Clientes	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)
40	114,51	107,23	79,68	59,50	48,27	39,52
41	116,92	109,51	81,39	60,78	49,31	40,37
42	119,33	111,79	83,08	62,05	50,35	41,23
43	121,52	113,91	84,68	63,26	51,34	42,05
44	124,14	116,33	86,47	64,59	52,41	42,92
45	126,77	118,75	88,25	65,91	53,48	43,78
46	129,18	121,10	90,03	67,26	54,59	44,71
47	131,81	123,52	91,81	68,58	55,65	45,57
48	134,43	125,92	93,58	69,89	56,70	46,43
49	136,62	128,02	95,15	71,07	57,67	47,23
50	139,03	130,27	96,82	72,32	58,68	48,05
51	141,66	132,77	98,69	73,72	59,83	49,00
52	143,85	134,86	100,25	74,90	60,79	49,79
53	146,04	136,94	101,81	76,07	61,74	50,58
54	148,88	139,59	103,77	77,53	62,93	51,54
55	151,07	141,66	105,32	78,69	63,88	52,33
56	153,70	144,04	107,07	79,98	64,90	53,15
57	155,89	146,23	108,73	81,25	65,96	54,04
58	158,30	148,45	110,37	82,47	66,94	54,84
59	161,15	150,97	112,20	83,80	68,00	55,68
60	163,12	153,00	113,76	85,01	69,01	56,54

Continúa en la siguiente página

<i>ESTRATOS</i>						
	<i>"A1"</i>	<i>"A"</i>	<i>"B"</i>	<i>"C"</i>	<i>"D"</i>	<i>"E"</i>
<i>#</i>	<i>501-1000</i>	<i>311-500</i>	<i>181-310</i>	<i>111-180</i>	<i>61-110</i>	<i>1-60</i>
<i>Clientes</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>
	<i>DMD (kVA)</i>	<i>DMD (kVA)</i>	<i>DMD (kVA)</i>	<i>DMD (kVA)</i>	<i>DMD (kVA)</i>	<i>DMD (kVA)</i>
61	165,52	155,21	115,39	86,22	69,98	57,33
62	167,93	157,42	117,02	87,42	70,95	58,11
63	170,34	159,75	118,77	88,74	72,04	59,02
64	172,75	161,95	120,39	89,94	73,00	59,79
65	175,16	164,27	122,14	91,26	74,09	60,70
66	182,16	169,67	125,85	93,74	75,88	61,95
67	184,57	172,00	127,60	95,06	76,96	62,85
68	182,16	170,83	127,01	94,90	77,03	63,11
69	184,57	173,15	128,75	96,22	78,12	64,01
70	186,98	175,34	130,35	97,40	79,06	64,77
71	189,39	177,66	132,10	98,72	80,14	65,66
72	191,80	179,83	133,69	99,89	81,08	66,41
73	194,21	182,15	135,43	101,20	82,16	67,31
74	196,40	184,17	136,92	102,31	83,05	68,03
75	198,80	186,49	138,66	103,62	84,12	68,93
76	200,99	188,50	140,15	104,72	85,01	69,64
77	203,40	190,82	141,88	106,03	86,08	70,53
78	205,59	192,82	143,36	107,12	86,96	71,24
79	208,00	195,13	145,09	108,43	88,03	72,13
80	210,19	197,13	146,57	109,52	88,91	72,84
81	212,71	199,52	148,35	110,86	90,00	73,74

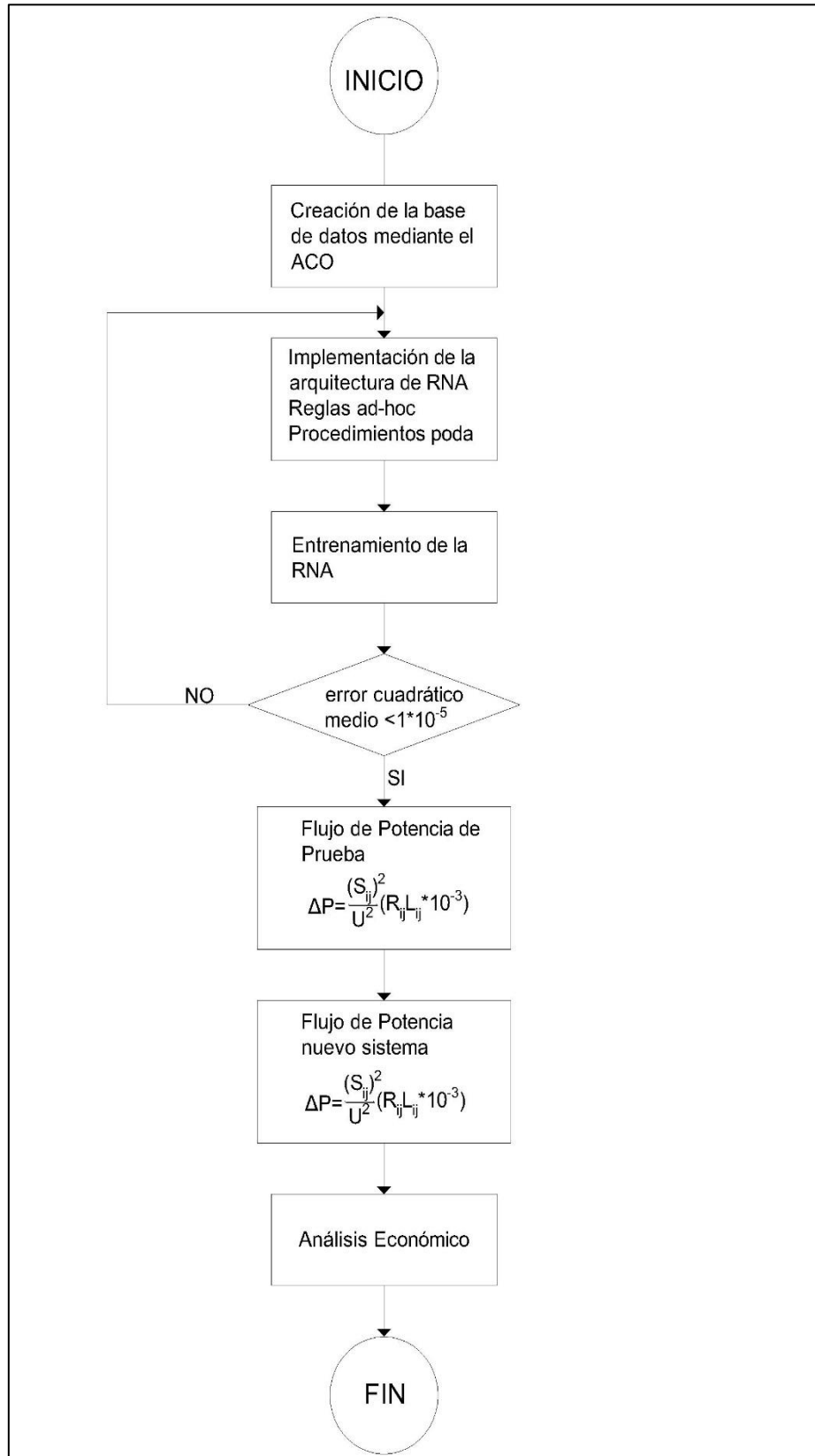
Continúa en la siguiente página

ESTRATOS						
	"A1"	"A"	"B"	"C"	"D"	"E"
#	501-1000	311-500	181-310	111-180	61-110	1-60
Clientes	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)
82	215,23	201,74	149,97	112,03	90,92	74,47
83	217,09	203,67	151,45	113,18	91,89	75,30
84	218,95	205,60	152,93	114,34	92,86	76,13
85	221,14	207,58	154,38	115,41	93,72	76,82
86	223,33	209,74	156,01	116,65	94,75	77,68
87	225,52	211,72	157,47	117,72	95,60	78,36
88	227,71	213,87	159,09	118,96	96,62	79,22
89	230,99	216,61	161,04	120,32	97,67	80,01
90	234,27	219,52	163,16	121,87	98,89	80,98
91	236,46	221,67	164,79	123,11	99,92	81,84
92	238,65	223,64	166,22	124,16	100,75	82,51
93	240,84	225,79	167,85	125,40	101,78	83,36
94	243,03	227,93	169,47	126,63	102,80	84,22
95	245,22	229,89	170,90	127,68	103,63	84,88
96	247,41	232,04	172,52	128,91	104,65	85,73
97	249,60	233,99	173,94	129,95	105,47	86,39
98	251,79	236,13	175,56	131,18	106,49	87,24
99	253,98	238,28	177,18	132,41	107,50	88,09
100	256,17	240,22	178,59	133,44	108,32	88,74
101	258,36	242,36	180,21	134,67	109,33	89,58
102	260,55	244,51	181,83	135,90	110,35	90,43

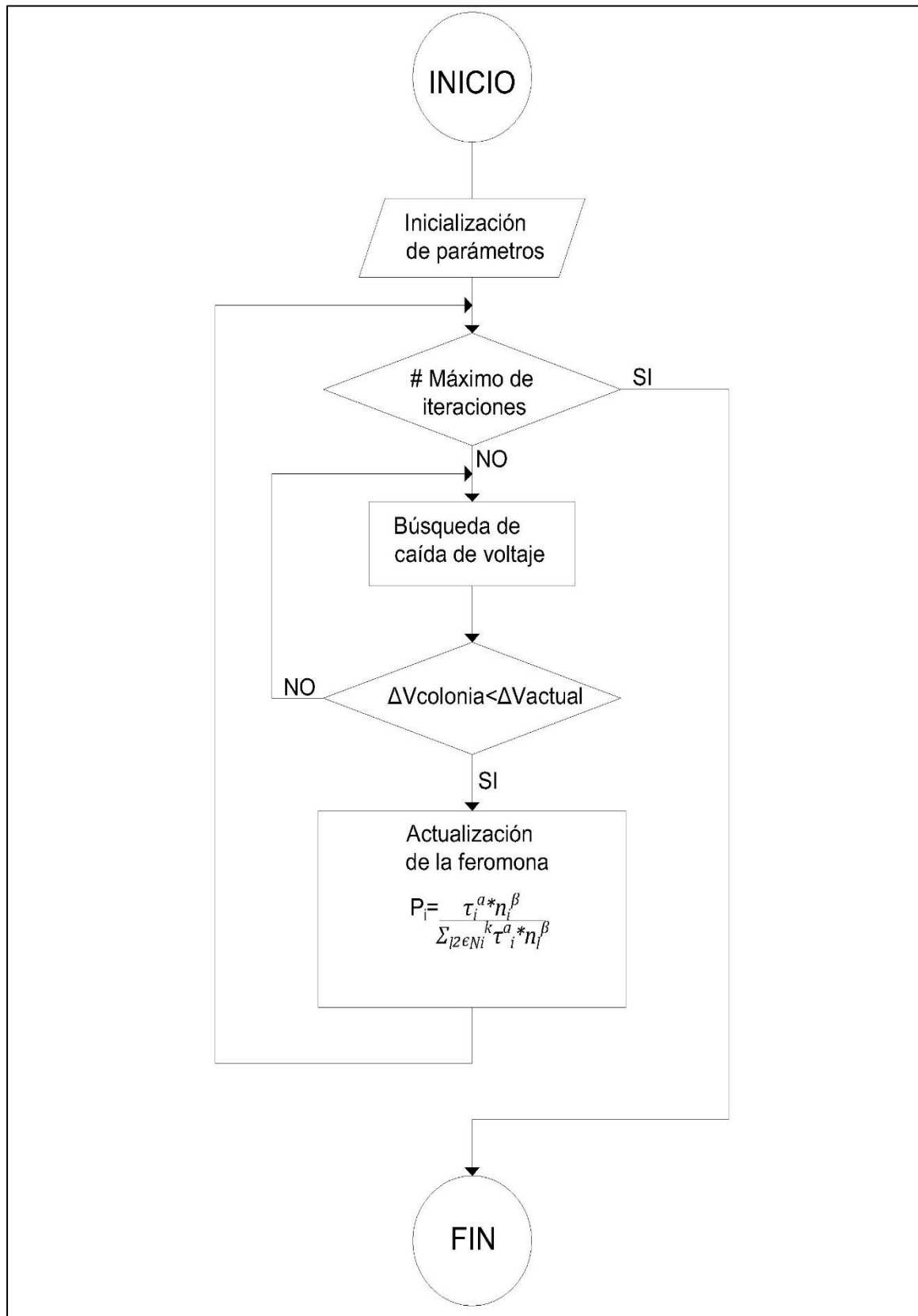
Continúa en la siguiente página

ESTRATOS						
	"A1"	"A"	"B"	"C"	"D"	"E"
#	501-1000	311-500	181-310	111-180	61-110	1-60
Clientes	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh	kWh
	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)	DMD (kVA)
103	262,74	246,44	183,23	136,93	111,16	91,07
104	264,93	248,58	184,85	138,15	112,17	91,92
105	267,12	250,72	186,46	139,38	113,18	92,76
106	269,31	252,65	187,86	140,40	113,98	93,40
107	271,49	254,79	189,47	141,62	114,99	94,24
108	273,68	256,93	191,09	142,85	116,01	95,08
109	275,87	258,84	192,48	143,85	116,80	95,71
110	278,06	260,98	194,09	145,08	117,81	96,55
111	280,25	263,12	195,70	146,30	118,81	97,39
112	282,44	265,25	197,31	147,53	119,82	98,23
113	284,63	267,16	198,69	148,52	120,61	98,85
114	286,82	269,30	200,30	149,74	121,61	99,69
115	289,01	271,43	201,90	150,97	122,62	100,53

A2. Flujograma para la implementación de la RNA



A3. Flujoograma para la implementación del método ACO



A4. Catálogo de los conductores ACSR (Electrocables)

<i>Nombre</i>	<i>Calibre AWG ó MCM</i>	<i>Sección Al mm²</i>	<i>Sección Total mm²</i>	<i>Diámetro Exterior mm</i>	<i>Resistencia C.C. a 20°C ohm/Km</i>	<i>Cap. De corriente en Amp.</i>
Turkey	6	13,30	15,46	5,04	2,154	105
Swan	4	21,15	24,71	6,36	1,353	140
Sparrow	2	33,62	29,22	8,01	0,8507	184
Raven	1/0	53,49	62,38	10,11	0,5351	242
Quail	2/0	67,43	78,64	11,34	0,4245	276
Pigeon	3/0	85,01	99,23	12,75	0,3367	315
Penguin	4/0	107,20	125,10	14,31	0,2671	357
Waxwing	266,80	135,20	157,20	15,47	0,2126	449
Partridge	266,80	135,20	142,60	16,28	0,2117	457
Ostrich	300,00	152,00	176,70	17,28	0,1900	492
Piper	300,00	152,00	187,50	17,78	0,1902	490
Merlin	336,40	170,50	179,90	17,37	0,1686	519
Linnet	336,40	170,50	198,30	18,31	0,1671	529
Oriole	336,40	170,50	210,30	18,83	0,1666	535
Chickadee	397,50	201,42	212,50	18,87	0,1427	576
Brant	397,50	201,42	227,55	19,61	0,1418	584
Ibis	397,50	201,42	234,20	19,88	0,1414	587
Lark	397,50	201,42	248,40	20,44	0,1405	594
Pelikan	477,00	241,70	255,10	20,68	0,1189	646
Flicker	477,00	241,70	273,10	21,48	0,1175	655
Hawk	477,00	241,70	281,10	21,80	0,1175	659
Hen	477,00	241,70	298,10	22,40	0,1170	666

Continúa en la siguiente página

<i>Nombre</i>	<i>Calibre AWG ó MCM</i>	<i>Sección Al mm²</i>	<i>Sección Total mm²</i>	<i>Diámetro Exterior mm</i>	<i>Resistencia C.C. a 20°C ohm/Km</i>	<i>Cap. De corriente en Amp.</i>
Heron	500,00	253,30	312,40	22,96	0,1141	694
Osprey	556,50	282,00	298,20	23,22	0,1015	711
Parakeet	556,50	282,00	318,52	23,22	0,1010	721
Dove	556,50	282,00	327,90	23,55	0,1007	726
Eagle	556,50	282,00	347,80	24,22	0,1001	734
Peacock	605	306,60	346,39	24,21	0,09420	760
Squab	605	306,60	356,45	24,54	0,09410	765
Teal	605	306,60	376,45	25,25	0,09402	773
Rook	636	322,30	364,00	24,82	0,08966	784
Grosbeck	636	322,30	374,70	25,15	0,89530	789

A5. Resultado de la RNA

```
>> Resultado'  
  
ans =  
  
    0.0005  
    0.0528  
    0.1052  
    0.1577  
    0.0521  
    0.0528  
    0.3165  
    0.3682  
    0.0003  
    0.4775  
    0.0003  
    0.0524  
    0.6319  
    0.6839  
    0.7368  
    0.1050  
    0.8414  
    0.8947  
    0.2105
```

Figura 31. Resultado para el caso 1

```
>> Resultado1'  
  
ans =  
  
-0.0020  
0.0292  
0.0663  
0.0979  
0.1298  
0.0322  
0.0027  
0.2270  
0.0328  
0.2821  
0.2599  
0.3447  
0.3860  
0.0015  
0.4519  
0.4848  
0.5205  
0.5490  
0.1928  
0.1935  
0.6456  
0.4512  
0.2258  
0.7094  
0.7102  
0.8054  
0.8387  
0.5165  
0.9043  
0.8712  
-0.0002
```

Figura 32. Resultado para el caso 2

```
>> Resultado2'  
  
ans =  
  
    0.0008  
    0.0194  
    0.0006  
    0.0601  
    0.0827  
    0.1006  
    0.1219  
    0.0412  
   -0.0030  
    0.0174  
    0.2084  
    0.1841  
    0.1784  
    0.2689  
    0.2951  
    0.3040  
    0.3276  
    0.3474  
    0.3680  
    0.3881  
    0.1862  
    0.4296  
    0.4584  
    0.4690  
    0.4898  
    0.4893  
    0.4906  
  
    0.4302  
    0.5662  
    0.5895  
    0.5745  
    0.5679  
    0.6458  
   -0.0003  
    0.6945  
    0.7140  
    0.0817  
    0.7530  
    0.7401  
    0.7367  
    0.6735  
    0.6718  
    0.7329  
    0.7547  
    0.7558  
    0.9156  
    0.9392  
    0.9400  
    0.9385
```

Figura 33. Resultado para el caso 3