



**MODELO ADAPTATIVO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA DETECCIÓN
SELECTIVA DE FALLAS DE ALTA IMPEDANCIA EN LÍNEAS DE
TRANSMISIÓN DE DOS TERMINALES DE DOBLE CIRCUITO**

ALFREDO MIGUEL PIANETA ESCUDERO

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2015**

**MODELO ADAPTATIVO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA DETECCIÓN
SELECTIVA DE FALLAS DE ALTA IMPEDANCIA EN LÍNEAS DE
TRANSMISIÓN DE DOS TERMINALES DE DOBLE CIRCUITO**

ALFREDO MIGUEL PIANETA ESCUDERO

**Trabajo de grado para optar al título de especialista en sistemas transmisión
y distribución de energía eléctrica**

**Director:
JHON ALBEIRO CALDERÓN SERNA
Msc Ingeniería de Sistemas.**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE
ENERGÍA ELÉCTRICA
MEDELLÍN
2015**

Notas de aceptación

Firma:
Nombre:
Presidente del Jurado

Firma:
Nombre:
Presidente del Jurado

Firma:
Nombre:
Presidente del Jurado

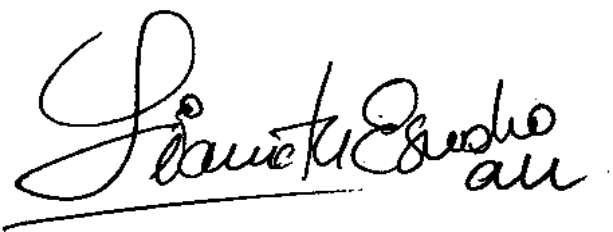
Medellín, 15 de octubre de 2015

Octubre 15 de 2015

ALFREDO MIGUEL PIANETA ESCUDERO

Declaro que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad” Art 82 Régimen Discente de Formación Avanzada.

FIRMA Y CÉDULA

A handwritten signature in black ink, reading "Alfredo Escudero", with a horizontal line underneath.

CC 15370758 de Medellín

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos por todo el amor y apoyo incondicional a lo largo de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

A toda mi familia por su esfuerzo y acompañamiento en todas las etapas de mi formación académica y personal.

Agradezco al Profesor Jhon Albeiro Calderón Serna por su orientación, las ideas, consejos y confianza en todo el proceso que significó culminar con éxito este trabajo.

Al ingeniero Mario Arrieta por su apoyo y amistad y por estar siempre atento a resolver cualquier inquietud técnica en la investigación.

A los profesores de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín y de la especialización de la Universidad Pontificia Bolivariana por compartir su conocimiento y motivación.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

1	ALCANCE Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN	5
1.1	JUSTIFICACIÓN Y BENEFICIOS	7
1.2	OBJETIVOS.....	8
1.2.1	Objetivo general	8
1.2.2	Objetivos específicos.....	8
1.3	METODOLOGÍA	13
1.4	ORGANIZACIÓN DEL TEXTO	14
2	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA (ESTADO DEL ARTE).....	16
3	FUNDAMENTACIÓN TEORICA DE LA PROTECCIÓN DISTANCIA	22
3.1	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA PROTECCIÓN DE DISTANCIA	22
3.2	EL DIAGRAMA R-X Y LAS CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN	23
3.3	ZONAS DE LA PROTECCIÓN DE DISTANCIA	25
3.4	ESQUEMAS DE TELEPROTECCIÓN DE DISTANCIA.....	27
3.4.1	Esquema de disparo permisivo por Sub alcance (PUTT)	28
3.4.2	Esquema de disparo permisivo por Sobre alcance (POTT)	29
3.5	PROBLEMAS ASOCIADOS A LA PROTECCIÓN DE DISTANCIA.....	29
3.5.1	Impedancia de falla	30
3.5.2	Acoplamiento mutuo.....	33
3.6	REGIÓN IDEAL DE OPERACIÓN DE UN RELÉ (REGIÓN DE DISPARO)	36
4	SISTEMA MODELADO, CÁLCULO DE IMPEDANCIA DE FALLA Y METODOLOGIA DE ENTRENAMIENTO	39
4.1	SISTEMA MODELADO	39
4.1.1	Variaciones de potencia del terminal local al terminal remoto.	41
4.1.2	Variación del valor de la impedancia de falla.....	43
4.1.3	Variaciones de localización de la falla	43
4.1.4	Variación del modo de operación de las dos líneas paralelas.	43
4.2	CÁLCULO DE IMPEDANCIA VISTA POR EL RELÉ	43
4.2.1	Cálculo de impedancia vista por el relé línea sencilla	47
4.2.2	Cálculo de impedancia vista por el relé, líneas paralelas de dos terminales.....	51
5	MODELO ADAPTATIVO DE PROTECCIÓN DISTANCIA DE LINEAS PARALELAS DE ALTA IMPEDANCIA.....	59
5.1	REDES NEURONALES RETROALIMENTADAS	60

5.2	DESARROLLO DE LA RED NEURONAL	61
5.2.1	Diseño de la arquitectura.....	61
5.2.2	Entrenamiento de la red	64
5.2.3	Validación.....	65
5.3	RESUMEN DE PASOS PARA IMPLEMENTAR EL MODELO ADAPTATIVO DE Y USO DE UNA RED NEURONAL	66
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS	67
7	CONCLUSIONES.....	81
8	OPORTUNIDADES A TRABAJOS FUTUROS	83
9	BIBLIOGRAFIA.....	84

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1	Curvas de operación de un relé..... 6
Figura 2	Propuesta Metodológica..... 12
Figura 3	(a) Diagrama R-X; (b) Representación de la impedancia de secuencia positiva de una línea de transmisión..... 24
Figura 4	Tipos de características de operación de un relé distancia (a) Impedancia; (b) Mho; (c) Lenticular; (d) Rectángulo, (e) Blinder; (f) Reactancia; (g) Resistencia..... 25
Figura 5	Representación de las zonas de la protección de distancia..... 26
Figura 6	Representación de la intersección de zonas de actuación de los relés en los terminales de una línea de transmisión 27
Figura 7	Representación de la lógica del esquema de disparo permisivo por sub alcance..... 28
Figura 8	Representación de la lógica del esquema de disparo permisivo por sobre alcance..... 29
Figura 9	Falla Fase- tierra 31
Figura 10	Falla Fase- fase..... 31
Figura 11	Falla trifásica 32
Figura 12	Falla monofásica a tierra Modo de operación 1 34
Figura 13	Falla monofásica a tierra Modo de operación 2 35
Figura 14	Comparación Región de operación con y sin acoplamiento..... 36
Figura 15	Región ideal de disparo de un relé de distancia 37
Figura 16	Sistema de potencia modelado en ATPDraw..... 39
Figura 17	Impedancia aparente vista por el relé con acoplamiento mutuo, $h=0.98$ e $\delta=2^\circ$ 45
Figura 18	Impedancia aparente vista por el relé con acoplamiento mutuo, $h=0.98$ y $\delta=2^\circ$, calculado en Excel 45
Figura 19	Impedancia aparente vista por el relé con acoplamiento mutuo, $h=0.98$ e $\delta=20^\circ$ 46
Figura 20	Impedancia aparente vista por el relé con acoplamiento mutuo, $h=0.98$ e $\delta=20$, calculado en Excel 46
Figura 21	Modelo de falla monofásica a tierra línea sencilla..... 48
Figura 22	Circuito Equivalente para una falla fase a tierra en la fase A 48
Figura 23	Modelo de falla monofásica a tierra líneas paralelas de dos terminales 51
Figura 20	Modelo de falla monofásica a tierra líneas paralelas de dos terminales 52
Figura 25	Regiones de operación ideal de disparo de un relé varios casos de simulación desde terminal L a R (Modo de operación 1) 56

Figura 26	Regiones de operación ideal de disparo de un relé varios casos de simulación desde terminal L a R (Modo de operación 2) 57
Figura 27	Regiones de operación ideal de disparo de un relé Caso 1 y 5 simulaciones desde terminal L a R (Modo de operación 1 vs 2) 57
Figura 28	Regiones de operación ideal de disparo de un relé Caso 10 y 15 simulaciones desde terminal L a R (Modo de operación 1 vs 2) 58
Figura 29	Modelo artificial neuronal biológico..... 60
Figura 30	Arquitectura de la red neuronal 61
Figura 31	Error medio cuadrático Entrenamiento Borde a, Caso 1, Modo de operación 1 68
Figura 32	Error medio cuadrático Entrenamiento Borde c, Caso 1, Modo de operación 1 68
Figura 33	Error medio cuadrático Entrenamiento Borde d, Caso 1, Modo de operación 1 69
Figura 34	Región ideal de disparo, Caso 1, Modo de operación 1..... 70
Figura 35	Región ideal de disparo, Caso 1, Modo de operación 1, Valores Calculados matemáticamente Vs Valores obtenidos con redes neuronales 70
Figura 36	Región ideal de disparo, Caso 2, Modo de operación 1..... 71
Figura 37	Región ideal de disparo, Caso 2, Modo de operación 1, Valores Calculados matemáticamente Vs Valores obtenidos con redes neuronales 72
Figura 38	Región ideal de disparo, Caso 1, Modo de operación 2..... 73
Figura 39	Región ideal de disparo, Caso 1, Modo de operación 2, Valores Calculados matemáticamente Vs Valores obtenidos con redes neuronales 73
Figura 40	Región ideal de disparo, Caso 2, Modo de operación 2..... 74
Figura 41	Región ideal de disparo, Caso 2, Modo de operación 2, Valores Calculados matemáticamente Vs Valores obtenidos con redes neuronales 74
Figura 42	Región ideal de disparo, Caso 1, Modo de operación 1, prueba de diferentes localizaciones e impedancias de falla 75
Figura 43	Zoom Región ideal de disparo, Caso 1, Modo de operación 1, prueba de diferentes localizaciones e impedancias de falla..... 77
Figura 44	Región ideal de disparo, Caso 2, Modo de operación 1, prueba de diferentes localizaciones e impedancias de falla 77
Figura 45	Zoom Región ideal de disparo, Caso 2, Modo de operación 1, prueba de diferentes localizaciones e impedancias de falla..... 78
Figura 46	Región ideal de disparo, Caso 1, Modo de operación 2, prueba de diferentes localizaciones e impedancias de falla 79
Figura 47	Región ideal de disparo, Caso 2, Modo de operación 2, prueba de diferentes localizaciones e impedancias de falla 79

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1	Señales de entrada para las unidades de fase-tierra y fase-fase del relé de distancia 23
Tabla 2	Unidades del relé que deben operar falla monofásica 23
Tabla 3	Valores de Falla monofásica (fase-tierra) 31
Tabla 4	Valores de Falla bifásica (fase-fase)..... 31
Tabla 5	Valores de Falla trifásica 32
Tabla 6	Datos equivalentes de red 40
Tabla 7	Datos de líneas de transmisión 40
Tabla 8	Variaciones de potencia activa y reactiva, casos de entrenamiento . 41
Tabla 9	Variaciones de potencia activa y reactiva, casos de Validación..... 42
Tabla 10	Datos de líneas de transmisión tomada de referencia 44
Tabla 11	Datos de equivalentes de los terminales 44
Tabla 12	Tabla de decisión de actuación de protección distancia 80

GLOSARIO

ATP: el EMTP/ATP es un programa digital utilizado para simular transitorios electromagnéticos, electromecánicos y de sistemas de control en sistemas eléctricos polifásicos de potencia. Este software permite analizar diferentes fallas y condiciones operativas de sistemas eléctricos de potencia.

IMPEDANCIA APARENTE: La impedancia aparente es la relación entre el voltaje y la corriente medidos por el relé y puede variar de acuerdo al punto de falla.

IMPEDANCIA DE FALLA: Es la impedancia, resistiva o reactiva, entre los conductores en falla o entre el conductor en falla y tierra.

LÍNEAS PARALELAS DE DOS TERMINALES: Son aquellas líneas de transmisión conectadas en paralelo (las líneas terminan en subestaciones comunes en ambos extremos) y en los dos extremos incluyen fuentes de potencia.

MATLAB: Es un paquete de software matemático que utiliza la manipulación matricial para realizar cálculos numéricos complejos. El software fue diseñado como herramienta de apoyo para los cursos de Teoría de Matrices, Álgebra Lineal y Análisis Numérico. Hoy en día, Matlab es un programa muy potente, con un entorno agradable, que incluye herramientas de cálculo científico y técnico y de visualización gráfica, así como un lenguaje de programación de alto nivel.

PERCEPTRÓN: Este modelo tiene gran importancia histórica ya que fue el primer modelo en poseer un mecanismo de entrenamiento que permite determinar automáticamente los pesos sinápticos que clasifican correctamente a un conjunto de patrones a partir de un conjunto de ejemplos. La arquitectura del perceptrón está compuesta por dos capas de neuronas, una de entrada y una de salida.

PLANO R-X: Es un diagrama en 2D, compuesto por un par de ejes ortogonales, el eje de la abscisa contiene los valores de la resistencia R mientras que los valores de la ordenada, contiene los valores la reactancia X, por consiguiente cada punto del plano representa una impedancia.

PROTECCIÓN DE DISTANCIA: Es un relé cuya respuesta a las cantidades de entrada es principalmente una función de la distancia eléctrica del circuito entre la ubicación del relé y el punto de falla. Para hacerlo utiliza la relación Voltaje/Corriente en el punto de instalación del relé. Este tipo de relé es principalmente instalado en líneas de transmisión.

RED NEURONAL ARTIFICIAL: Las redes neuronales artificiales son modelos matemáticos que intentan reproducir el funcionamiento del sistema nervioso. Como todo modelo, realizan una simplificación del sistema real que simulan y toman las características principales del mismo para la resolución de una tarea determinada.

REGIÓN DE DISPARO DE UN RELÉ DE DISTANCIA (TRIP REGION): Es la región la cual está definida por 4 líneas de frontera y que se obtiene graficando en el plano R-X la impedancia vista por el relé en cada caso bajo falla.

RELÉ: Dispositivos que son conectados en sistemas de potencia para detectar condiciones indeseadas dentro de un sistema de potencia para aislarlo y prevenir afectación de personas, animales y equipos.

SALIDA DE UN ELEMENTO: Cambio de estado en funcionamiento a fuera de servicio, parcial o total de un elemento del sistema, puede ser por desconexión, desenergización o recierre automático.

SISTEMA DE TRANSMISIÓN NACIONAL (STN): Sistema interconectado de transmisión de energía eléctrica compuesto por el conjunto de líneas, con sus correspondientes módulos de conexión, que operan a tensiones iguales o superiores a 220 kV.

SINAPSIS: Unión entre neuronas

ZONA I: También llamada primera zona tiene un alcance del 80 % de la longitud de la línea protegida que opera de manera instantánea.

LISTA DE SIGLAS

ANSI: American National Standards Institute

ATP: Alternative Transients Program

BP: Backpropagation

CA Corriente Alterna

DUTT Direct Underreaching transfer trip

EMTP: Electromagnetic Transients Program

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers.

ISA: Interconexión Eléctrica S.A.

LCC Elementos Line Constants de ATPDraw

LT Línea de transmisión

MATLAB: MATrix LABoratory

NNTOOL: Neural Network Tool

POTT Permissive Overreaching Transfer trip

PUTT Permissive Underreaching Transfer trip

RBFN: Radial Basis Function Neural Network

RNA: Red Neuronal Artificial

SEL SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES

SEP: Sistema Eléctrico de Potencia.

SIR Source Impedance Ratio

STN: Sistema de Transmisión Nacional

T&D Transmisión y Distribución

LISTA DE SIMBOLOS

21	Función de protección de distancia
L	Terminal local
R	Terminal Remota
R_x	Resistencia
X_x	Reactancia
Z	Impedancia
km	kilómetros
kV	kilovoltios
kA	kiloamperios
°	Grados
Ω	Ohmios
m	Metros
CT	Transformador de corriente
TP	Transformador de Potencial
E_{SL}	Fuente de tensión del terminal Local
E_{SR}	Fuente de tensión del terminal Remoto
Z_{1SL}	Impedancia de secuencia positiva del equivalente de Thévenin del terminal Local
Z_{0SL}	Impedancia de secuencia cero del equivalente de Thévenin del terminal Local
Z_{1SR}	Impedancia de secuencia positiva del equivalente de Thévenin del terminal Remoto
Z_{0SR}	Impedancia de secuencia cero del equivalente de Thévenin del terminal Remoto
p	Distancia hasta la falla en pu desde el punto de instalación del relé de distancia
pu	Por Unidad
R_F	Resistencia de falla

ms	Milisegundo
LT1	Línea de Transmisión 1
LT2	Línea de Transmisión 2
MW	potencia activa
MVAr	potencia reactiva
F	Punto de falla
V^{Post}	Tensión de postfalla
I^{Post}	Corriente de postfalla
I_{Pre}	Corriente de Prefalla
K₀	Factor de compensación de secuencia cero
K_{0m}	Factor de compensación de secuencia cero mutuo
Z_{0L}	Impedancia de secuencia cero de la línea de transmisión
Z_{1L}	Impedancia de secuencia positiva de la línea de transmisión
Z_{0mu}	Impedancia de secuencia cero, acoplamiento mutuo
h	Relación entre tensión en el terminal remoto y el terminal local
δ	Angulo de transferencia entre terminal local y terminal remoto
C₀	Factor de distribución de secuencia cero
C₁	Factor de compensación de secuencia positiva

RESUMEN

El presente documento hace referencia a la aplicación de metodologías de redes neuronales en el estudio de protecciones de sistemas eléctricos de potencia, específicamente para la protección de distancia aplicada a líneas de transmisión paralelas de dos terminales. La idea es implementar un sistema adaptativo de protección que sea excluyente en cuanto a las fallas que sea capaz de detectar, es decir que no presente disparos indeseados y que garantice la operación del sistema brindando una correcta prestación del servicio de energía al usuario final.

El análisis del estado del arte está basado en el estudio de casos similares en el cual se utilizan diversos algoritmos de redes neuronales para el estudio de protecciones de líneas de transmisión paralelas y sencillas. En los artículos de referencia se hacen comparaciones entre los distintos algoritmos de redes neuronales con los cuales se puede elaborar un esquema de protección adaptativo de distancia para líneas de transmisión, planteando ventajas y desventajas entre uno y otro.

Para el análisis de un sistema de potencia de líneas paralelas de dos terminales por medio de redes neuronales, es necesario realizar una exploración de muchos casos de estudio por medio de un software especializado de potencia del tipo EMTP, estas simulaciones se convierten en la base de datos o elementos para alimentar las diferentes variables analizadas con el módulo de redes neuronales interno del software MATLAB, por lo tanto, es necesario generar múltiples simulaciones de un sistema de estudio analizando diversos escenarios de operación del sistema, tales como, líneas abiertas o aterrizadas y variaciones de las condiciones de transferencia de potencia entre los terminales donde las líneas son conectadas. Es importante hacer énfasis en que este estudio es realizado solo para condiciones de falla monofásica por ser estas las más comunes en sistemas eléctricos de potencia y porque estas tienen asociadas afectaciones debidas a la componente de secuencia cero de la falla que genera acoplamientos fuertes entre elementos, que

para el caso de líneas de transmisión, puede llevar a que un relé instalado en una de ellas detecte fallas que sean externas a su zona de operación como si fueran internas.

Se establece la metodología mediante el software MATLAB para el análisis de una serie de datos en la aplicación de las técnicas de redes neuronales que se encuentran en el módulo Neural Network de MATLAB (nntool), (DEMUTH, 2001, [9]). A este módulo se ingresa información de flujos de carga de potencia activa y reactiva y datos de impedancia aparente calculada para cada caso de transferencia de potencia.

Finalmente, se verifica que el esquema de protección adaptativo de redes neuronales aplicado para líneas paralela sea selectivo, además de seguro al operar ante condiciones de falla de alta impedancia en el sistema de potencia estudiado.

Palabras claves: protección de distancia, región ideal de disparo de un relé de distancia, impedancia aparente, falla monofásica, red neuronal, Matlab.

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica es uno de los recursos más importantes de la sociedad moderna. Lo ideal es que ella siempre esté disponible al consumidor en todos los instantes en la tensión y la frecuencia correcta. Ese desempeño notable es alcanzado debido a un planeamiento, proyecto, instalación y cuidadosa red compleja de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica. De todas formas un sistema eléctrico está sujeto a disturbios por variaciones de carga, fallas debidas a equipos vandalismo o causas naturales como descargas atmosféricas.

Debido a sus dimensiones físicas y por estar sometidas a las más diversas condiciones climáticas ambientales, las líneas de transmisión son los elementos más susceptibles a fallas en los sistemas eléctricos de potencia. Además por ser construidas en lugares de difícil acceso el mantenimiento preventivo termina siendo muy costoso. Se estima que en sistemas de potencia las fallas en líneas de transmisión alcancen un porcentaje de 50 % volviéndose una necesidad la implementación de esfuerzos para desarrollar sistemas de protección más rápidos y seguros (Anderson, 1999, [20]).

La implementación del análisis de sistemas de potencia con redes neuronales ha tenido un crecimiento significativo los últimos años, principalmente se han estudiado los temas relacionados con las protecciones de línea ya que corresponden a los elementos en los cuales se puede presentar fácilmente una falla, siguiendo en orden de importancia las fallas de transformadores y por último fallas de barras. La protección de distancia es la protección más usada en las líneas de transmisión de un sistema de potencia. Este tipo de protección trabaja basada en la medición de la impedancia entre el punto de falla y el punto de ubicación relé, pero es muy sensible a los efectos que se puedan presentar en el caso de que la línea sea instalada en paralelo con otra línea, ya que puede generarse acoplamiento mutuo entre las los cables de fase, estos acoplamientos traen consigo asociadas efectos

de sobre alcance o sub alcance del relé al presentarse una falla. Normalmente estos fenómenos ocurren fuera del alcance de la zona 1 de la protección de distancia (posiblemente en líneas adyacentes a la protegida) llevando al relé a tener actuaciones indeseadas.

1 ALCANCE Y METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

En este capítulo se presenta el alcance y la propuesta metodológica planteada desde el momento que fue considerado el anteproyecto. Para ello se plantean los objetivos y se establecen las diferentes raíces técnicas, económicas y operativas derivadas en la concepción inicial de este trabajo.

El tema del proyecto se relaciona con la mala operación a la que puede verse afectada la protección de distancia en líneas de transmisión cuando es instalada en paralelo entre dos terminales. Estas son afectadas por fenómenos de acoplamiento mutuo entre ellas y al estar sometidas a diferentes condiciones de operación tales como fallas (monofásicas, bifásicas o trifásicas), aterrizamientos por motivos de mantenimiento u otra condición de operación, los relés pueden operar indeseadamente gracias a las corrientes inducidas por el acoplamiento, lo anterior se agrava cuando el relé ve las fallas dentro de la primera zona de protección (zona 1) y posiblemente estas fallas ocurren en una zona fuera de las líneas en estudio.

Con la realización del proyecto se busca diseñar, entrenar y validar un modelo de inteligencia artificial que reduzca la operación indeseada de las protecciones de distancia en líneas de transmisión paralelas de dos terminales, de tal forma que la característica del relé se acomode a la curva real de operación de un relé, haciendo que la protección distancia sea selectiva ante las fallas analizadas, todo lo mencionado anteriormente llevado a cabo a partir de un gran número de simulaciones de condiciones de operación y falla de un sistema de potencia, para que el relé pueda actuar de forma correcta debido al entrenamiento posterior. Un relé convencional tiene una característica establecida por los fabricantes, pero esta deja de percibir algunas fallas en los sistemas de potencia. En la protección de elementos de sistemas de potencia, en especial, en líneas de transmisión, son usadas características como la cuadrilateral o la Mho, pero también es recomendable implementar el uso de características adaptativas que varíen con las

mudanzas del sistema de potencia. Las fallas antes mencionadas tienen asociadas diversos valores de resistencia y también a su vez varias localizaciones de ocurrencia a lo largo de las líneas de transmisión, parámetros que afectan directamente la curva ideal de operación (disparo) de los relés de distancia, la cual es básicamente una representación en el plano R-X de los valores de impedancia aparente medida entre el punto de instalación del relé y el punto donde ocurre la falla en la línea.

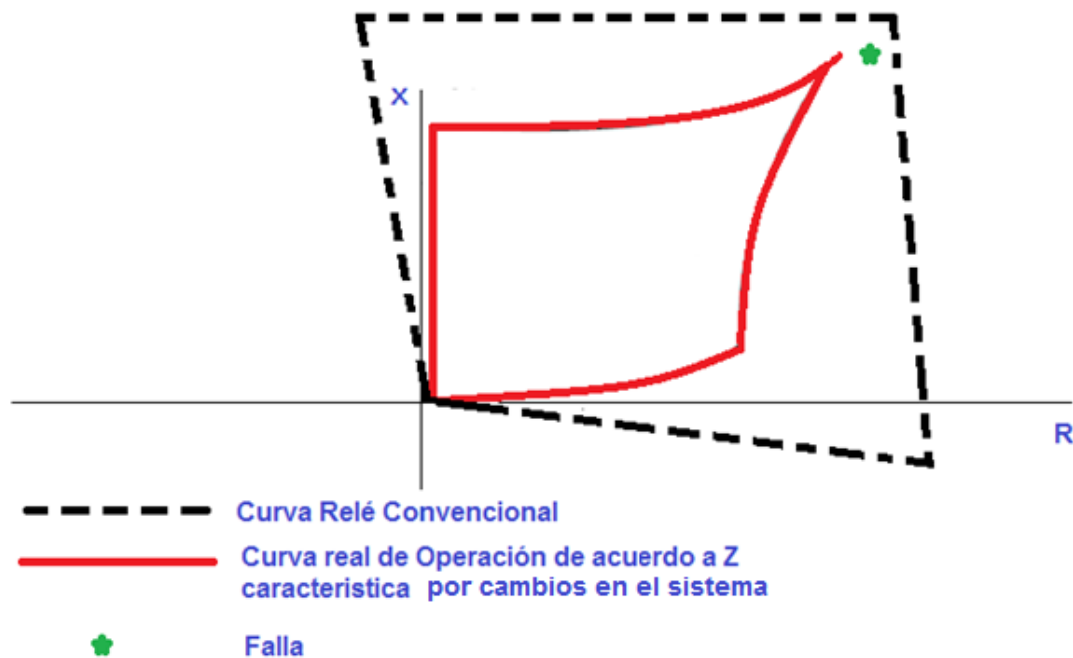


Figura 1 Curvas de operación de un relé¹

Como se muestra en la Figura 1, puede acontecer la situación donde se tenga por ejemplo una falla vista por una característica cuadrilateral en la zona 1, pero, si se analizara con la característica adaptativa, ella debería estar en zona 2, por lo tanto, bajo esta situación la característica de líneas discontinuas estaría teniendo una falsa operación ya que estaría sobre alcanzada y operando en una condición de falla en un lugar distante de la línea protegida. La característica determinada por la línea

¹ Fuente: Elaboración Propia

continúa estaría delimitando la zona 1 con las condiciones de falla y transferencia de potencia del sistema actualizadas en ese momento, pues una característica adaptativa trabaja en tiempo real, teniendo en cuenta las variaciones del sistema de potencia.

1.1 JUSTIFICACIÓN Y BENEFICIOS

A pesar de la alta tecnología empleada en las protecciones instaladas en un sistema de potencia para diagnóstico de fallas incluyendo su localización y detección, se presenta insuficiencias en la operación de las mismas. Las técnicas de la inteligencia artificial proveen una valiosa herramienta para resolver este problema a un costo relativamente bajo.

La idea del proyecto nace como iniciativa del ingeniero Jhon Albeiro Calderón Serna, quien ha estudiado varios temas de aplicación de las redes neuronales y lógica difusa, técnicas utilizadas en sistemas eléctricos de potencia, principalmente asociadas a las protecciones eléctricas.

La motivación principal para la realización de este estudio está basada en que la característica de operación normal de los relés es diferente a la curva generada por la impedancia aparente real, por lo tanto algunas fallas se escapan del alcance de actuación del mismo. Adicionalmente los efectos de subalcance o sobrealcance hacen mal operar los relés de distancia y sobre todo los flujos de potencia activa y reactiva es el factor que más afecta el correcto funcionamiento de un relé de distancia. Otra razón importante para una implementación de este tipo de protección está relacionada con la posibilidad de no aplicar un enlace de comunicaciones entre las barras donde se conecta la línea de transmisión, o si este es necesario no se requiere que sean implementaciones robustas del mismo.

El alcance de este trabajo está delimitado al análisis de protecciones adaptativas en líneas paralelas con dos terminales que comparten tanto la barra de llegada como

la de salida durante todo su recorrido, teniendo en cuenta solo la influencia del acoplamiento mutuo existente entre conductores de una torre doble circuito.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Analizar, diseñar, construir y validar un modelo inteligente de protección adaptativa que responda a los cambios topológicos y variaciones del despacho de carga para que opere de manera selectiva durante una falla en circuitos paralelos de dos terminales.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar el estado del arte de protecciones adaptativas aplicadas a líneas de transmisión paralelas.
- Seleccionar el algoritmo de inteligencia artificial adecuado para solucionar el problema.
- Construir un modelo de ATPDraw para un sistema de línea de doble circuito conectado a dos terminales.
- Realizar sensibilidades de simulaciones en ATP correspondientes a fallas en distintas localizaciones, diferentes condiciones de cortocircuito, diferentes topologías de la línea en paralelo de dos terminales y diferentes escenarios de demanda y condiciones de carga.
- Procesar en MATLAB los resultados de las simulaciones de ATP para generar los patrones de entrenamiento, validación y chequeo del algoritmo de inteligencia artificial seleccionado.

- Verificar que no se hace necesario el uso de un canal de comunicaciones entre relés ubicados entre dos terminales de las líneas.
- Validación de la implementación de metodología establecida en papers de la IEEE para cálculo de región de operación de relés distancia.
- Analizar, diseñar, construir el modelo de inteligencia artificial seleccionado, de tal forma que sea adaptativo a líneas de transmisión de dos circuitos, a los cambios topológicos y variaciones de carga del sistema.
- Validar el modelo de inteligencia artificial con un prototipo aplicado a una línea de transmisión real del sistema eléctrico colombiano.

A continuación se relacionan las raíces técnicas, económicas y operativas establecidas para la realización del proyecto según la metodología T&D.

Raíces Técnicas

- Lo ideal para un sistema de potencia es que las curvas de un relé sean lo más próximas posible a las curvas reales de operación.
- Las líneas paralelas tienen acoplamiento mutuo y este produce efectos diversos sobre los relés de protección dependiendo de la topología en tiempo real del sistema de potencia.
- Es importante analizar cómo es la actuación de protecciones adaptativas cuando se tienen diversas condiciones de operación del sistema de potencia.
- Para caracterizar el problema es necesario registrar que tipo de fallas se han presentado y a que distancia han ocurrido.

- Planteamiento de ventajas y desventajas del uso de inteligencia artificial para la detección selectiva de fallas en líneas de transmisión.
- Se debe investigar aplicaciones de protecciones adaptativas en líneas de transmisión de dos terminales.
- Hacer una investigación si la implementación de algoritmos de inteligencia artificial para detección de fallas se ha masificado o se sigue trabajando con los métodos convencionales.

Raíces Económicas

- Se requiere disminuir los costos por operaciones indeseadas de las líneas de transmisión de un sistema de potencia.
- Evaluar el impacto en inversiones en una empresa del área eléctrica al utilizar esquemas de protecciones adaptativas en líneas del sistema eléctrico de potencia.
- Se puede reducir el costo del esquema de comunicaciones entre los relés instalados en las barras de conexión de la línea de transmisión.

Raíces Operativas

- Se requiere verificar en un sistema típico de línea de transmisión paralela de dos terminales algunos de los fenómenos que producen sobrealcance o subalcance en las protecciones distancia.
- La característica de operación normal de los relés es diferente a la curva generada por la impedancia aparente real, por lo tanto algunas fallas se escapan del alcance de actuación.

- Para un trabajo futuro se requiere evaluar el uso de estos esquemas para sistemas eléctricos aplicados a líneas multiterminales.
- El sentido de circulación de la corriente inducida en líneas paralelas influye en la mala operación del relé.
- En caso que llegue a fallar el enlace de comunicaciones entre los relés de las distintas barras, la protección distancia puede garantizar la detección selectiva de fallas dentro de la zona I.

A continuación se muestra el diagrama de árbol con los tópicos principales de la metodología de investigación del presente documento.

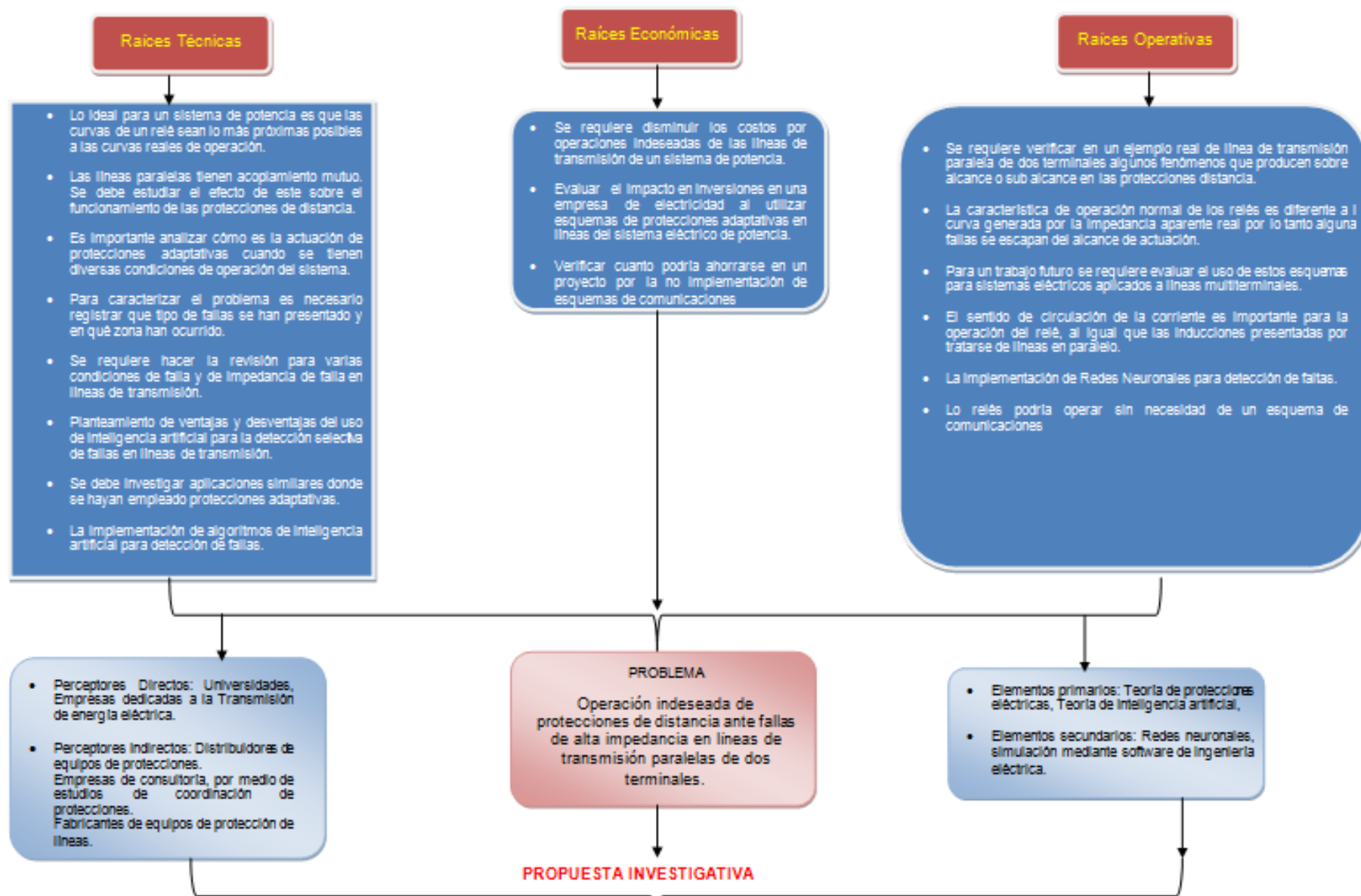


Figura 2 Propuesta Metodológica²

² Fuente: Elaboración Propia

1.3 METODOLOGÍA

La metodología para la realización de este trabajo debe cumplir con los objetivos específicos planteados anteriormente y se describe a continuación:

- Realización de la búsqueda de información de casos de éxito en la implementación de protecciones adaptativas para líneas de transmisión. Así mismo revisar si se han aplicado a líneas paralelas de dos terminales.
- Revisión de información técnica para implementación de inteligencia artificial y redes neuronales para detección de fallas de alta impedancia en sistemas eléctricos de potencia.
- Construcción de un modelo genérico de línea de transmisión paralela de dos terminales en ATPDraw para realizar diferentes tipos de sensibilidades.
- Realizar sensibilidades de simulaciones al circuito montado en ATPDraw bajo diferentes condiciones de operación (fallas, acoplamientos de líneas en paralelo, oscilaciones de potencia, crecimientos de carga) para entrenamiento y validación del algoritmo de inteligencia artificial seleccionado.
- Utilizar los resultados en MATLAB para entrenamiento y validación del algoritmo seleccionado y posteriormente.
- Analizar resultados para elaboración de conclusiones y generar ideas para trabajos futuros.
- Evaluación del documento final por parte del director del proyecto.
- Presentación y entrega del informe final para aprobación.

- Entrega del material final en biblioteca.

1.4 ORGANIZACIÓN DEL TEXTO

Este documento está compuesto por 5 capítulos de los cuales se hace una breve descripción a continuación.

El capítulo 1 contiene una breve descripción del trabajo de investigación planteado estableciendo el alcance, definición del problema, la motivación, los objetivos tanto generales como específicos y la metodología con la cual se desarrolla el proyecto.

El capítulo 2 contiene una breve revisión bibliográfica o estado del arte, un análisis de las principales referencias tenidas en cuenta para la realización de este proyecto de investigación, que tratan de los temas como ha sido la implementación de redes neuronales para en el tópico específico de protecciones adaptativas y como afectan los valores de la impedancia de falla en la operación de relés de protección de distancia.

El capítulo 3 contiene una breve fundamentación teórica sobre la protección de distancia, los problemas a los cuales puede estar sometida, además, se indica como es determinada la región de ideal de disparo de la zona 1 en la protección de distancia (procedimiento para construcción de los bordes que componen la región).

En el capítulo 4 se definen los parámetros y el sistema de potencia de estudio, adicionalmente es mostrada la formulación para los cálculos de la impedancia de falla que genera datos que posteriormente sirven como patrones de entrenamiento de las redes neuronales.

El capítulo 5 se enfoca en la implementación de redes neuronales del presente trabajo, que datos son necesarios para el entrenamiento de las redes neuronales y además para la validación.

En el Capítulo 6 se hace un análisis de las simulaciones y resultados atendiendo el objetivo del presente documento.

Posteriormente se le da paso al planteamiento de las conclusiones en el Capítulo 7 y las oportunidades de estudio para trabajos futuros aplicando redes neuronales aplicadas a la protección de líneas de transmisión paralelas de dos terminales en el capítulo 8.

Finalmente en el capítulo 9 se presenta la bibliografía con las referencias utilizadas durante el desarrollo del presente trabajo.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA (ESTADO DEL ARTE)

Durante la elaboración de este trabajo fueron consultados una gran variedad de materiales referentes a la aplicación de protecciones adaptativas de líneas de transmisión aplicables a sistemas de línea sencilla o líneas dobles o paralelas. A continuación es desarrollada una revisión del contenido de algunas referencias que sirvieron como fuente para el desarrollo del trabajo.

K. K. Li, L. L. Lai. en [1] describe los principales factores que afectan la región ideal de disparo de un relé de distancia y como esos factores se encuentran relacionados a los valores de flujo de potencia activa y reactiva de las líneas estudiadas. Con la ayuda esos datos del sistema de potencia es posible diseñar una región de operación adaptativa e inteligente. Generalmente un relé digital numérico está concebido para trabajar con una característica fija, ya sea característica Mho, cuadrilateral, etc., eso hace que las variaciones de diversas condiciones de operación de un sistema de potencia puedan afectar el funcionamiento de un relé, que ocurran sobre alcances o sub alcances en la detección de las fallas. Lo esperado en un sistema de protección es que no haya operaciones indebidas cuando realmente no sean necesarias, allí es donde gana importancia la existencia de un sistema adaptativo inteligente, que opere selectivamente en fallas que ocurran dentro de la primera zona, o sea, en la línea de transmisión. Un parámetro adicional a las variaciones de condiciones de operación de un sistema y con las cuales los relés de distancia pierden selectividad son las fallas de alta impedancia. En este documento es estudiado un sistema de potencia de 400 kV con líneas de transmisión, conectando 3 barras entre sí, formando un anillo. Son aplicadas fallas monofásicas a tierra de alta impedancia hasta cubrir el 80 % de la longitud de la línea para poder crear una región adaptativa de operación del relé que determina la zona 1 del esquema de protección de distancia de la línea. Son tenidos en cuenta entonces los valores de flujos de potencia activa y reactiva de la línea para crear la zona adaptativa, esta zona puede entenderse como una característica de operación

de un relé de distancia, muy parecida a la característica cuadrilateral, formada por 4 bordes y que es representada en el plano R-X. Son probados 2 casos de transferencia de potencia entre los equivalentes de las tres barras y los resultados encontrados arrojaron que la variación de potencia transmitida entre los equivalentes no tiene una diferencia significativa las regiones adaptativas tienen una forma similar, es notada una variación de los resultados encontrados al hacer variaciones de potencia activa y reactivas importantes. Se llegó a la conclusión que la variación de la longitud de la línea no influye en el cálculo de la región ideal de disparo adaptativa.

S Jamali. en [2] plantea una protección adaptativa rápida para una línea típica de 400 kV, el modelo adaptativo ha sido concebido para cubrir el 95 % de la longitud de la línea (en la primera zona) y que mejora la operación de la protección de distancia para fallas con valores de impedancia elevados. Son definidas dos regiones de protección dentro de la región adaptativa, una región llamada exacta que es fija y depende de las condiciones de operación del sistema de potencia y una región inexacta. La región de actuación exacta es una región menor que la característica adaptativa total, pero mayor que una característica mho, por ejemplo. Para fallas fase a tierra de alta impedancia al 95 % de la longitud de la línea las características mho y cuadrilateral no operan mientras que la región adaptativa lo hace correctamente.

Anamika Jain, A.S. Thoke, and R. N. Patel, en [3] analiza la operación de una protección de distancia aplicada en un sistema de potencia compuesto por dos líneas paralelas y dos terminales con fuente en cada uno de ellos. Al sistema de potencia no solo fueron aplicadas fallas monofásicas a tierra, también fallas bifásicas, bifásicas a tierra y fallas trifásicas. Son utilizadas redes neuronales artificiales para localización de fallas, bajo diversas condiciones de operación de potencia, impedancia de falla, teniendo en cuenta la afectación del acoplamiento mutuo entre líneas de transmisión. El sistema simulado corresponde a uno de dos

líneas paralelas de 220 kV de una longitud de 200 km modelado en MATLAB. La implementación de las redes neuronales para la localización de fallas en líneas paralelas quedó discriminada por etapas. La primera llamada, selección correcta de la arquitectura de la red, en ella se establece que el primer paso para definir la red neuronal comprende la definición del número de entradas y salidas que la red neuronal debe tener. Entonces son definidas las entradas para entrenar la red neuronal, tres tensiones de la barra donde es instalado el relé (terminal local) y seis valores de corrientes de las dos líneas son definidas como entradas. Como salida es definida la distancia en km donde será localizada la falla, tomando como referencia el relé instalado en el terminal local. Entonces son definidas 9 entradas para la red neuronal, una salida, 40 neuronas para la capa oculta y son analizadas diferentes combinaciones de funciones de transferencias para el entrenamiento de la red neuronal, seleccionando la función *tagsin* para la capa oculta y *purelin* para la capa de salida. Entonces continúan el proceso de selección de la regla de aprendizaje. El aprendizaje por medio de *Backpropagation* es el más común, es usado en al menos el 80-90 % de aplicaciones prácticas de trabajos con redes neuronales pues es un método rápido y confiable, además que el aprendizaje por medio de *Backpropagation* puede ser usado para ajustar los pesos y bias que ayuden a minimizar el valor de error medio cuadrático de la red. Además en esa selección del mejor método del aprendizaje de la red neuronal fue seleccionada la técnica optimización de *Levenberg-Marquardt* (*trainlm*) porque es más apropiada. Al final fueron usados un total de 8800 patrones de entrenamiento relacionados a diferentes localizaciones de falla y tipo de las mismas. Una vez acabado el entrenamiento de la red neuronal son probadas diversas condiciones de operación y falla diferentes a las establecidas durante el entrenamiento, obteniendo valores de salida muy similares a los parametrizados como valores deseados (*targets*). Los resultados encontrados con redes Neuronales dan una alta precisión en la localización de fallas, una muestra de ello es la revisión de los valores de error encontrados, sabiendo que los errores son la diferencia entre los valores deseados y los valores calculados como salida.

En Bhavesh R. Bhalja and Rudra P. Maheshwari [4] se estudian diferentes condiciones operativas de un sistema de líneas paralelas de dos terminales para determinar la región de operación adaptativa de los relés de distancia cuando son afectados por acoplamiento mutuo o por efectos capacitivos propios de líneas largas. Estas condiciones afectan los relés de distancia pues hacen una lectura errónea de la impedancia aparente desde el punto de instalación del relé al punto de la falla. Este artículo relaciona el comportamiento del relé al presentarse varias condiciones de falla y las distancias de ubicación de las mismas. Las regiones de operación de un relé de distancia se ven afectadas por el tipo de falla y su ubicación, el aumento de la potencia activa por ejemplo implica aumento de los ángulos de transferencia de potencia entre dos fuentes y la región de operación cambia completamente su forma. La idea del artículo es mostrar las ventajas presentadas por la utilización de redes neuronales para detección de fallas de alta impedancia (son aplicadas fallas desde 0 hasta 200 Ω , para verificar el funcionamiento de un relé). El sistema usado corresponde a un sistema de 400 kV de líneas dobles de dos terminales con fuentes en sus dos extremos. Al aplicar inteligencia artificial los relés pueden operar más rápido, ganar sensibilidad y en algunos casos no se pierde selectividad ante las diferentes condiciones de falla establecidas. En este trabajo se muestran las diferencias en el uso de dos algoritmos para entrenar una red neuronal en la detección de fallas. Con los algoritmos se construye la región de disparo del relé mediante una etapa de entrenamiento y posteriormente en la etapa de validación. Cualquier condición de operación diferente a los valores usados en la etapa de entrenamiento presentada debe ubicarse en esta región de disparo, si esto no es así la red no se entrenó adecuadamente. Los algoritmos usados son BPNN (Backpropagation neural network) y RBFNN (radial basis function neural network). La idea es construir una red de un sistema de potencia y para esta hacer una verificación de cual algoritmo es más eficiente al momento de ajustarse a las líneas de frontera de la región de disparo, para ello se tiene en cuenta los valores de flujos de potencia activa y reactiva en prefalla y postfalla, estos, son usados

como datos de entrada a la redes neuronales. La conclusión de este trabajo es que el algoritmo con mejor desempeño es RBFNN dado que este se acomoda de una manera similar a la salida esperada a los 4 bordes que componen la región de disparo del relé, por lo tanto en la validación del algoritmo todas las fallas van a ubicarse en dicha región, generando disparo adecuado de la protección de la línea de transmisión. El entrenamiento de la red neuronal fué hecho con 21 condiciones de operación. En este caso la aplicación de redes neuronales Backpropagation no se adapta a la curva de la región de operación y en algunos casos presenta valores negativos al ser graficados los resultados en el plano R-X.

En [5] Upendar, J.; Gupta, C.P.; Singh, G.K muestran un procedimiento similar al usado en la referencia [4], en este caso no se hace comparación a diferentes métodos de entrenamiento de redes neuronales, solo es usado algoritmo BPNN (Backpropagation Neural Network). Se quiere demostrar que con la implementación de redes neuronales se pueden reducir las falsas operaciones de una protección de distancia. Se muestra que al entrenar la red neuronal el resultado de ello es la adaptación de los bordes de la región de disparo encontradas mediante entrenamiento a los bordes calculados como deseados. El contenido de esta referencia ofrece una solución más robusta a las falsas operaciones de los relés, ya que son analizados conjuntamente acoplamientos mutuos y efecto capacitivo, condiciones que se tuvieron en cuenta en la referencia anterior pero separadamente. Este artículo mostró que el algoritmo BPNN es una buena herramienta para entrenar redes neuronales.

K. K. Li, Y. Q. Xia. En [6] analiza diferentes condiciones que afectan las protecciones de distancia de un sistema de potencia. Dentro de los problemas están los cambios de los valores de flujos de potencia activa y reactiva. Es usado un sistema de 3 barras denominadas como local, remoto y externa, barras de un sistema de potencia con tensión de alimentación de 400 kV. El relé analizado es ubicado en la barra denominada local y en una de las líneas es aplicada una falla

con resistencia R_f . Este trabajo se enfoca en la implementación de una protección adaptativa de distancia por medio de redes neuronales, más específicamente Backpropagation. Son definidos los cuatro bordes de la protección adaptativa donde al igual que los casos anteriores son calculados aplicando fallas al inicio o al 80 % de la línea variando el valor de la impedancia de falla o la localización de la misma. Las condiciones iniciales de pesos y bias fueron encontradas por medio del método de Nguyen-Widrow y el entrenamiento fue elaborado con el método de Levenberg-Marquardt (trainlm) ya que es la una técnica de optimización más poderosa. Son definidas las entradas y salidas de cada red neuronal, para ello, son creadas tres redes neuronales que van a definir tres bordes, en cada red se utilizan 3 capas, la de entrada, la capa oculta y una capa de salida. Para la capa oculta es usada la función de transferencia tagsin, mientras que para la capa de salida la función de transferencia purelin. Como datos de entrada se tiene la potencia activa, potencia reactiva y dependiendo el borde a calcular, el valor de R o X calculado manualmente de la impedancia aparente, mientras que para crear el vector de valores deseados se utiliza el dato de la impedancia aparente que no fue utilizado (R o X) como entrada a la red neuronal. Para entrenar la red neuronal son definidos ocho condiciones de operación de transferencia de potencia entre el terminal local y los otros dos terminales, usando para el entrenamiento de cada red neuronal 15 neuronas en la capa oculta. Para probar el entrenamiento de la red neuronal fueron creados 4 casos que demostraron que para fallas de resistencias mayores que 200 Ω y para una localización de las mismas de más del 80 % el relé no las tiene en cuenta, ya que el entrenamiento permite determinar la región ideal de operación del relé que sirve para detectar fallas internas de la línea de transmisión, o sea, fallas ocurridas en menos del 80 % de la longitud de la línea.

3 FUNDAMENTACIÓN TEORICA DE LA PROTECCIÓN DISTANCIA

3.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LA PROTECCIÓN DE DISTANCIA

La protección de distancia es principalmente usada como protección principal o de respaldo en líneas de transmisión. También conocida como función de protección 21, por su función declarada por la ANSI. La protección de distancia presenta las siguientes ventajas (ELMORE, 2003, [15]).

- Mayor cobertura para actuación instantánea
- Mayor sensibilidad, ya que los relés de sobre corriente deben ser ajustados por lo menos dos veces la corriente de carga
- Coordinación y parametrización más simple
- Zonas de protección fijas, prácticamente independientes de variaciones del sistema de potencia

En la protección de distancia, una condición de defecto es detectada a partir de las mediciones de impedancia hecha por los relés. En el caso de un corto circuito franco, la impedancia medida será directamente proporcional a la distancia entre el relé y el punto de defecto.

Cada una de las unidades debe ser alimentada por las respectivas señales de corriente (I_r) y voltaje (V_r), de forma que la impedancia medida por cada una de ellas sea la relación entre los dos valores, o sea $Z_r = V_r / I_r$. Un aspecto importante en la concepción de la protección distancia para líneas de transmisión, es seleccionar de forma correcta las señales de V_r e I_r , de forma que, en las condiciones de cualquier corto circuito franco, la impedancia medida por alguna de las unidades sea igual a la impedancia de secuencia positiva entre la localización del relé y el punto de falla (COOK, 1985, [16]).

Tabla 1 Señales de entrada para las unidades de fase-tierra y fase-fase del relé de distancia

Unidad	Señales de tensión	Señales de corriente
Z_{AT}	V_a	$I_a + K_0 I_0$
Z_{BT}	V_b	$I_b + K_0 I_0$
Z_{CT}	V_c	$I_c + K_0 I_0$
Z_{AB}	$V_a - V_b$	$I_a - I_b$
Z_{BC}	$V_b - V_c$	$I_b - I_c$
Z_{CA}	$V_c - V_a$	$I_c - I_a$

La selección de la impedancia de secuencia positiva se debe al hecho de que ella es distribuida y considerada constante con relación a la distancia. De hecho, su valor depende de las características de los conductores y de sus posiciones geométricas. Además ella es común en todos los tipos de corto circuito y es poco afectada por la resistividad del suelo. En la Tabla 1 se presenta un resumen de las señales de entrada de las seis unidades de impedancia del relé de distancia (ZIEGLER, 2006, [17]) siendo el término K_0 denominado como factor de compensación de secuencia cero, que puede ser calculado con la siguiente expresión:

$$K_0 = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{Z_{L1}} \quad (1)$$

Donde Z_{L0} y Z_{L1} son las impedancias de secuencia cero y positiva de la línea de transmisión que el relé está protegiendo. En la Tabla 2 es presentada una relación de las unidades del relé que deben operar al presentarse una falla monofásica.

Tabla 2 Unidades del relé que deben operar falla monofásica

Tipo de falla	Fase afectada	Sigla	Unidades del relé					
			Z_{AT}	Z_{BT}	Z_{CT}	Z_{AB}	Z_{BC}	Z_{CA}
Monofásica	A	AT	X	--	--	--	--	--
	B	BT	--	X	--	--	--	--
	C	CT	--	--	X	--	--	--

3.2 EL DIAGRAMA R-X Y LAS CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN

Las características de un relé de distancia son presentadas de forma conveniente en un diagrama de impedancias denominado R-X, cuyo eje de las abscisas representa la resistencia R y el eje de las ordenadas representa la reactancia X. A partir de la relación entre los fasores V_R e I_R medidos por el relé se obtiene la impedancia aparente Z_R vista por el relé, cuyas coordenadas en el diagrama R-X son $R_R = |Z_R| \cos \theta$ y $X_R = |Z_R| \sin \theta$. Por su naturaleza distribuida, el lugar geométrico de la impedancia de secuencia positiva de una línea de transmisión en el plano R-X es un segmento de recta. La representación del diagrama de R-X y la característica de la línea de transmisión en este plano pueden ser vistas en la Figura 3 un relé de distancia debe operar en el caso que Z_R esté dentro de la característica de operación, que consiste en una figura geométrica en el plano R-X. Diversas figuras geométricas son usadas, tales como círculos, rectángulos y elipses o también la combinación de ellas como se muestra en la Figura 4. La selección de la característica a ser usada depende de un estudio del comportamiento del sistema a ser protegido.

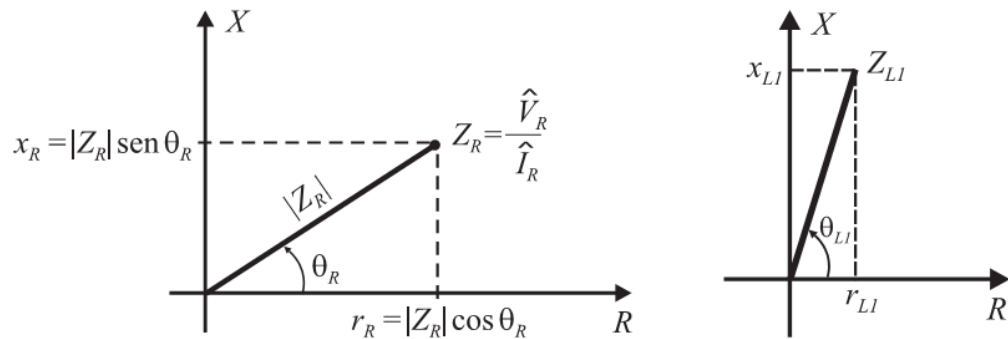


Figura 3 (a) Diagrama R-X; (b) Representación de la impedancia de secuencia positiva de una línea de transmisión³

³ Fuente: Elaboración Propia

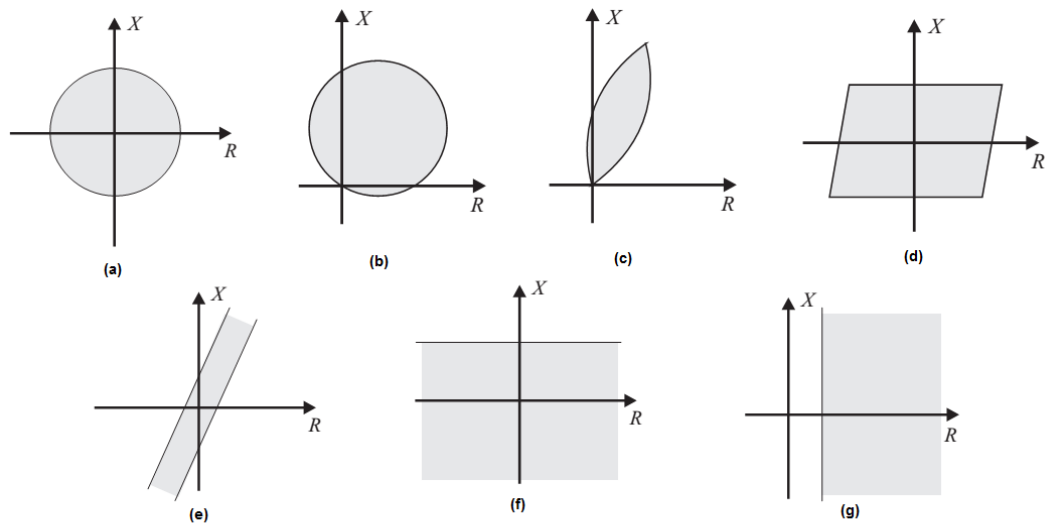


Figura 4 Tipos de características de operación de un relé distancia (a) Impedancia; (b) Mho; (c) Lenticular; (d) Rectángulo, (e) Blinder; (f) Reactancia; (g) Resistencia⁴

La impedancia aparente Z_R vista por el relé puede ser modificada por diversos factores. Hay la posibilidad de que el valor de la impedancia aparente sea diferente a la impedancia de secuencia positiva del tramo de línea de entre el relé y el punto de falla. Entre esos factores influyentes para esos valores están, el valor de resistencia de falla, el valor de SIR, el acoplamiento mutuo, las corrientes infeed y outfeed provenientes de los terminales de las líneas de transmisión y la presencia de dispositivos de compensación serie, por ejemplo.

3.3 ZONAS DE LA PROTECCIÓN DE DISTANCIA

Las características de selectividad y coordinación están relacionadas al ajuste de sus zonas de protección, que consisten en diferentes alcances, asociados a diferentes tiempos de atraso. Entonces son utilizadas dos zonas de protección el

⁴ Fuente: Elaboración Propia

relé, pero dependiendo de la aplicación más zonas pueden ser consideradas (ZIEGLER, 2006, [17]).

Típicamente, la impedancia de alcance de la primera zona de protección corresponde a un porcentaje de 80 a 85 % de la impedancia total de la línea. Esta zona es considerada sin atraso intencional de actuación, es decir de actuación instantánea. El margen de seguridad de 15 a 20 % es necesariamente debido a las imprecisiones provocadas por diversas fuentes de error, tales como, los transformadores de instrumentos que pueden verse afectados por sobre o subalcance generando operaciones indeseadas de la protección (COOK, 1985, [16]). Un relé de distancia se encuentra sobre alcanzado cuando el valor de la impedancia medida por él, es menor que su valor real. Caso contrario, si el valor de la impedancia medida es mayor que su valor real, entonces este se encuentra sub alcanzado. El sobre alcance se considera como un problema grave, ya que hay disminución de la selectividad del sistema de protección, el relé puede actuar instantáneamente y para cortos fuera de su primera zona de protección. La segunda zona de protección debe cubrir el 100 % de la línea protegida por la primera zona, mas alrededor de 50 % de la línea más pequeña conectada a su terminal remoto. Típicamente su operación tiene un retardo de 200 a 500 ms.

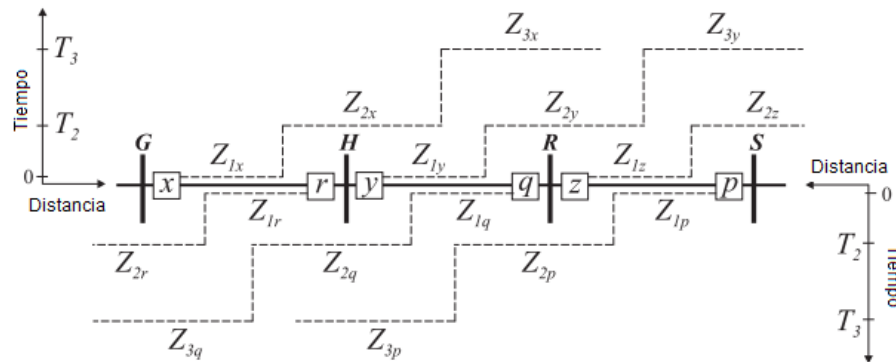


Figura 5 Representación de las zonas de la protección de distancia⁵

⁵ Fuente: Elaboración Propia

3.4 ESQUEMAS DE TELEPROTECCIÓN DE DISTANCIA

Como se discutió en el numeral 3.3 del presente documento la primera zona de un relé de distancia es ajustada para cubrir el 80 % de la línea de transmisión, siendo los 20 % restantes protegidos por la segunda zona, que posee un atraso de 200 a 500 ms. Si se considera el caso práctico de un relé en cada terminal de la línea, ver Figura 6, se puede notar que un 40 % de la línea, la extinción de una falla es retardada por el atraso de la segunda zona. En algunos casos ese atraso no es conveniente, para combatir esta situación, son empleados los esquemas de protección de distancia con comunicación lógica.

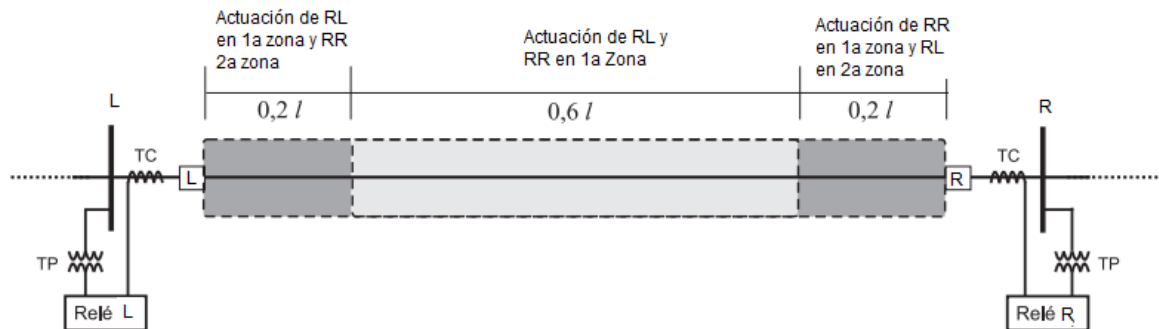


Figura 6 Representación de la intersección de zonas de actuación de los relés en los terminales de una línea de transmisión⁶

Al contrario de los esquemas de protección diferencial de líneas, donde son compartidas informaciones de tensión, corriente, etc. En los esquemas de protección de distancia solo se intercambia informaciones de estados lógicos de los relés. De esta forma no es necesaria la implementación de esquemas de comunicación con grandes anchos de banda para establecer comunicación entre los relés, que reducen considerablemente los costos de los proyectos del sistema de comunicaciones entre los terminales de la línea. Además, otra desventaja de la implementación de protección diferencial en líneas de transmisión es que no proveen protección de respaldo, característica principal de la protección de

⁶ Fuente: Elaboración Propia

distancia. Por este y por otros motivos, los esquemas de protección de distancia con comunicación lógica son ampliamente empleados en la protección de líneas de transmisión (ZIEGLER, 2006, [17]). A continuación se muestran los esquemas de transferencia de disparo más usados en protección de distancia.

3.4.1 Esquema de disparo permisivo por Sub alcance (PUTT)

El esquema de disparo permisivo por sub alcance, del inglés Permissive underreaching transfer trip (PUTT) utiliza un elemento instantáneo de primera zona para disparar el interruptor local y enviar una señal permisiva para el relé en la terminal remota de la línea de transmisión. El relé de la terminal remota, a su vez, dará comando de abertura al interruptor dado el caso que reciba la señal de disparo permisivo y su elemento de segunda zona haya detectado la falla. Ver Figura 7. El esquema de disparo permisivo por sub alcance es muy usado en la protección de líneas de circuito paralelo, pues no necesita una lógica adicional para mantener la seguridad sobre condiciones de corriente reversa.

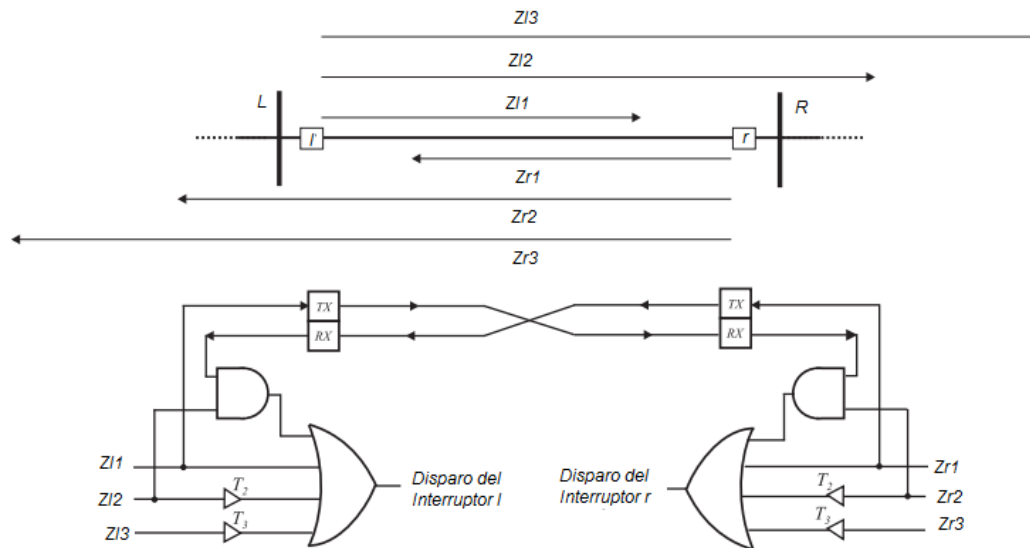


Figura 7 Representación de la lógica del esquema de disparo permisivo por sub alcance⁷

⁷ Fuente: Elaboración Propia

3.4.2 Esquema de disparo permisivo por Sobre alcance (POTT)

El esquema de disparo permisivo por sobre alcance, del inglés Permissive overreaching transfer trip (POTT), utiliza un elemento temporizado de segunda zona para enviar una señal de disparo para el relé en el terminal remoto de la línea. El relé en el terminal local, a su vez, dará un comando de abertura al interruptor, en el caso en que su elemento de segunda zona haya detectado la falla. Ver Figura 8. Este tipo de esquema requiere una lógica adicional para mantener la seguridad sobre condiciones de corrientes reversas en el caso de la protección de líneas de circuito paralelo.

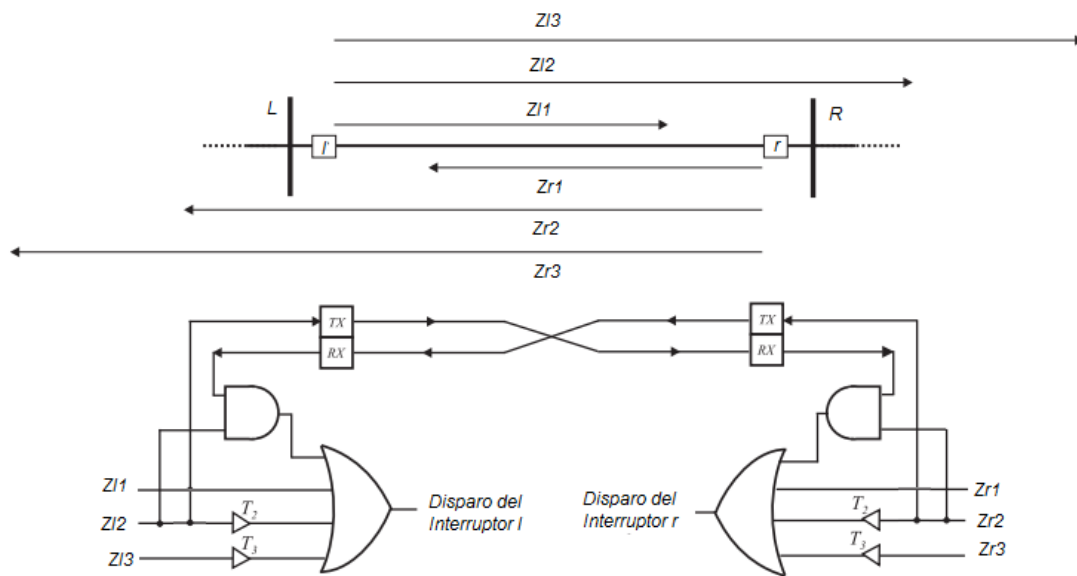


Figura 8 Representación de la lógica del esquema de disparo permisivo por sobre alcance⁸

3.5 PROBLEMAS ASOCIADOS A LA PROTECCIÓN DE DISTANCIA

Como se había mencionado anteriormente la protección de distancia es la protección más utilizada en líneas de transmisión como protección principal o de

⁸ Fuente: Elaboración Propia

respaldo. Sin embargo esta protección está sujeta a verse afectada por problemas como los mencionados a continuación:

- Fallas cercanas
- Resistencia de falla
- Efectos Infeed y outfeed
- Acoplamiento mutuo
- Capacitor serie
- Oscilaciones de potencia
- Sobrecargas
- Transitorios

Se enfatiza solo en los problemas que son explorados en este documento como sigue:

3.5.1 Impedancia de falla

Las impedancias de las fallas son la representación de la impedancia del camino de la corriente de falla, estas pueden tener valores lineales y no lineales. Los valores lineales pueden ser valores resistivos o inductivos. El camino para la corriente de falla puede estar compuesto por el arco producido entre un elemento energizado comúnmente un elemento conductor y un elemento aterrizado u otro elemento como otro conductor. Por ejemplo, la falla que pueda generar un árbol en contacto con líneas de transmisión es considerada una falla netamente resistiva y de un valor elevado. Las fallas presentadas entre dos conductores o también llamadas fase - fase son consideradas fallas de baja impedancia, dado que la impedancia solo alcanza algunos pocos ohmios.

Una falla provocada por el rompimiento de una cadena de aisladores de una línea de transmisión aproximadamente puede estar en el rango de 5 – 50 Ω , mientras que en el caso de una falla ocasionada por un árbol puede alcanzar centenas de ohmios. Caso contrario sucede con las fallas derivadas de descargas atmosféricas, ya que

estas presentan valores muy bajos de impedancia de falla, ubicados en el rango de $0 - 10 \Omega$, (CALDERON, [19]).

Las fallas no lineales son consideradas fallas de alta impedancia, en estas se puede encontrar que la magnitud de corriente de falla es muy reducida.

A continuación se presentan tablas que registran valores típicos de valores de resistencia de falla para diferentes tipos de falla, en cada tabla se reportan los valores típicos de resistencia de falla, clasificando estos en valores altos y bajos según el tipo de la misma

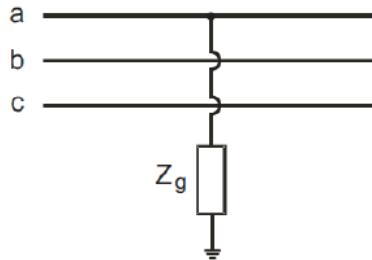


Figura 9 Falla Fase- tierra⁹

Tabla 3 Valores de Falla monofásica (fase-tierra)

Clasificación	Valor de impedancia [Ω]
Baja impedancia	0.01
Alta impedancia	100

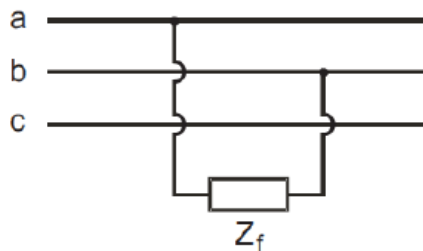


Figura 10 Falla Fase- fase¹⁰

Tabla 4 Valores de Falla bifásica (fase-fase)

⁹ Fuente: Elaboración Propia

¹⁰ Fuente: Elaboración Propia

Clasificación	Valor de impedancia [Ω]
Baja impedancia	0.01
Alta impedancia	10

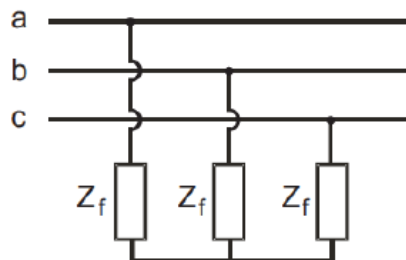


Figura 11 Falla trifásica¹¹

Tabla 5 Valores de Falla trifásica

Clasificación	Valor de impedancia [Ω]
Baja impedancia	0.01
Alta impedancia	5

Este documento solo toma el caso de las fallas presentadas entre fase y tierra para la identificación de la región ideal de disparo de una protección de distancia por medio de redes neuronales, ya que es el tipo de falla más común en un sistema eléctrico de potencia (SEP), además como se mencionó anteriormente, las fallas monofásicas a tierra son las que presentan los valores más elevados de impedancia de falla, teniendo en cuenta que para fallas monofásicas fase – tierra es más complicado que el relé actúe, además que en este caso es analizada la afectación que asociada al acoplamiento mutuo relacionado con los datos de secuencia cero. De todas formas el esquema para calcular la región de disparo también puede ser analizado implementando las demás condiciones de falla (trifásica, bifásica, trifásica a tierra, etc), entonces, la cantidad de datos asociados al entrenamiento de las redes neuronales se incrementan significativamente, así como los datos para validación y prueba de la red neuronal.

¹¹ Fuente: Elaboración Propia

3.5.2 Acoplamiento mutuo

El funcionamiento de los relés de distancia se ve afectado por el acoplamiento mutuo presentado en líneas de transmisión. Este acoplamiento varía dinámicamente acorde con los cambios topológicos del sistema y las condiciones variables del despacho de carga.

El acoplamiento mutuo de secuencia cero es más fuerte que el presentado en secuencia positiva o negativa, se conoce que el acoplamiento de secuencia cero puede llegar a ser del 70 % de la impedancia de la línea, mientras que el acoplamiento de secuencia positiva y negativa llega a ser el 7 % (BHAVESH, 2007, [4]) y (BHAVESH, 2007, [7]), concluyendo que este valor es despreciable comparándolo con el impacto generado por la secuencia cero. Esto hace que al presentarse fallas a tierra se induzcan voltajes y corrientes de las fases falladas a las fases sanas. Lo anterior produce errores en la medición de la impedancia aparente vista por el relé de distancia, generando operaciones indeseadas.

Son varios las configuraciones de líneas paralelas que se pueden encontrar en los sistemas eléctricos de potencia. Cuando las líneas de transmisión conectadas en paralelo comparten las barras en ambos extremos y estas líneas adicionalmente tienen fuentes en cada extremo son llamadas líneas de secuencia positiva y secuencia cero común. Las líneas que tengan una sola barra coincidente son también conocidas como líneas de secuencia positiva común y de secuencia cero aislada y las líneas paralelas en todo su recorrido pero con barras y fuentes independientes son llamadas también líneas de secuencia positiva y cero aisladas. En el presente trabajo solo se trabaja con el primer tipo de configuración, o sea líneas compartiendo las barras en ambos extremos.

Para líneas paralelas en este trabajo son evaluadas dos condiciones de operación típicas, que están presentes en sistemas de potencia, con el fin de verificar los aportes del factor de acoplamiento. La primera se denomina Modo de operación 1

y corresponde a la operación de las dos líneas, pero, una de ellas está fallada con una falla monofásica a tierra. Ver Figura 12.

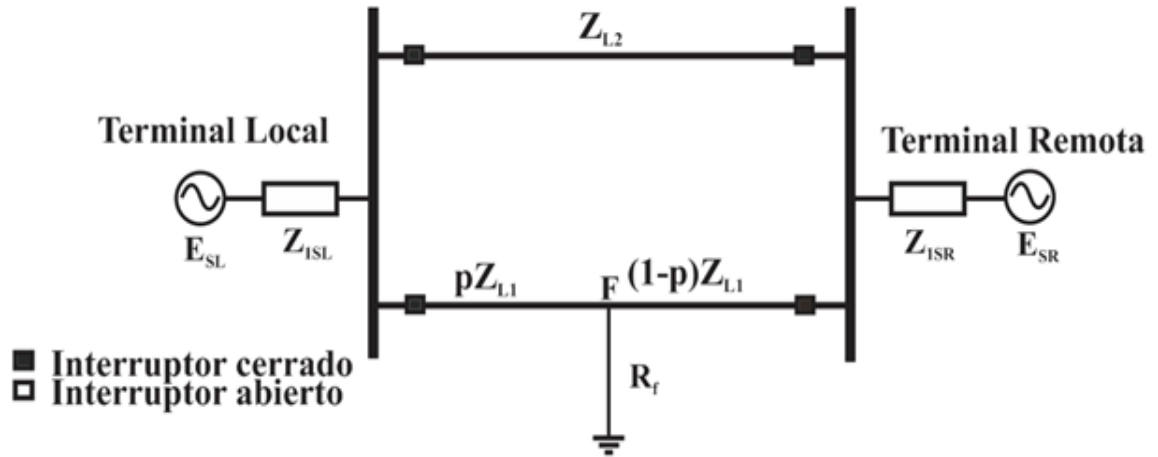


Figura 12 Falla monofásica a tierra Modo de operación 1¹²

La segunda condición de operación es denominada Modo de operación 2 y corresponde a la operación de un sistema de potencia de dos líneas conectadas en paralelo, con una en operación y afectada por una falla monofásica a tierra, mientras que la otra línea se encuentra aislada de los dos terminales y aterrizada en los extremos. Ver Figura 13.

¹² Fuente: Elaboración Propia

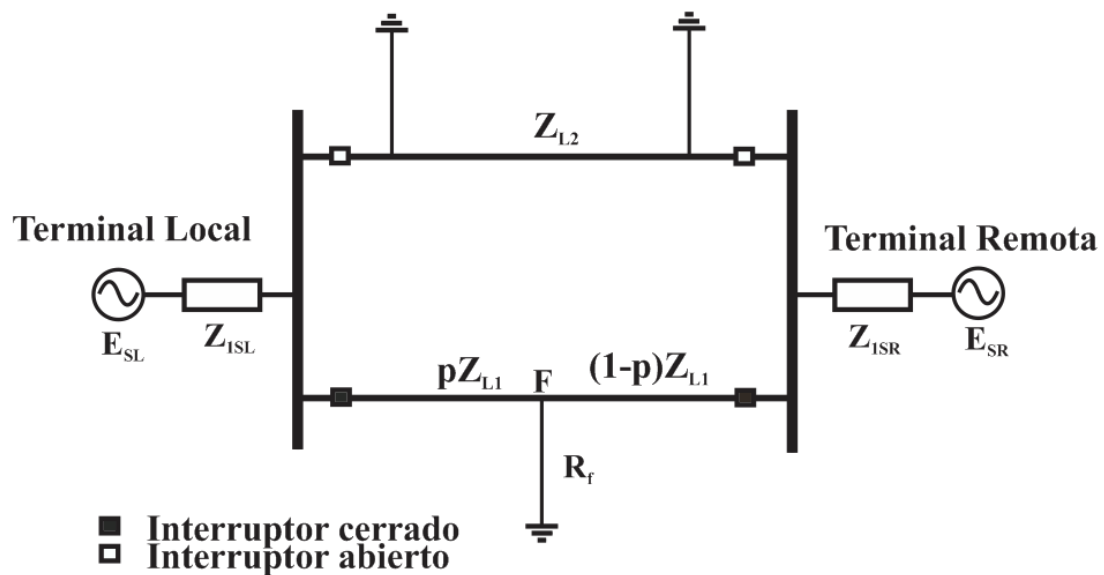


Figura 13 Falla monofásica a tierra Modo de operación 2¹³

Este modo de operación es presentado comúnmente cuando se realizan mantenimientos en líneas de transmisión, pues permite brindar seguridad a al personal que trabaja en la línea.

Los modos de operación anteriormente definidos hacen parte de los casos generados para entrenamiento de la red neuronal.

En la Figura 14 se puede observar como es modificada la región ideal de disparo de un relé debido al uso de términos que asocian acoplamiento mutuo para las líneas paralelas, diferente situación a la que acontece con una línea sencilla que no posee acoplamiento mutuo, se debe tener en cuenta que existe una cobertura mayor para las líneas paralelas para poder detectar fallas de alta impedancia.

¹³ Fuente: Elaboración Propia

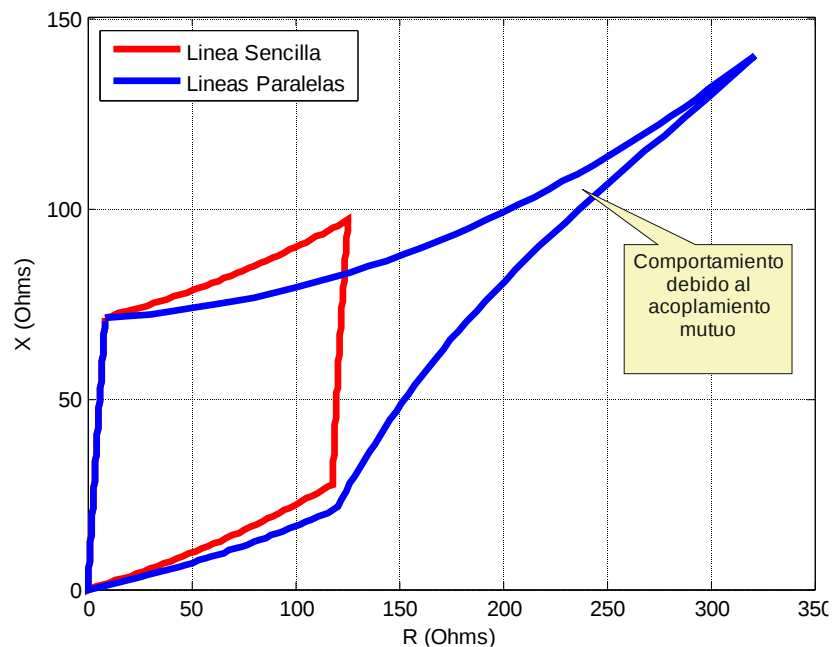


Figura 14 Comparación Región de operación con y sin acoplamiento¹⁴

3.6 REGIÓN IDEAL DE OPERACIÓN DE UN RELÉ (REGIÓN DE DISPARO)

La región ideal de disparo para un relé de distancia está compuesta por 4 líneas llamadas líneas de frontera o bordes. Para construir estas líneas es necesario realizar los cálculos de cada una por separado, para cada condición transferencia de potencia activa y reactiva entre lo equivalentes de Thévenin de dos terminales establecidas y con valores de resistencia de falla variando de 0 a 200 Ω y el sitio de la falla variando desde el punto de instalación del relé y hasta tener un cubrimiento del 80% de la longitud de la línea protegida (Zona 1). El valor de resistencia de falla máxima de 200 Ω es un valor típico que puede presentarse en sistemas de alto voltaje. La región se obtiene graficando en el plano R-X la impedancia vista por el relé ($Z_a = R_x + jX_x$) para cada caso bajo falla. Los bordes se obtienen de la siguiente manera:

- Borde A: aplicando fallas en el extremo del alcance del relé (80 % de la longitud de la línea), con una resistencia de falla variando de 0 a 200 Ω .

¹⁴ Fuente: Elaboración Propia

- Borde B: aplicando fallas a diferentes longitudes de la línea con una resistencia de falla fija de 200Ω .
- Borde C: aplicando fallas en el sitio de ubicación del relé (0 % de la longitud de la línea) con una resistencia de falla variando de 0 a 200Ω .
- Borde D: aplicando fallas sólidas de 0 al 80 % de la longitud de la línea.

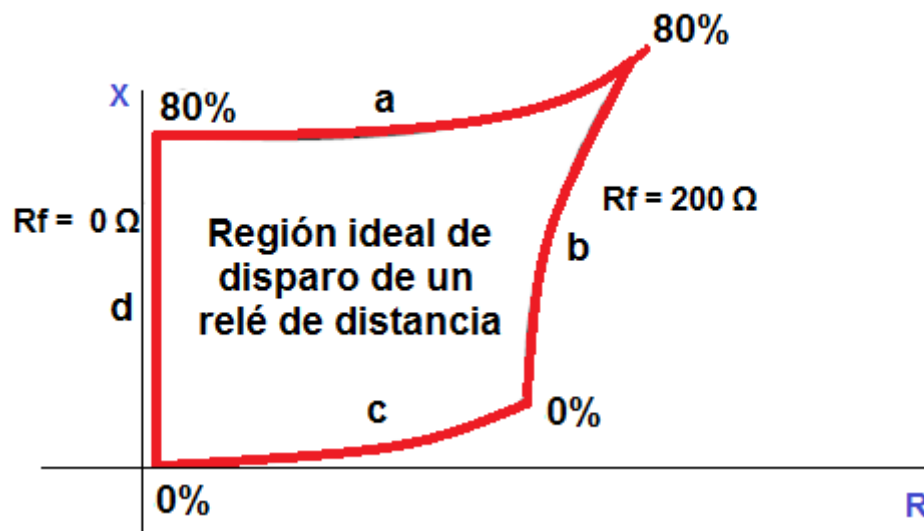


Figura 15 Región ideal de disparo de un relé de distancia¹⁵

La forma de la región de operación varía si los valores de tensiones y ángulos de las fuentes de los equivalentes también varían. Las diferencias más significativas se obtienen cuando se transmite valores elevados de potencia activa del terminal local al terminal remoto, por ejemplo, por lo tanto se puede decir que el principal factor que va a cambiar la curva de operación de un relé de distancia son los flujos de potencia activa y reactiva sobre una línea de transmisión. Cualquier condición de falla que se encuentre dentro de esta región formada por los cuatro bordes definidos anteriormente va a activar el envío de la señal de disparo por parte de un relé de distancia al interruptor asociado de la línea de transmisión. En el Capítulo 4 se relacionan diversas condiciones de cambio de flujo de potencia activa y reactiva

¹⁵ Fuente: Elaboración Propia

que van a generar varias formas de la región de operación ideal del relé de operación, con ello se va a mostrar cómo estos valores de potencia activa y reactiva son influyentes para construir dicha región.

4 SISTEMA MODELADO, CÁLCULO DE IMPEDANCIA DE FALLA Y METODOLOGIA DE ENTRENAMIENTO

4.1 SISTEMA MODELADO

En este capítulo se presenta información del sistema de potencia usado para realizar las simulaciones para el modelo adaptativo de protección de distancia. Ver la Figura 16. La idea es que en base a ese sistema de potencia se realice una gran cantidad de simulaciones que tenga en cuenta la variación paramétrica de los componentes del sistema, o sea, que se modifiquen valores para generar casos de simulación y posteriormente usar esos caso como información de entrada de las redes neuronales.

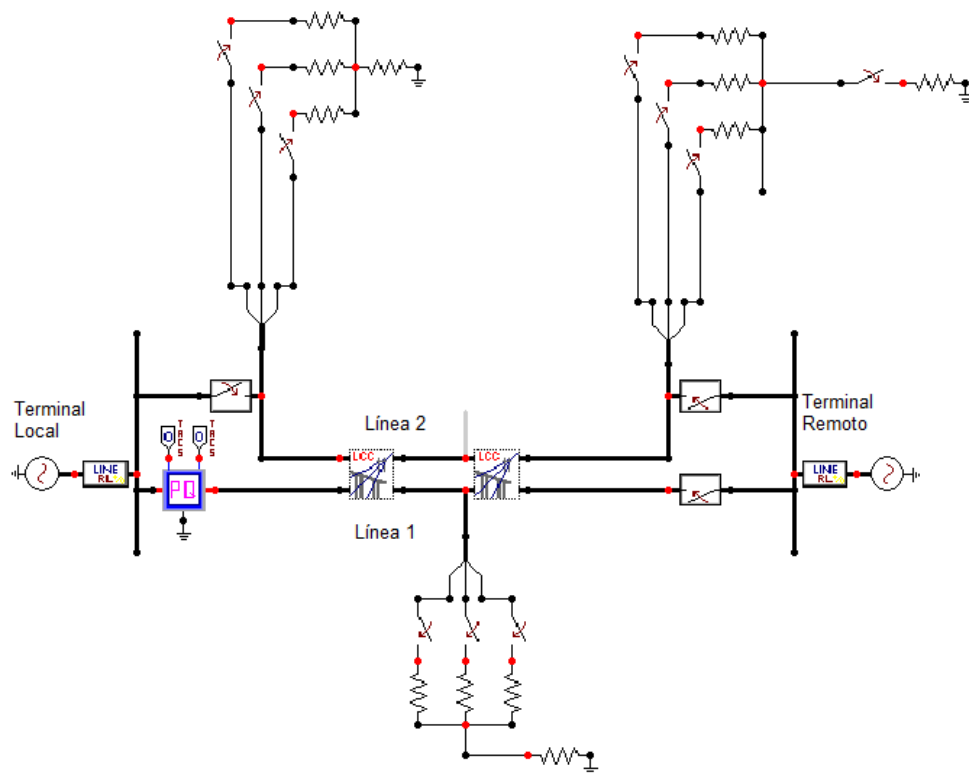


Figura 16 Sistema de potencia modelado en ATPDraw¹⁶

¹⁶ Fuente: Elaboración Propia

El sistema de potencia consiste en dos líneas paralelas que comparten ambos terminales en los cuales son conectadas. En cada terminal se tiene un equivalente de Thévenin que simula los niveles de corto circuito en cada extremo de la línea y los valores de ángulos y tensiones son variados para que simulen varios flujos de potencia activa o reactiva entre los dos terminales de las líneas, exportación de potencia.

Fueron tomados como referencia para el montaje y posteriores simulaciones, datos de equivalentes y líneas de un sistema de dos líneas paralelas del STN, esos datos son establecidos en la referencia (TEJADA, 2012, [18]) y son utilizados además por ser datos de líneas a 230 kV (cabe hacer una observación y es que las referencias consultadas sobre el tema, sólo trabajan con sistemas a 400 kV, que al final son los mismos datos usados en todas la referencias). Los parámetros de los equivalentes de Thévenin son listados en la Tabla 6. La fuente de tensión y su equivalente en la parte izquierda se le denomina terminal Local mientras que el equivalente de la derecha y su respectiva fuente de tensión se le denomina terminal remoto.

Tabla 6 Datos equivalentes de red¹⁷

Parámetro	Terminal Local	Terminal Remoto
I _{cc} 3φ [kA]	13.48	10.39
I _{cc} 1φ [kA]	13.15	11.48
R ₀ [Ω]	1.306	0.979
X ₀ [Ω]	9.863	8.048
R ₁ [Ω]	0.817	0.902
X ₁ [Ω]	9.279	12.044

Los datos de las líneas de transmisión también fueron tomados de las referencia citada anteriormente, ver Tabla 7.

Tabla 7 Datos de líneas de transmisión¹⁸

Parámetro	Línea Local – Remoto
Longitud [km]	193.3
R ₀ [Ω/km]	0.4013
X ₀ [Ω/km]	1.3275
R ₁ [Ω/km]	0.0547

¹⁷ Datos de Equivalentes de Esmeralda – Yumbo 230 kV del STN, tomado de Referencia [18], (Tejada, 2012)

¹⁸ Datos de línea de transmisión Esmeralda – Yumbo 230 kV del STN, tomado de Referencia [18], (Tejada, 2012)

Parámetro	Línea Local – Remoto
X_1 [Ω/km]	0.4618
$R_{0\mu}$ [Ω/km]	0.20052
$X_{0\mu}$ [Ω/km]	0.7842

La simulación de las líneas fue hecha con el elemento LCC de ATPDraw, teniendo en cuenta dos circuitos paralelos en una sola torre de 230 kV. Se nota de la Figura 16 que en la simulación son usadas ramificaciones con elementos resistivos para implementar los diferentes valores de resistencias de falla a lo largo de la LT1, que es la línea a la cual se le aplican las fallas monofásicas. Por otro lado en la LT2 también se cuenta con elementos resistivos e interruptores para simular los diferentes modos de operación de esa línea. La LT2 es la línea que opera con y sin aterramientos en sus extremos.

4.1.1 Variaciones de potencia del terminal local al terminal remoto

Para simular las variaciones de potencia, en este caso, exportación de potencia activa y reactiva desde el terminal local hasta el terminal remoto fueron definidas 15 condiciones de operación, donde 5 corresponde a variaciones de potencia activa y 3 a variaciones de potencia reactiva al terminal remoto. El valor de potencia activa varía en el rango de 50 a 250 MW, mientras que el valor de la potencia reactiva de 20 a 40 MVar. En la Tabla 8 son mostradas las 15 condiciones de transferencia de potencia entre el terminal local y el terminal remoto.

Tabla 8 Variaciones de potencia activa y reactiva, casos de entrenamiento

Caso	Voltaje Local (pu)	Ángulo Local (°)	Voltaje Remoto (pu)	Ángulo Remoto (°)	Potencia Activa (MW)	Potencia Reactiva (MVar)
1	1.003	4	0.917	-1.1	50	20
2	1.024	3.8	0.918	-1.1	50	30
3	1.030	3.6	0.910	-1.01	50	40
4	1.022	8	0.932	-2.25	100	20

Caso	Voltaje Local (pu)	Ángulo Local (°)	Voltaje Remoto (pu)	Ángulo Remoto (°)	Potencia Activa (MW)	Potencia Reactiva (MVar)
5	1.017	7	0.913	-4.5	100	30
6	1.035	8.05	0.910	-2.26	100	40
7	1.004	8.05	0.923	-8.3	150	20
8	1.017	8.3	0.917	-7.9	150	30
9	1.036	8	0.916	-7.8	150	40
10	0.999	6	0.933	-16.6	200	20
11	1.003	6.05	0.918	-16.3	200	30
12	1.012	6.05	0.909	-16.2	200	40
13	0.982	8.5	0.940	-20.2	250	20
14	0.996	8	0.935	-20.2	250	30
15	1.004	8	0.922	-20.3	250	40

Además de las condiciones de operación generados para entrenamiento de las redes neuronales también son establecidos casos de validación para verificar que el entrenamiento de la red neuronal se ha cumplido satisfactoriamente, ver Tabla 9. Estas condiciones de prueba deben estar dentro del rango de las condiciones creadas para entrenar la red neuronal, así, cualquier condición que se encuentre dentro de las 15 condiciones de la Tabla 8 debe adaptarse fácilmente a los datos entrenados.

Tabla 9 Variaciones de potencia activa y reactiva, casos de Validación

Caso	Voltaje Local (pu)	Ángulo Local (°)	Voltaje Remoto (pu)	Ángulo Remoto (°)	Potencia Activa (MW)	Potencia Reactiva (MVar)
1	1.024	6.5	0.923	-4.5	105	25
2	1.007	6.2	0.913	-17.2	150	35

4.1.2 Variación del valor de la impedancia de falla

Solo fué aplicada un tipo de falla a lo largo de la línea de transmisión, falla monofásica en la fase A. Entonces para la falla aplicada sobre la LT1 son considerados valores de falla desde 0 Ω incrementando su valor 5 Ω hasta llegar a un valor máximo de 200 Ω , logrando con esto simular fallas de muy alta impedancia. Por lo tanto, se tiene un total de 41 valores de impedancia de falla.

4.1.3 Variaciones de localización de la falla

La falla monofásica sobre la LT1 también varía en su localización, ya que se modifica desde 0 % de la longitud de la línea (punto de localización del relé) hasta un 80 % de la línea, para tener en cuenta el cubrimiento de la primera zona de protección de un relé de distancia. Entonces, puede considerarse que se tienen localizaciones desde muy cercanas hasta muy lejanas, tomando como referencia el punto de instalación del relé.

4.1.4 Variación del modo de operación de las dos líneas paralelas

Son dos modos de operación del sistema de potencia simulados. Estos tienen en cuenta el efecto de acoplamiento mutuo presentado entre dos líneas paralelas y están definidos en el capítulo anterior, en el numeral 3.5.2.

4.2 CÁLCULO DE IMPEDANCIA VISTA POR EL RELÉ

El primer paso para lograr realizar el entrenamiento de las redes neuronales es implementar matemáticamente la formulación para cálculo de los bordes. En este capítulo se muestra las fórmulas necesarias para cálculo, teniendo en cuenta que es la formulación de líneas paralelas que asocian el efecto de acoplamiento mutuo entre conductores de las líneas, las fórmulas fueron identificadas en las referencias (Bhavesh, Maheshawari, 2007, [4]) y (Upendar, Gupta, 2011, [5]).

Así, el primer paso fué elaborar una planilla en Excel para poder reproducir la región de operación ideal de un relé de distancia instalado en el terminal local de un sistema de potencia de dos terminales con líneas paralelas definido en los artículos de referencia y con los siguientes parámetros:

Tabla 10 Datos de líneas de transmisión tomada de referencia¹⁹

Parámetro	Valor
Longitud [km]	128
$Z_{0L1}=Z_{0L2}$ [Ω /km]	$134.49 \angle 81.3^\circ$
$Z_{1L1}=Z_{1L2}$ [Ω /km]	$37.76 \angle 86^\circ$
Z_{0m} [Ω /km]	$87.4185 \angle 81.3^\circ$

Tabla 11 Datos de equivalentes de los terminales²⁰

Parámetro	Línea Local – Remoto
Z_{0sm} [Ω] Local	$30 \angle 85^\circ$
Z_{0sn} [Ω] remoto	$30 \angle 85^\circ$
Z_{1sm} [Ω] Local	$20 \angle 85^\circ$
Z_{1sn} [Ω] remoto	$15 \angle 85^\circ$

En la referencia (Upendar, Gupta, 2011, [5]) a modo de ejemplo son mostradas dos figuras correspondientes a la condición de operación de 2 líneas paralelas operando normalmente (Figura 17 y Figura 19) para las cuales son calculadas la característica de impedancia con acoplamiento mutuo para una relación entre la tensión de la fuente del terminal remoto y el terminal local $h=0.98$ y una diferencia del ángulo del terminal remoto y el terminal local $\delta=2^\circ$ y 20° .

En una planilla de Excel fueron realizados los cálculos de los bordes de la región ideal de disparo de un relé de distancia. El primer caso corresponde a la condición de operación donde $h=0.98$ y $\delta=2^\circ$. La región es mostrada en la Figura 18, donde es visto que la formulación utilizada logra reproducir de forma aproximada la curva de la región de impedancia vista por el relé mostrada en la Figura 17, sólo cuando se tiene en cuenta el efecto de acoplamiento mutuo entre dos líneas paralelas. La fiel representación de las regiones de operación ideal del relé va a depender de la

¹⁹ Datos de línea de transmisión tomada de la referencia [5], (UPENDAR, GUPTA, 2011), nivel de tensión de 400 kV.

²⁰ Datos de línea de transmisión tomada de la referencia [5], (UPENDAR, GUPTA, 2011), nivel de tensión de 400 kV.

utilización de los datos exactos de parámetros de líneas y del sistema de potencia simulado.

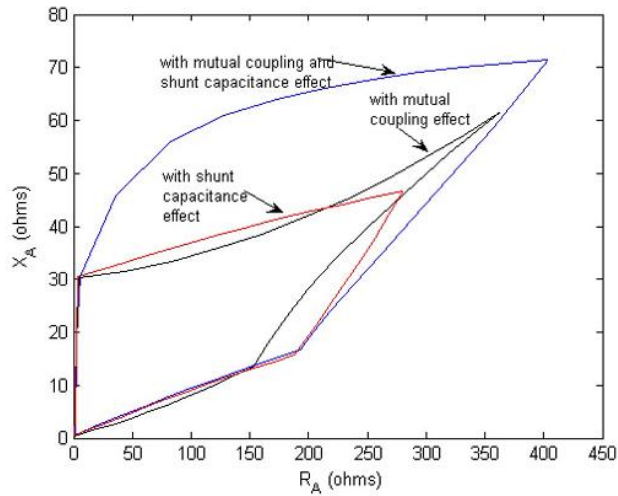


Figura 17 Impedancia aparente vista por el relé con acoplamiento mutuo, $h=0.98$ e $\delta=2^\circ$ ²¹

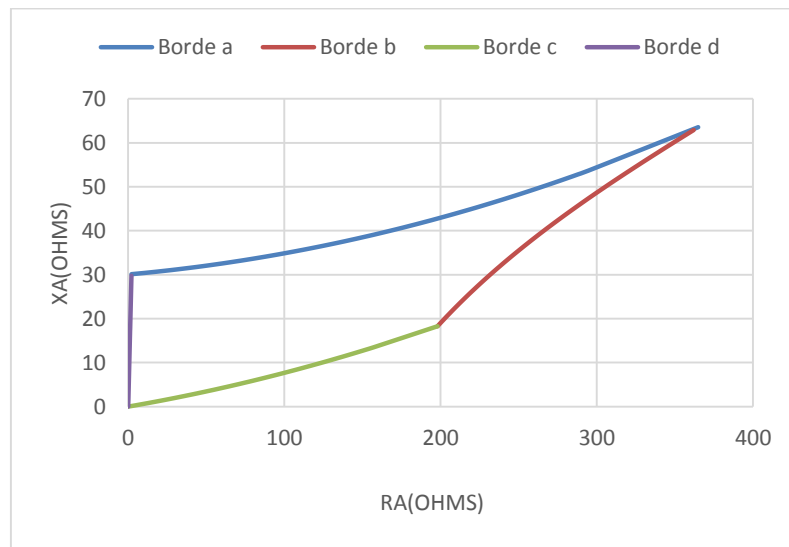


Figura 18 Impedancia aparente vista por el relé con acoplamiento mutuo, $h=0.98$ y $\delta=2^\circ$, calculado en Excel ²²

Ahora, para la misma relación h y un ángulo $\delta=20^\circ$ también es calculada la región de protección del relé, mostrada en la Figura 20 y comparada con la región de la

²¹ Fuente: tomada de la referencia [5], (UPENDAR, GUPTA, 2011)

²² Fuente: Elaboración Propia

Figura 19, logrando también mapear la región de operación para ese ángulo de transferencia de potencia entre el terminal local y el remoto, como es mostrada en el artículo de referencia. La curva de la región de operación tiene un comportamiento de exportación de potencia donde la impedancia tiende a sobre alcanzar.

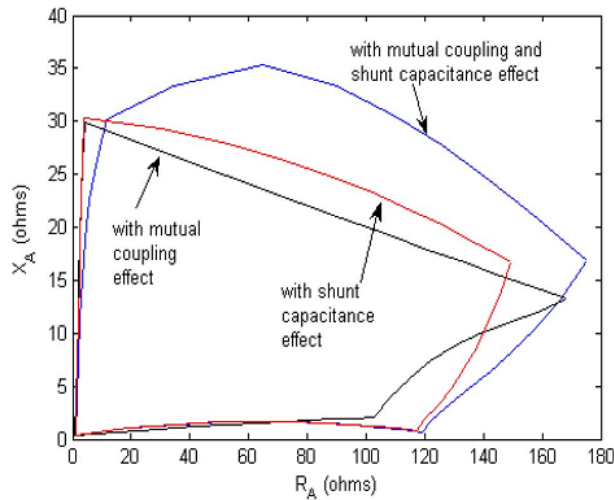


Figura 19 Impedancia aparente vista por el relé con acoplamiento mutuo, $h=0.98$ e $\delta=20^\circ$ ²³

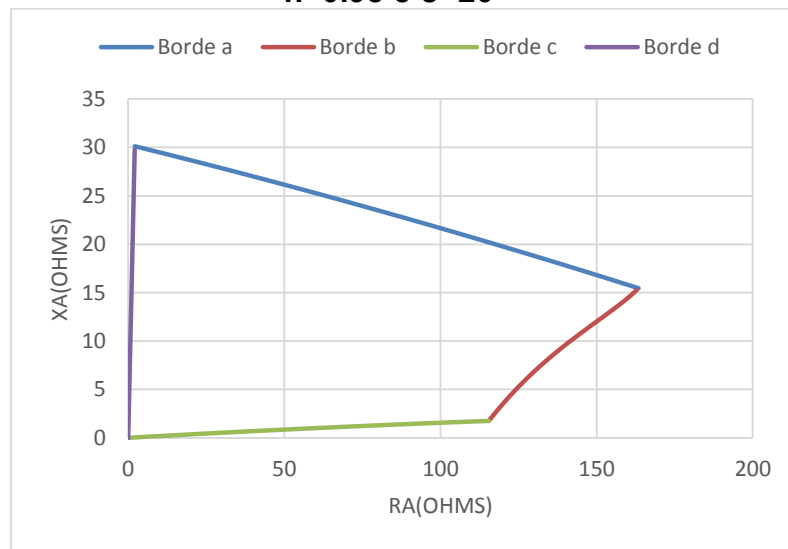


Figura 20 Impedancia aparente vista por el relé con acoplamiento mutuo, $h=0.98$ e $\delta=20$, calculado en Excel²⁴

²³ Fuente: tomada de la referencia [5], (UPENDAR, GUPTA, 2011)

²⁴ Fuente: Elaboración Propia

Entonces, logrando verificar que el cálculo matemático de la región de operación del relé de distancia está sintonizado (cálculo de valores muy similares a los mostrados en las referencias), se puede pasar al próximo paso que corresponde a usar los datos de las líneas y los parámetros del sistema de potencia para el cálculo de las respectivas regiones de operación que se convierten en datos de entrada para el entrenamiento de la red neuronal, ya que esos bordes se convierten en los valores deseados o target de las redes neuronales.

4.2.1 Cálculo de impedancia vista por el relé línea sencilla

Al ocurrir una falla monofásica a tierra a través de una resistencia de falla en el punto F de un sistema de potencia con fuentes en ambas terminales, este es representado como se muestra en la Figura 21. La corriente de falla I_f es la suma de I_L e I_R que son los aportes de corriente desde los terminales local y remoto respectivamente.

Un relé es instalado en el terminal local del sistema de potencia de la Figura 21, este mide la impedancia de la línea de transmisión protegida. Al presentarse una falla monofásica la tensión vista en el punto de instalación del relé es la siguiente:

$$-E_{SL} + I_L pZ_{L1} + (I_L + I_R) R_F = 0 \quad (2)$$

Realizando la división de los valores de la ecuación (2) por I_L se tiene que:

$$Z_A = pZ_{L1} + \left(1 + \frac{I_R}{I_L}\right) R_F \quad (3)$$

Dónde:

Z_A : Impedancia vista por el relé
 p : Porcentaje de línea donde ocurre la falla
 Z_{L1} : Impedancia de secuencia positiva de la línea
 E_{SL} : Tensión del equivalente local
 I_L : Corriente desde el equivalente local
 I_R : Corriente desde el equivalente remoto
 R_F : Resistencia de falla

De la ecuación (3), se puede decir que su segundo término es un error del valor de impedancia aparente vista por el relé.

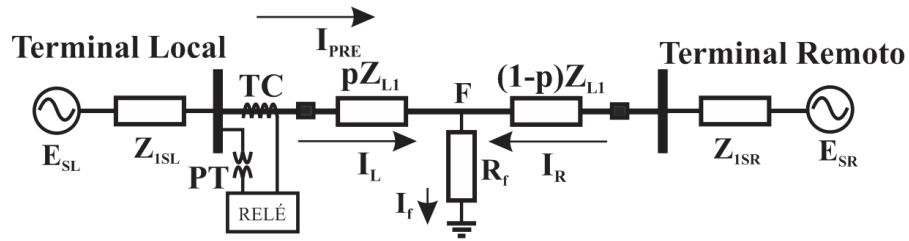


Figura 21 Modelo de falla monofásica a tierra línea sencilla²⁵

E_{SL} y E_{SR} son las tensiones de los equivalentes de los dos terminales, Z_{SL} y Z_{SR} son las impedancias de los equivalentes. La relación entre el valor de tensión del terminal remoto y el terminal local deja dos valores de referencia, uno es relación de amplitud y otro el ángulo de transferencia entre los dos equivalentes ($E_{SR}/E_{SL}=he^{-j\delta}$), (K. K. LI, 1993, [10]), (K. K. LI, 1993, [11]).

En la Figura 22 es mostrado el circuito equivalente obtenido al presentarse una falla monofásica en la fase A, . (JOMGEPIER, 1994, [12])-(CHO, [14])

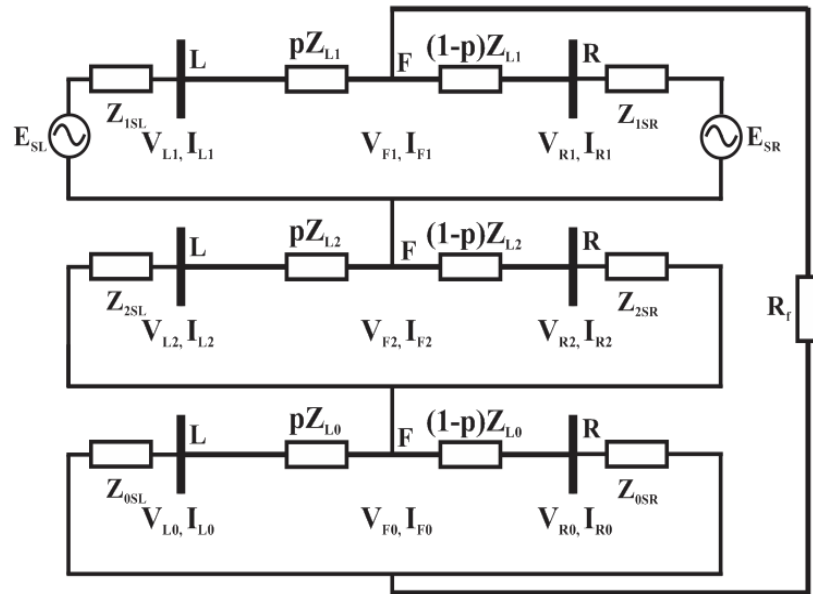


Figura 22 Circuito Equivalente para una falla fase a tierra en la fase A²⁶

²⁵ Fuente: Elaboración Propia

²⁶ Fuente: Elaboración Propia

$$\begin{aligned} Z_{1L} &= Z_{1SL} + pZ_{L1} & , & & Z_{0L} &= Z_{0SL} + pZ_{L0} \\ Z_{1R} &= Z_{1SR} + (1-p)Z_{L1} & , & & Z_{0R} &= Z_{0SR} + (1-p)Z_{L0} \end{aligned} \quad (4)$$

Donde:

Z_L : Impedancia desde el terminal L al punto de falla F

Z_R : Impedancia desde el terminal R al punto de falla F

La corriente de carga durante la prefalla en la fase A puede ser expresada como:

$$I_{Pref} = \frac{E_{SL} - E_{SR}}{Z_{1L} + Z_{1R}} = \frac{(1 - he^{-j\delta})E_{SL}}{Z_{1L} + Z_{1R}} \quad (5)$$

Mientras que la tensión de prefalla vista por el relé es:

$$V_{Pref} = E_{SL} - I_{Pref} Z_{1L} \quad (6)$$

Ahora, durante la ocurrencia de la falla monofásica en la fase A la corriente de secuencia positiva, negativa y cero a través de la resistencia de falla tienen el mismo valor.

$$I_{F1} = I_{F2} = I_{F0} = \frac{V_{Pref}}{Z_T} \quad (7)$$

Donde Z_T corresponde a la impedancia total vista por el relé y que es deducida de la Figura 22. Los datos impedancia de secuencia positiva son iguales a los de impedancia de secuencia negativa.

$$Z_T = \frac{Z_{1L}Z_{1R}}{Z_{1L} + Z_{1R}} + \frac{Z_{2L}Z_{2R}}{Z_{2L} + Z_{2R}} + \frac{Z_{0L}Z_{0R}}{Z_{0L} + Z_{0R}} + 3R_F = 2 \frac{Z_{1L}Z_{1R}}{Z_{1L} + Z_{1R}} + \frac{Z_{0L}Z_{0R}}{Z_{0L} + Z_{0R}} + 3R_F \quad (8)$$

Ahora, las corrientes de postfalla de secuencias desde el terminal L hasta el punto de falla F son:

$$I_{L1} = I_{L2} = C_1 I_{F1} = C_1 \frac{V_{Pref}}{Z_T} \quad (9)$$

$$I_{L0} = C_0 I_{F0} = C_0 \frac{V_{Pref}}{Z_T}$$

Donde C_0 y C_1 son los factores de distribución de secuencia positiva y cero definidos por

$$C_0 = \frac{Z_{0R}}{Z_{0L} + Z_{0R}} ; \quad C_1 = \frac{Z_{1R}}{Z_{1L} + Z_{1R}} \quad (10)$$

La corriente total desde la terminal local al punto F es la siguiente:

$$I_{LF} = I_{Pref} + (I_{L1} + I_{L2} + I_{L0}) \quad (11)$$

El voltaje de la fase A en el punto de instalación del relé en la terminal L se calcula así:

$$V_L = (I_{F1} + I_{F2} + I_{F0})R_F + (I_{Pref} + I_{L1})Z_{1L} + I_{L2}Z_{1L} + I_{L0}Z_{0L} \quad (12)$$

Entonces la impedancia aparente de la fase A medida en M es

$$Z_A = \frac{V_L}{I_{LF} + 3K_0 I_{L0}} \quad (13)$$

Donde K_0 es el factor de compensación de secuencia cero.

$$K_0 = \frac{Z_{L0} - Z_{L1}}{3Z_{L1}} \quad (14)$$

Donde la Z_{L0} y Z_{L1} son las impedancias de secuencia cero y secuencia positiva de la línea de transmisión.

Entonces la impedancia vista por el relé se calcula con la siguiente expresión

$$Z_A = pZ_{L1} + \frac{3R_F}{\frac{(Z_T)(1 - he^{-j\delta})}{Z_{1L} + hZ_{1M}e^{-j\delta}} + 2C_1 + C_0(1 + 3K_{0L})} \quad (15)$$

Si la resistencia de falla tiene un valor de 0Ω , o sea, es un corto circuito monofásico franco, la impedancia aparente vista por el relé es la impedancia de secuencia positiva del tramo de línea de transmisión desde la terminal L, hasta el punto de falla F. Si la resistencia de falla no es igual a cero la impedancia aparente vista por el relé es calculada con la fórmula establecida en (15). El valor de impedancia aparente está compuesto por una parte real y una imaginaria ($Z_a = R_a + jX_a$), valores que van a ser los datos con los cuales se grafican los bordes en el plano R-X.

4.2.2 Cálculo de impedancia vista por el relé, líneas paralelas de dos terminales

Ahora es analizado el cálculo de la impedancia vista por el relé para dos líneas paralelas de dos terminales con fuente en cada una de estas. Ver Figura 23.

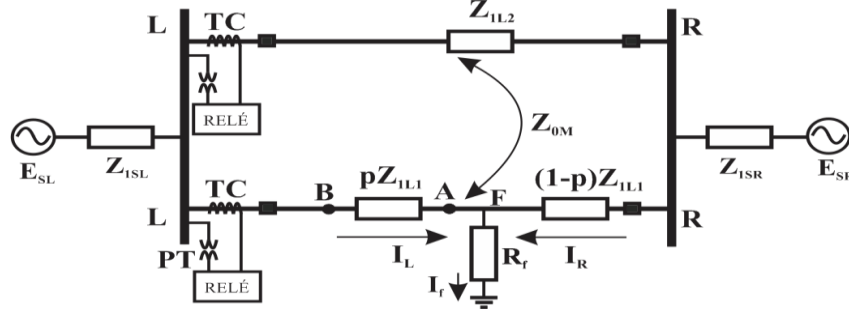


Figura 23 Modelo de falla monofásica a tierra líneas paralelas de dos terminales²⁷

El primer paso para calcular la impedancia aparente vista por el relé instalado en L es realizar el cálculo del voltaje y de la corriente de prefalla por el teorema de la superposición. Primero se hará el cálculo teniendo en cuenta solamente la fuente E_{SL} y apagando la fuente E_{SR} .

$$I_{z1SL}^{pre_L} = \frac{E_{SL}}{(Z_{1SL} + Z_{1SR} + (Z_{1L1} \parallel Z_{1L2}))} \quad (16)$$

La corriente de prefalla por la línea LT1 con la fuente E_{SL}

$$I_{BF}^{pre_L} = I_{z1SL}^{pre_L} \left(\frac{Z_{1L2}}{Z_{1L1} + Z_{1L2}} \right) \quad (17)$$

$$I_{LB}^{pre_L} = I_{BF}^{pre_L} \quad (18)$$

Ahora, utilizando la fuente de tensión E_{SR}

$$I_{z1SR}^{pre_R} = \frac{E_{SR}}{(Z_{1SL} + Z_{1SR} + (Z_{1L1} \parallel Z_{1L2}))} \quad (19)$$

$$I_{z1SL}^{pre_R} = I_{z1SR}^{pre_R} \quad (20)$$

²⁷ Fuente: Elaboración Propia

$$I_{BF}^{pre_R} = -I_{z1SR}^{pre_R} \left(\frac{Z_{1L2}}{Z_{1L1} + Z_{1L2}} \right) \quad (21)$$

$$I_{LB}^{pre_R} = I_{BF}^{pre_R} \quad (22)$$

La corriente de falla a través de Z_{1SL}

$$I_{z1SL}^{\text{pre}} = I_{z1SL}^{\text{pre-L}} - I_{z1SL}^{\text{pre-R}} = \frac{E_{SL}(1 - \text{he}^{-j\delta})}{(Z_{1SL} + Z_{1SR} + (Z_{1L1} \| Z_{1L2}))} \quad (23)$$

$$\mathbf{I}_{\text{LB}}^{\text{pre}} = \mathbf{I}_{\text{BF}}^{\text{pre-L}} + \mathbf{I}_{\text{BF}}^{\text{pre-R}} \quad (24)$$

La corriente de carga de prefalla en la fase A en la LT1 desde el terminal L hasta el punto B es:

$$I_{\text{PreF}} = I_{\text{LB}}^{\text{pre_L}} + I_{\text{LB}}^{\text{pre_R}} = \frac{E_{\text{SL}}(1 - h e^{-j\delta})}{(Z_{\text{ISL}} + Z_{\text{ISR}} + (Z_{\text{IL1}} \| Z_{\text{IL2}}))} \left(\frac{Z_{\text{IL2}}}{Z_{\text{IL1}} + Z_{\text{IL2}}} \right) \quad (25)$$

La tensión de prefalla en el punto F es la siguiente:

$$V_{\text{PreF}} = E_{\text{SL}} - Z_{1\text{SL}} I_{z1\text{SL}}^{\text{pre}} - p Z_{1\text{L1}} I_{\text{LB}}^{\text{pre}} \quad (26)$$

Ya fueron calculados los valores de prefalla, ahora se calculan los de postfalla

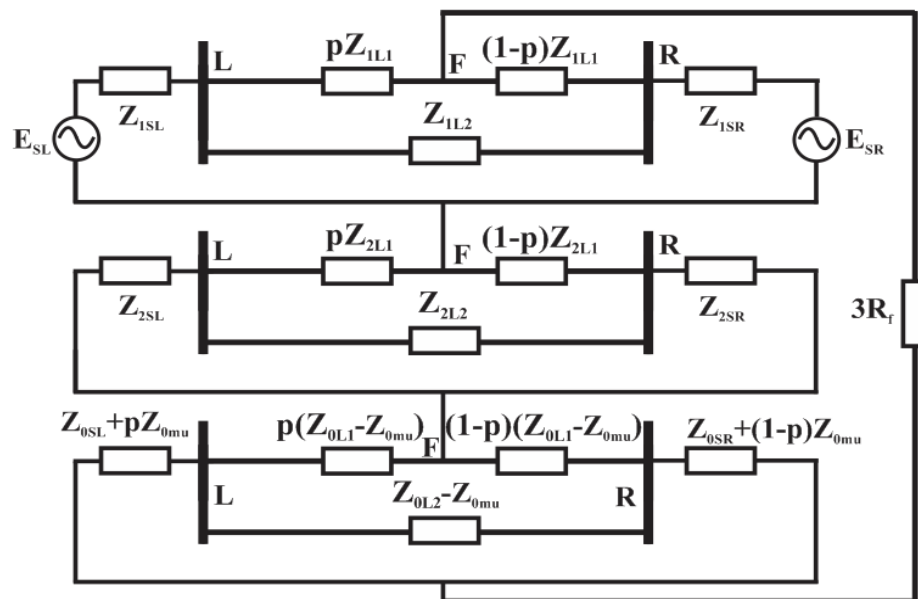


Figura 24 Modelo de falla monofásica a tierra líneas paralelas de dos terminales²⁸

²⁸ Fuente: Elaboración Propia.

$$Z_{1L} = Z_{1SL} + \frac{pZ_{1L1}Z_{1L2}}{Z_{1L1} + Z_{1L2}} \quad (27)$$

$$Z_{1R} = Z_{1SR} + \frac{(1-p)Z_{1L1}Z_{1L2}}{Z_{1L1} + Z_{1L2}} \quad (28)$$

$$Z_{1LR} = \frac{pZ_{1L1}(1-p)Z_{1L1}}{Z_{1L1} + Z_{1L2}} \quad (29)$$

Entonces

$$Z_{+veSeq} = \frac{Z_{1L}Z_{1R}}{Z_{1L} + Z_{1R}} + Z_{1LR}, \quad Z_{+vesSeq} = Z_{-veSeq} \quad (30)$$

$$Z_{0L} = Z_{0SL} + pZ_{0mu} + \frac{p(Z_{0L1} - Z_{0mu})(Z_{0L2} - Z_{0mu})}{(Z_{0L1} - Z_{0mu}) + (Z_{0L2} - Z_{0mu})} \quad (31)$$

$$Z_{0R} = Z_{0SR} + (1-p)Z_{0mu} + \frac{(1-p)(Z_{0L1} - Z_{0mu})(Z_{0L2} - Z_{0mu})}{(Z_{0L1} - Z_{0mu}) + (Z_{0L2} - Z_{0mu})} \quad (32)$$

$$Z_{0LR} = \frac{(p)(Z_{0L1} - Z_{0mu}) + (1-p)(Z_{0L1} - Z_{0mu})}{(Z_{0L1} - Z_{0mu}) + (Z_{0L2} - Z_{0mu})} \quad (33)$$

$$Z_{ceroSeq} = \frac{Z_{0L}Z_{0R}}{Z_{0L} + Z_{0R}} + Z_{0LR}, \quad Z_{+veseq} = Z_{-veseq} \quad (34)$$

Con los valores calculados anteriormente se puede calcular la impedancia total asociada a la falla monofásica

$$Z_T = Z_{+veSeq} + Z_{-veSeq} + Z_{ceroSeq} + 3R_F \quad (35)$$

La corriente a través de la resistencia de R_F durante la falla monofásica a tierra está dada por:

$$I_{1F}^{post} = I_{2F}^{post} = I_{0F}^{post} = \frac{V_{Pref}}{Z_T} \quad (36)$$

Ahora, las corrientes de postfalla de secuencias desde el terminal L hasta el punto de falla F son:

$$I_{1BA}^{post} = I_{2BA}^{post} = C_1 I_{1F}^{post} = C_1 \frac{V_{Pref}}{Z_T} \quad (37)$$

$$I_{0BA}^{post} = C_0 I_{0F}^{post} = C_0 \frac{V_{Pref}}{Z_T}$$

Donde C_0 y C_1 son los factores de distribución de secuencia positiva y cero definidos por

$$C_0 = \frac{Z_{0R}}{Z_{0L} + Z_{0R}} ; \quad C_1 = \frac{Z_{1R}}{Z_{1L} + Z_{1R}} \quad (38)$$

La corriente en el punto de instalación del relé en el terminal L es la siguiente:

$$I_{aL}^{post} = I_{Pref} + I_{1BA}^{post} + I_{2BA}^{post} + I_{0BA}^{post} \quad (39)$$

El voltaje en el punto de instalación del relé está dado por la siguiente expresión:

$$V_{aL}^{post} = (I_{1F}^{post} + I_{2F}^{post} + I_{0F}^{post})R_F + (I_{1BA}^{post} + I_{2BA}^{post} + I_{0BA}^{post})pZ_{1L1} + (I_{0BA}^{post}pZ_{0L1}) + (I_{Z0L2}^{post}pZ_{0mu}) \quad (40)$$

Donde I_{Z0L2}^{post} es la corriente por la línea LT2 en los dos modos de operación

El acoplamiento mutuo de líneas paralelas varía de acuerdo a la condición de operación de las líneas de transmisión. En este trabajo el acoplamiento mutuo también es variado con el factor de compensación de secuencia cero. Mientras una línea de transmisión esté desconectada en ambos extremos y no esté aterrizada en los mismos, la corriente de secuencia cero entre las líneas es cero, entonces el relé mide correctamente la impedancia. Ahora, para el caso de ambas líneas operando normalmente (ambas líneas operando, Modo 1) el factor de compensación de secuencia cero puede ser determinado con la siguiente expresión.

$$K_{0Lmod} = K_{0L} + K_{0m} del_x \quad (41)$$

Donde:

$$del_x = \frac{pZ_{0SR} - (1-p)Z_{0SL}}{(2-p)Z_{0SR} + (1-p)(Z_{0SL} + Z_{0mu} + Z_{0L2})} \quad (42)$$

Para el modo de operación 2 (Modo 2), donde una línea opera normalmente y la otra línea abierta en ambos extremos y aterrizada en ellos.

$$K'_{0L\text{mod}} = K_{0L} + K_{0m} del'_x \quad (43)$$

Donde:

$$del'_x = \frac{Z_{0mu} \{(1-p)Z_{0SL} - pZ_{0SR}\}}{Z_{0L1}(1-p)Z_{0L1} + Z_{0SR}\} - (1-p)Z_{0mu}^2 \quad (44)$$

En ambos casos el factor de compensación modificado depende de la localización de la falla, de las impedancias de las líneas y además de las impedancias del sistema de potencia.

La I_{Z0L2}^{post} de la ecuación (40) es calculada como sigue:

$$I_{Z0L2}^{post} = I_{0BA}^{post}(del'_x) \quad \text{ò} \quad I_{0BA}^{post}(del'_x) \quad \text{dependiendo del modo de operación} \quad (45)$$

La impedancia aparente que mide el relé instalado en L

$$Z_{aL}^{post} = \frac{V_{aL}^{post}}{I_{aL}^{post} + K_{0L}I_{0BA}^{post} + K_{0m}I_{Z0L2}^{post}} \quad (46)$$

Donde

$$K_{0L} = \frac{Z_{0L1} - Z_{1L1}}{Z_{1L1}} \quad \text{y} \quad K_{0m} = \frac{Z_{0mu}}{Z_{1L1}} \quad (47)$$

Otra forma de escribir la ecuación de la impedancia aparente es la siguiente:

$$Z_a = pZ_{1L1} + \frac{3R_F}{\frac{(1 - he^{-j\delta})Z_{1L2}(Z_T)}{(Z_{1L1} + Z_{1L2})(Z_{1sn} + x_1 + Z_{1sm}he^{-j\delta}) - pZ_{1L1}Z_{1L2}(1 - he^{-j\delta})} + 2C_1 + C_0(1 + k_{0L}) + C_0del'_x k_{0m}} \quad (48)$$

En la Figura 25 se muestran las regiones de operación de 4 casos de establecidos en la Tabla 8 y que corresponden a 4 casos de transferencia de potencia desde el terminal local al terminal remoto (casos 1, 5, 10 y 15). Esas 4 regiones fueron calculadas teniendo en cuenta el modo de operación 1, dos líneas conectadas, mientras una de ellas es afectada por una falla monofásica a tierra. La idea es mostrar cómo la región de operación se ve afectada por variaciones de potencia y variación en los valores de impedancia de falla.

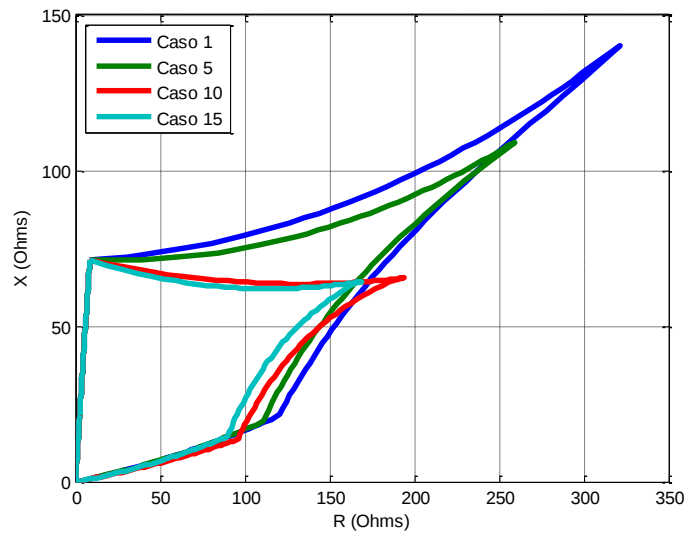


Figura 25 Regiones de operación ideal de disparo de un relé varios casos de simulación desde terminal L a R (Modo de operación 1)²⁹

Para el modo de Operación 2 (una línea conectada y otra abierta en los extremos de los terminales y aterrizada en sus extremos) se tiene en la Figura 26, de nuevo, las 4 condiciones de transferencias de potencia desde el terminal local hasta el terminal remoto son graficadas, mostrando un comportamiento similar en las curvas. De lo visto anteriormente se puede decir que a medida que la potencia tanto activa como reactiva transferida desde un terminal a otro aumenta, la región de operación se reduce, haciendo que la impedancia vista por el relé en el terminal L sea una impedancia menor, sabiendo que la impedancia vista por el relé es una combinación de parte real e imaginaria, se nota como los valores de R_x y X_x son más bajos a mayor potencia transferida. Queda demostrado que la región ideal de operación de un relé de distancia es influenciada fuertemente por los flujos de potencia activa y reactiva.

²⁹ Fuente: Elaboración Propia

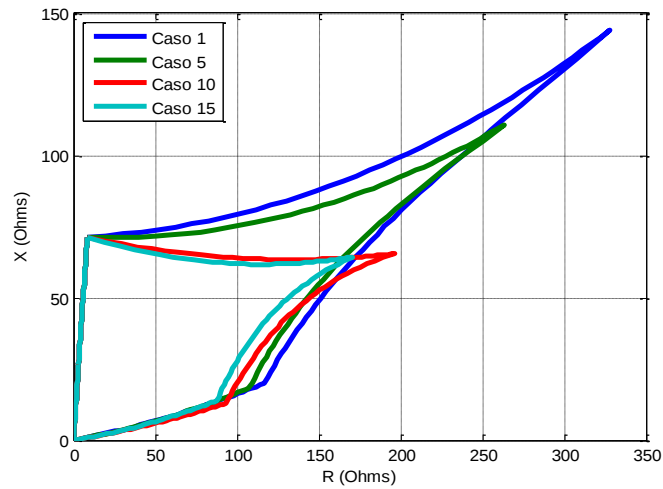


Figura 26 Regiones de operación ideal de disparo de un relé varios casos de simulación desde terminal L a R (Modo de operación 2)³⁰

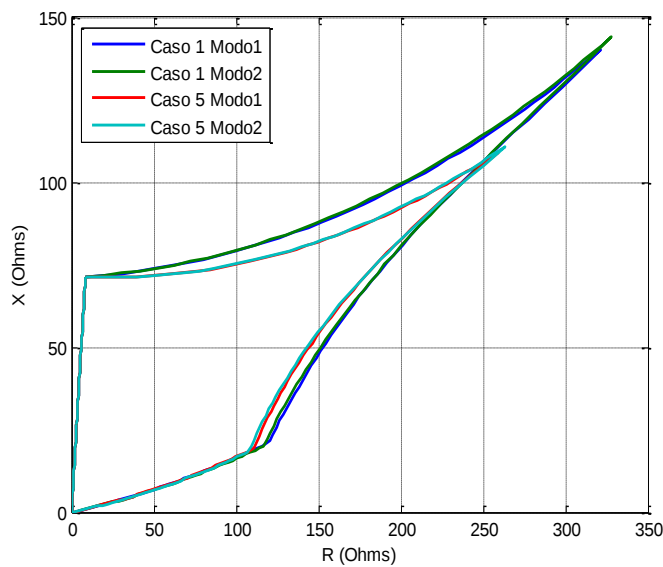


Figura 27 Regiones de operación ideal de disparo de un relé Caso 1 y 5 simulaciones desde terminal L a R (Modo de operación 1 vs 2)³¹

³⁰ Fuente: Elaboración Propia

³¹ Fuente: Elaboración Propia

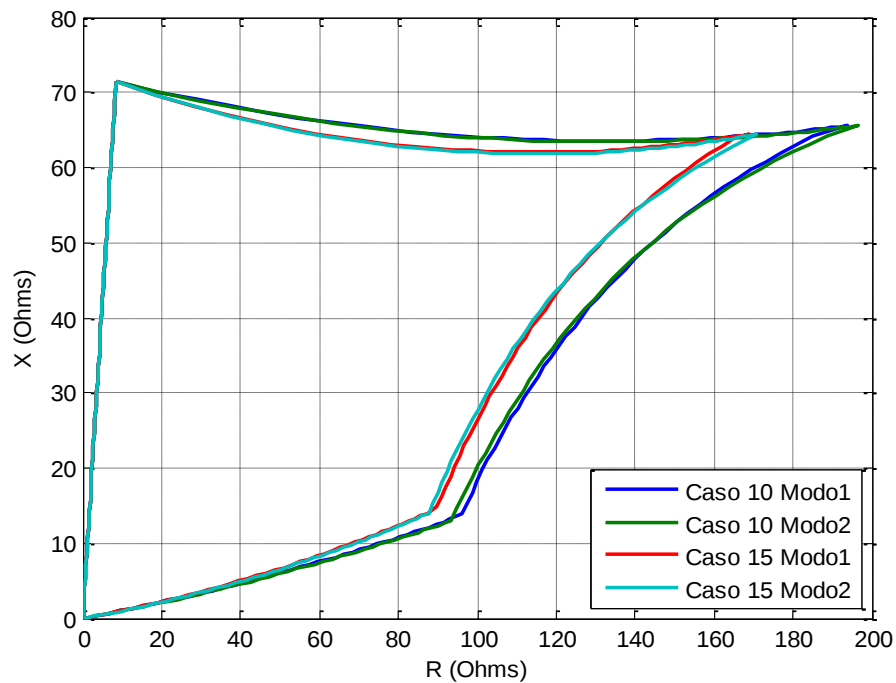


Figura 28 Regiones de operación ideal de disparo de un relé Caso 10 y 15 simulaciones desde terminal L a R (Modo de operación 1 vs 2)³²

De la Figura 27 y Figura 28 se puede observar que el modo de operación 2 amplía la cobertura de la región ideal de disparo, aunque a simple vista no se aprecia una diferencia entre las curvas, en el caso del modo de operación 2 la región de operación tiene una tendencia a ampliar su valor hacia los valores de alta impedancia.

³² Fuente: Elaboración Propia

5 MODELO ADAPTATIVO DE PROTECCIÓN DISTANCIA DE LINEAS PARALELAS DE ALTA IMPEDANCIA

Las redes neuronales han sido utilizadas para el estudio de protecciones eléctricas, principalmente en el estudio de la detección y localización de fallas, aunque su mayor aplicación se ha dado en líneas de transmisión, se puede pensar de un 70 % de los estudios hechos en la parte de protecciones han sido abordados con el tema de redes neuronales. Las redes neuronales son entrenadas para resolver problemas que son difíciles de solucionar para una persona, estas son una copia del comportamiento del cerebro humano, por lo tanto emulan las neuronas del cerebro humano. Cada neurona es conectada a otra para que la información procesada viaje entre ellas y la conexión de ellas asigne un peso que hace que la información procesada se comporte de una forma diferente.

Las redes neuronales tienen la capacidad de recoger, utilizar y almacenar informaciones basadas en experimentos (aprendizaje). El aprendizaje es hecho a través algoritmos de aprendizaje, donde los pesos sinápticos de la red son modificados de una forma ordenada para alcanzar el resultado deseado. A partir de la información de entrada y salida una red neuronal debe aprender y generalizar ese conocimiento de las entradas y salidas, para así responder de forma adecuada cuando otro valor de entrada es analizado dentro del rango de datos de entrenamiento. Básicamente todos los tipos de redes neuronales presentan la misma unidad de procesamiento, un sistema que simula el comportamiento de neuronas biológicas. La neurona artificial posee varias entradas, que corresponden a las conexiones sinápticas con otras unidades iguales a ella y una salida cuyo valor depende directamente de la sumatoria ponderada de todas las salidas de las otras neuronas conectadas a ella. El modelo mostrado en la Figura 29 representa un modelo artificial neuronal biológico que incluye una señal adicional, bias, que favorece o limita la posibilidad de activación de la red neuronal. El proceso sináptico es representado por los pesos (w) que amplifican cada una de las señales recibidas,

el peso conecta una neurona emisora y una neurona receptora y la función de activación modela la forma como la red neuronal responde al nivel de excitación limitando o definiendo la salida de la red neuronal.

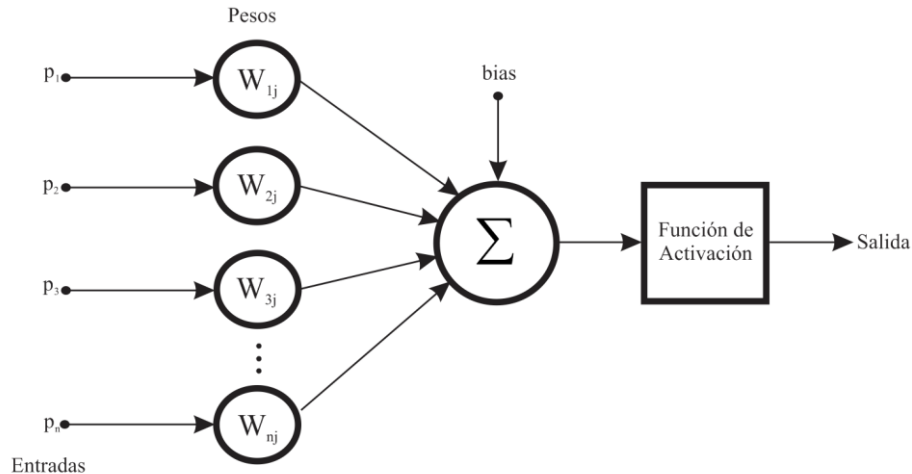


Figura 29 Modelo artificial neuronal biológico³³

No hay una regla establecida para determinar el número de neuronas o capas para solucionar un determinado problema aplicando redes neuronales. En general es suficiente el uso de 3 capas (entrada, oculta y salida). El tamaño de las capas de entrada y salida suele estar determinado por cada caso de estudio y de los datos asociados a este. El número de neuronas asociado a la capa oculta no sigue ninguna regla, va a depender de la eficiencia lograda al momento del aprendizaje, por lo tanto se debe establecer ensayos para determinación del número óptimo de neuronas de la capa oculta.

5.1 REDES NEURONALES RETROALIMENTADAS

En este tipo de redes neuronales los elementos que la componen pueden enviar estímulos a neuronas de capas anteriores, de su propia capa o a ellos mismos. Cada neurona puede ser conectada a todas las demás, de este modo, cuando se recibe la información de entrada a la red, cada neurona tiene que calcular y

³³ Fuente: Elaboración Propia

recalcular su estado varias veces, hasta que todas las neuronas alcancen un estado estable que es aquel en el cual no existen cambios en la salida de ninguna neurona.

5.2 DESARROLLO DE LA RED NEURONAL

Esta etapa comprende las fases necesarias para el desarrollo de una red neuronal y comprende las siguientes etapas:

- Diseño de la arquitectura
- Entrenamiento de la red
- Validación

5.2.1 Diseño de la arquitectura

La red neuronal presente en este trabajo tiene la siguiente arquitectura

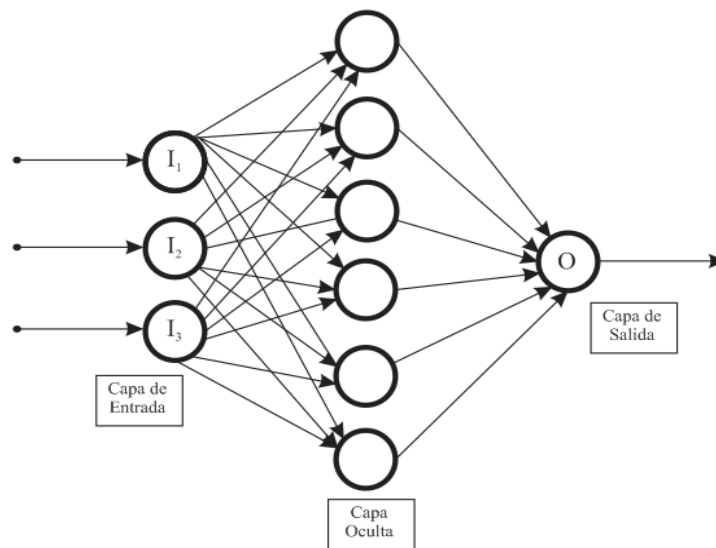


Figura 30 Arquitectura de la red neuronal³⁴

Realmente son construidas 4 redes neuronales, una por cada borde de la región ideal de operación del relé de distancia. Cada red neuronal está compuesta de 3 capas, la primera llamada capa de entrada, la segunda llamada capa oculta y por último se encuentra la capa de salida.

³⁴ Fuente: Elaboración Propia

Es utilizada la técnica de Backpropagation para entrenar las redes neuronales. El funcionamiento de la red Backpropagation (BPNN) consiste en el aprendizaje de un conjunto predefinido de pares de entradas-salidas dados como ejemplo: primero se aplica un patrón de entrada como estímulo para la primera capa de las neuronas de la red, se va propagando a través de todas las capas superiores hasta generar una salida, se compara el resultado en las neuronas de salida con la salida que se desea obtener y se calcula un valor de error para cada neurona de salida. A continuación, estos errores se transmiten hacia atrás, partiendo de la capa de salida hacia todas las neuronas de la capa intermedia que contribuyan directamente a la salida. Este proceso se repite, capa por capa, hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido un error que describa su aportación relativa al error total. Basándose en el valor del error recibido, se reajustan los pesos de conexión de cada neurona, de manera que en la siguiente vez que se presente el mismo patrón, la salida esté más cercana a la deseada. La importancia de la red Backpropagation consiste en su capacidad de auto adaptar los pesos de las neuronas de las capas intermedias para aprender la relación que existe entre un conjunto de patrones de entrada y sus salidas correspondientes. Es importante la capacidad de generalización, facilidad de dar salidas satisfactorias a entradas que el sistema no ha visto nunca en su fase de entrenamiento. La red debe encontrar una representación interna que le permita generar las salidas deseadas cuando se le dan entradas de entrenamiento, y que pueda aplicar, además, a entradas no tenidas en cuenta durante la etapa de aprendizaje para clasificarlas.

No hay conexiones hacia atrás feedback ni laterales entre las neuronas de la misma capa. La aplicación del algoritmo tiene dos fases, una hacia adelante y otra hacia atrás. Durante la primera fase el patrón de entrada es presentado a la red y propagado a través de las capas hasta llegar a la capa de salida. Obtenidos los valores de salida de la red, se inicia la segunda fase, comparándose éstos valores con la salida esperada para así obtener el error. Se ajustan los pesos de la última capa proporcionalmente al error. Se pasa a la capa anterior con una retro

propagación del error, ajustando los pesos y continuando con este proceso hasta llegar a la primera capa. De esta manera se han modificado los pesos de las conexiones de la red para cada patrón de aprendizaje del problema, del que conocíamos su valor de entrada y la salida deseada que debería generar la red ante dicho patrón. La técnica Backpropagation requiere el uso de neuronas cuya función de activación sea continua, y por lo tanto, diferenciable. La función de transferencia tangente sigmoideal (tansig) es usada entre la capa de entrada y la capa oculta, mientras que la función pure linear (purelin) es usada entre la capa oculta y la capa de salida y como técnica de optimización es usada Levenberg-Marquardt. La capa de salida es definida con una única neurona y como se había mencionado anteriormente la capa oculta no hay una regla establecida para determinar el número óptimo de neuronas, pero, en este trabajo se utilizan 15 neuronas en la capa oculta.

De cada impedancia medida $Z=R_{cal} + j X_{cal}$ (obtenida para construir los bordes a, b c o d con las formulas establecidas en el capítulo anterior) la red neuronal calcula una salida

$$N = f_2 \{ [W_2] \times f_1([W_1] \times [M] + [B_1]) + [B_2] \} \quad (49)$$

Donde:

f_1 : Función de transferencia entre la capa de entrada y la capa oculta

f_2 : Función de transferencia entre la capa oculta y la capa de salida

W_1 : Matriz de pesos de la capa oculta

W_2 : Matriz de pesos de la capa de salida

B_1 : Matriz de pesos de tendencia de la capa oculta (bias)

B_2 : Matriz de pesos de tendencia de la capa de salida (bias)

M : Entradas

N : Salidas

Por ejemplo, para el borde “a” se debe obtener como salida los valores de reactancia X_a .

$$X_a = f_{purelin} \left([W_2] \times f_{tansig} \left([W_1] \times \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \\ R_{cal} \end{bmatrix} + [B_1] \right) + [B_2] \right) \quad (50)$$

La impedancia a graficar en el plano R-X es $Z = R_{cal} + j X_a$. De la misma forma se aplica la salida para los otros bordes, solo debe tenerse en cuenta que para el borde “b” y “d” la salida es R y como dato de entrada a la red neuronal es usado el valor de X (HINCAPIE 2004, [8]).

5.2.2 Entrenamiento de la red

Con la arquitectura diseñada (definidas el número de capas y de neuronas por cada capa) se debe proceder a entrenar la red neuronal para que aprenda el comportamiento que debe tener; es decir, para que aprenda a dar la respuesta adecuada a la configuración de estímulos o patrones de entrada que se le presentan. En este trabajo se hace énfasis en la técnica de aprendizaje supervisado donde se le deben presentar a la red patrones o estímulos de entrada. Para incorporar el efecto de los flujos de potencia activa y reactiva de la línea de transmisión se generaron varias condiciones de operación con respecto a un valor de referencia (prefalla), ver Tabla 8. Los valores tomados como referencia para potencia activa y reactiva son 100 MW y 25 MVar respectivamente. Entonces, los cambios de potencia activa y reactiva, denominados como ΔP y ΔQ son calculados con respecto a los valores de prefalla y son usados como entradas para cada red neuronal. Los valores de entrenamiento para varias condiciones de transferencia de potencia activa varían desde 50 MW hasta 250 MW, incrementando a pasos de 50 MW, mientras que los valores de potencia reactiva varían desde un valor de 20 MVar hasta 40 MVar, incrementando a pasos de 10 MVar.

La capa de entrada de cada red neuronal está compuesta con 3 neuronas. Para adaptar el borde “a”, los 3 valores de entrada de la RNA son ΔP y ΔQ y el valor de resistencia R_a calculada de la forma mostrada en el capítulo anterior. La reactancia X_a correspondiente para cada valor de R_a se utiliza como salida deseada en la red

neuronal. Para el borde “b” son usadas como entradas de la red neuronal ΔP y ΔQ y el valor de reactancia X_b , mientras que en la capa de salida se tiene los valores de R_b . El entrenamiento del borde “c” es hecho de una forma similar que el borde “a” y para el borde “d” el entrenamiento es hecho de una manera similar que el borde “b”.

Un total de 15 condiciones de transferencia de potencia activa son aplicadas, además un total de 41 variaciones de impedancia de falla, variando desde falla franca (0Ω) hasta una falla de muy alta impedancia (200Ω), aumentando cada 5Ω , para el caso de los bordes “a” y “c”, un total de 41 localizaciones de la falla monofásica desde 0 % hasta el 80 % de la longitud de la línea, para los bordes “b” y “d”. Esas variaciones en el sistema de potencia son aplicadas a los dos modos de operación del sistema, sistema operando con las dos líneas normalmente y una línea abierta aterrizada en sus dos extremos. La cantidad de casos de simulación para los 4 bordes se relaciona como sigue:

- 15 Variaciones de Potencia activa y reactiva (Combinación de 5 potencias activas y 3 reactivas)
- 41 Valores de resistencia de falla borde “a” y “c”, para bordes “b” y “d” se usa el mismo número de localizaciones de falla.
- 4 bordes (a, b c y d)
- 2 condiciones de operación (Dos líneas operando normalmente, una línea abierta y aterrizada en ambos extremos).

$15 \times 41 \times 4 \times 2 = 4920$ casos de simulación para entrenamiento

5.2.3 Validación

Después de la fase de entrenamiento está la fase de validación o también conocida como fase de prueba, donde se le pedirá a la red neuronal que responda a estímulos diferentes a los presentados durante el entrenamiento (los valores para validación son diferentes a los usados en el entrenamiento, pero deben estar en el rango de

datos usados para entrenar la red neuronal). Gracias al aprendizaje de la red neuronal en la fase de entrenamiento, esta debe ser capaz de generalizar respuestas correctas ante patrones de estímulos nuevos.

Similarmente, para los casos de prueba son analizadas 2 condiciones de transferencia de potencia activa y reactiva, diferentes a los valores de entrenamiento, ver Tabla 9, al contrario de los 15 que se usan para el entrenamiento de la red neuronal.

$2 \times 41 \times 4 \times 2 = 656$ casos de simulación para prueba

5.3 RESUMEN DE PASOS PARA IMPLEMENTAR EL MODELO ADAPTATIVO DE Y USO DE UNA RED NEURONAL

- Crear el conjunto de datos de entrenamiento (Training Set);
- Crear el conjunto de datos de Validación (Validation Set);
- Crear la red;
- Entrenar la red (Usar el conjunto de datos de entrenamiento);
- Validar la red para indagar si aprendió (Usar el conjunto de datos de validación);
- Usar y probar la red neuronal utilizando datos nuevos (diferentes a los datos de entrenamiento y de validación)

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Fueron entrenadas las 4 redes neuronales para cada borde que compone la región ideal de disparo de un relé de distancia. Como se había comentado antes la región se modifica fuertemente cuando existe una variación de potencia activa y reactiva importante entre el terminal local y el terminal remoto de las líneas conectadas en paralelo. El entrenamiento es hecho para los 4920 datos establecidos, teniendo en cuenta que existen dos modos de operación del sistema de potencia, asociados a una variación en el factor K_0 de secuencia cero.

Cada red neuronal es entrenada de forma independiente, es decir, para cada borde se debe hacer el entrenamiento con 1230 parámetros, entonces, cada una de las redes neuronales tiene un error medio cuadrático independiente, el cual es un resultado determinante para saber si la red neuronal tiene un proceso de entrenamiento adecuado, además de ser un factor importante a la hora de finalizar el entrenamiento. El objetivo del trabajo está centrado en la construcción de la región ideal de disparo de un relé de distancia y como este se ve afectado por las fallas de alta impedancia para el cubrimiento el 80 % de la longitud de la línea, o sea, que realice una detección selectiva de fallas que realmente se presenten en la primera zona, para poder descartar las impedancias que sean mayores a las impedancias que fueron tomadas durante la etapa de entrenamiento, es por eso que se puede decir que la protección de distancia es selectiva ante faltas diferentes a las entrenadas. Los valores de los pesos y bias iniciales para realizar el aprendizaje de las redes neuronales son tomados con valores pequeños. Se nota que para los bordes “a”, “c” y “d” se obtienen valores de error medio cuadrático bajos comparados con los obtenidos para la construcción del borde “b”, estos resultados son debidos a la no linealidad de los datos para construir este borde.

Los resultados mostrados a continuación son relacionados a las dos condiciones de transferencia de potencia definidas para validación de los datos de entrenamiento

que se denominaron caso 1 y 2. La Figura 31 muestra el error medio cuadrático obtenido para el caso 1 de transferencia de potencia y en el modo de operación 2, para el caso del borde “a”.

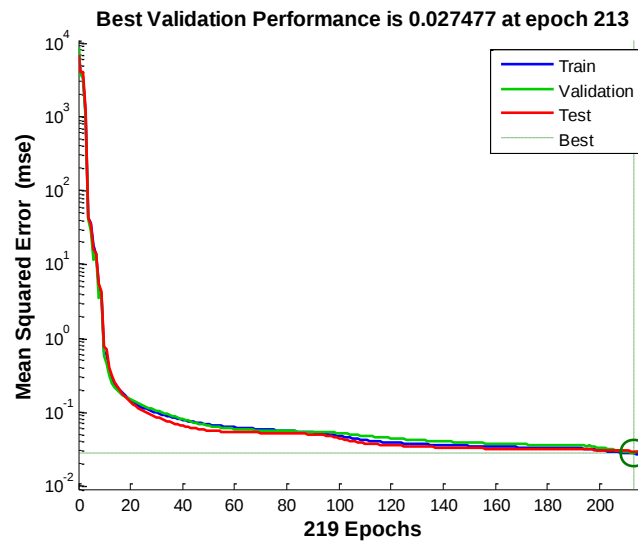


Figura 31 Error medio cuadrático Entrenamiento Borde a, Caso 1, Modo de operación 1³⁵

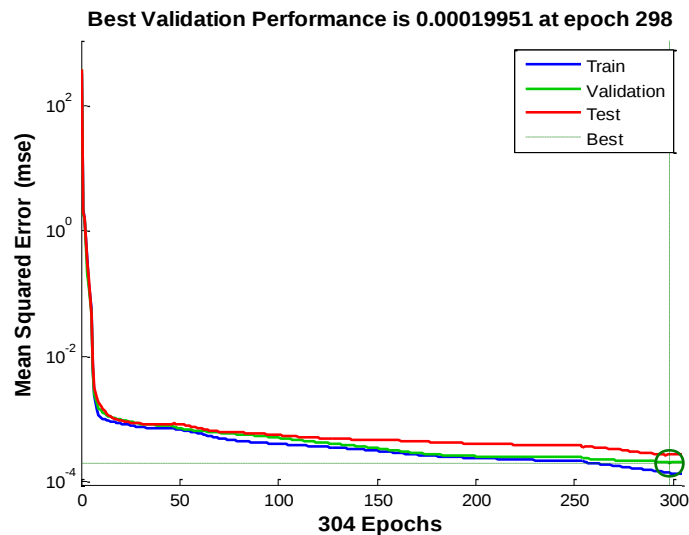


Figura 32 Error medio cuadrático Entrenamiento Borde c, Caso 1, Modo de operación 1³⁶

³⁵ Fuente: Elaboración Propia

³⁶ Fuente: Elaboración Propia

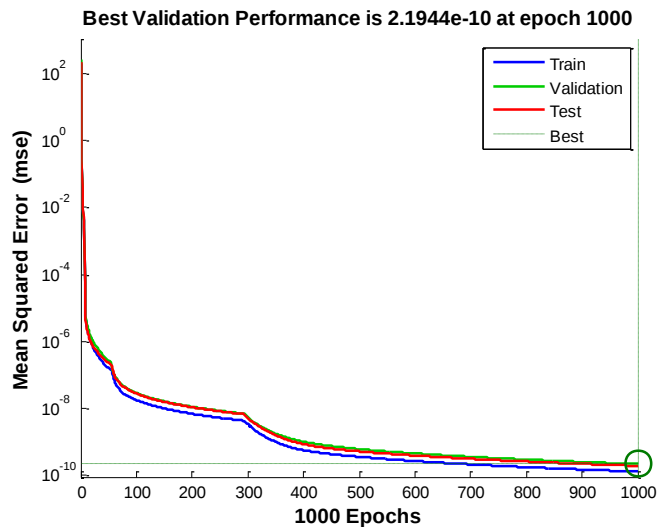


Figura 33 Error medio cuadrático Entrenamiento Borde d, Caso 1, Modo de operación 1³⁷

En la Figura 32 y Figura 33 es mostrado el resultado del error medio cuadrático obtenido durante el entrenamiento para los bordes “c” y “d”. Se puede observar que el error medio cuadrático para el borde “d” es muy pequeño, del orden de $2e^{-10}$. Este valor se obtiene debido a la gran linealidad de los datos para generar el entrenamiento, ya que para todos los casos de condiciones de operación y de transferencia de potencia el valor de la salida deseada para entrenar las redes neuronales fue mismo, por lo tanto la salida de la red neuronal arroja el mismo valor, lo que lleva a concluir que no era necesario generar entrenamiento para la obtención del borde “d”, pero de todas formas, sirve generarlo para poder acoplar este a los otros bordes no lineales.

En la Figura 34 es mostrada la región ideal de disparo generada con los datos del caso de transferencia de potencia 1 y el modo de operación 1, en ella son graficados los 4 bordes con diferentes colores para su fácil identificación. Para fallas que estén entre 0 y el 80 % de la línea de transmisión deben ser detectadas por la región ideal de disparo, además de las fallas hasta 200 Ω . Cabe recordar que todas las regiones

³⁷ Fuente: Elaboración Propia

mostradas en este capítulo son calculadas para el relé ubicado en la terminal local del sistema de potencia estudiado.

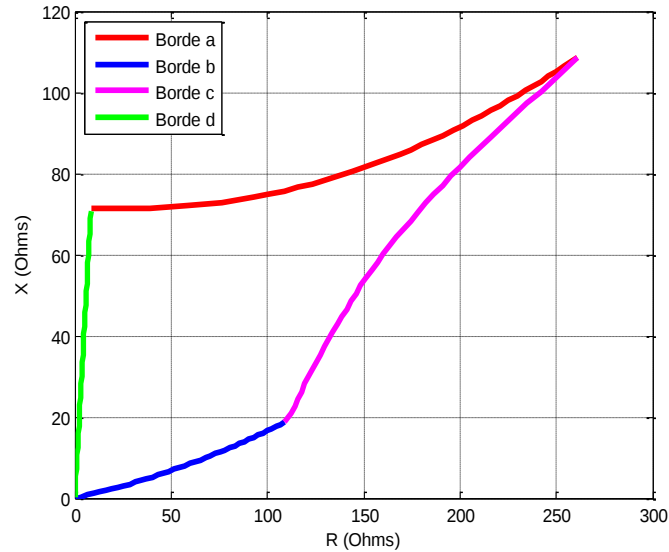


Figura 34 Región ideal de disparo, Caso 1, Modo de operación 1³⁸

En la Figura 35 es mostrada la comparación de las regiones calculadas matemáticamente (target) y los valores obtenidos por medio de redes neuronales para los 4 bordes.

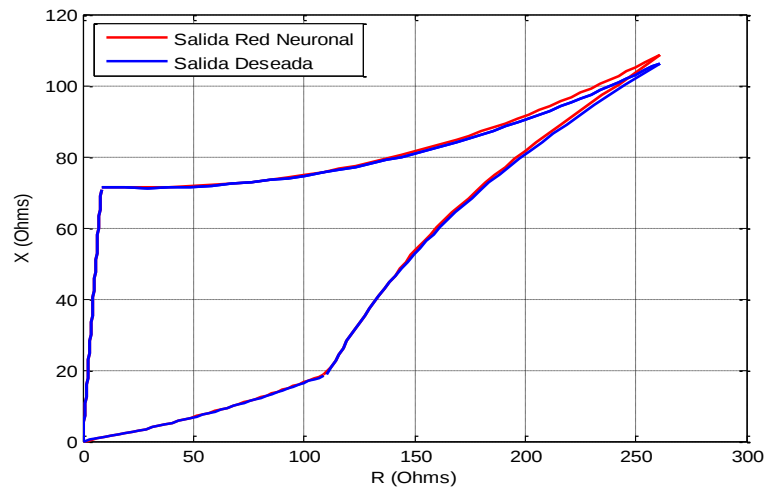


Figura 35 Región ideal de disparo, Caso 1, Modo de operación 1, Valores Calculados matemáticamente Vs Valores obtenidos con redes neuronales³⁹

³⁸ Fuente: Elaboración Propia

³⁹ Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar como los valores deseados son validados por medio del algoritmo Backpropagation de redes neuronales, por lo tanto, la región de operación del relé de distancia de la terminal local mapea muy bien la forma de la región deseada que fue calculada por medio de la formulación de los capítulos anteriores. Se puede identificar una diferencia entre las curvas del borde “a” y del borde “b” correspondientes a los bordes que no manejan valores lineales mientras que el borde “c” tiene una diferencia casi imperceptible.

La condición de transferencia de potencias activas y reactivas que rigen los valores asociados a prefalla y postfalla cambian y con ellos cambia también la región de operación, confirmando que la forma de la región de operación de un relé de distancia depende fuertemente de los cambios de potencia activa y reactiva en el sistema de potencia. Ver Figura 36.

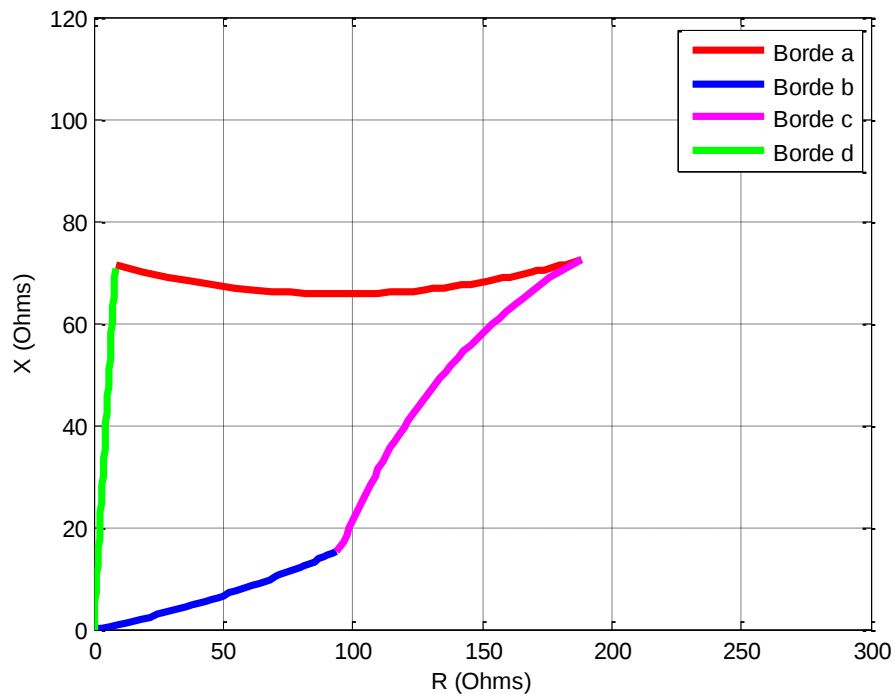


Figura 36 Región ideal de disparo, Caso 2, Modo de operación 1⁴⁰

⁴⁰ Fuente: Elaboración Propia

Nuevamente se muestra la región ideal de operación del relé de distancia para el caso 2. De la Figura 37 se puede ver que acontece lo mismo que con el caso anterior, que la región ideal encontrada por medio de redes neuronales mapea la región ideal calculada matemáticamente (deseada), además de que existen unas pequeñas diferencias entre las curvas para los bordes “a” y “b”, más exactamente en la zona donde se encontrarían valores de alta impedancia de falla.

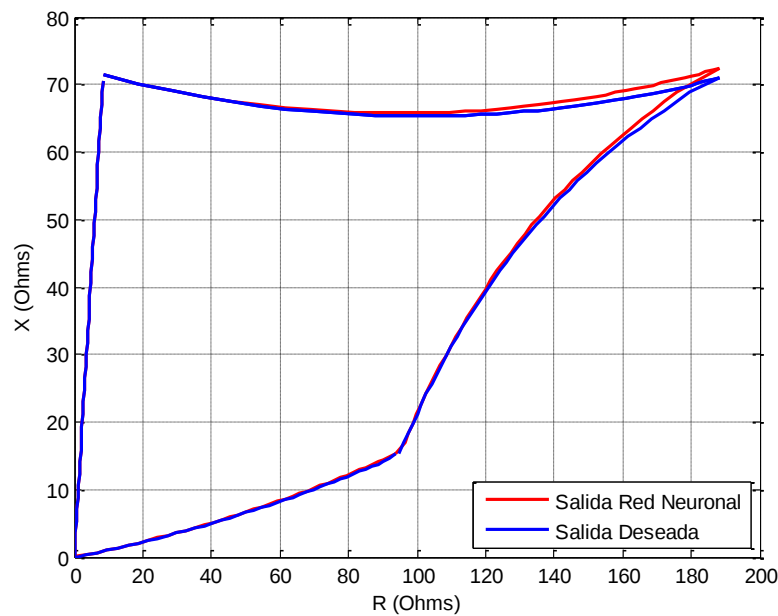


Figura 37 Región ideal de disparo, Caso 2, Modo de operación 1, Valores Calculados matemáticamente Vs Valores obtenidos con redes neuronales⁴¹

En las siguientes figuras se puede observar el mismo comportamiento de las anteriores figuras analizadas, el análisis fue hecho en para el modo de operación 2, cuando una línea está desconectada pero aterrizada en ambos extremos, las curvas son muy similares a las obtenidas para el modo de operación 1.

⁴¹ Fuente: Elaboración Propia

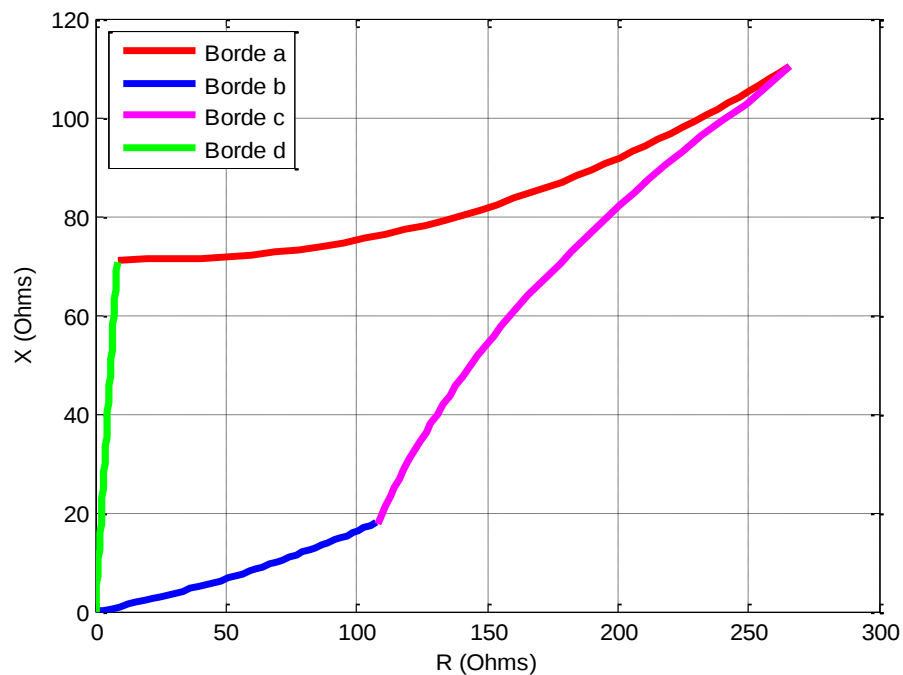


Figura 38 Región ideal de disparo, Caso 1, Modo de operación 2⁴²

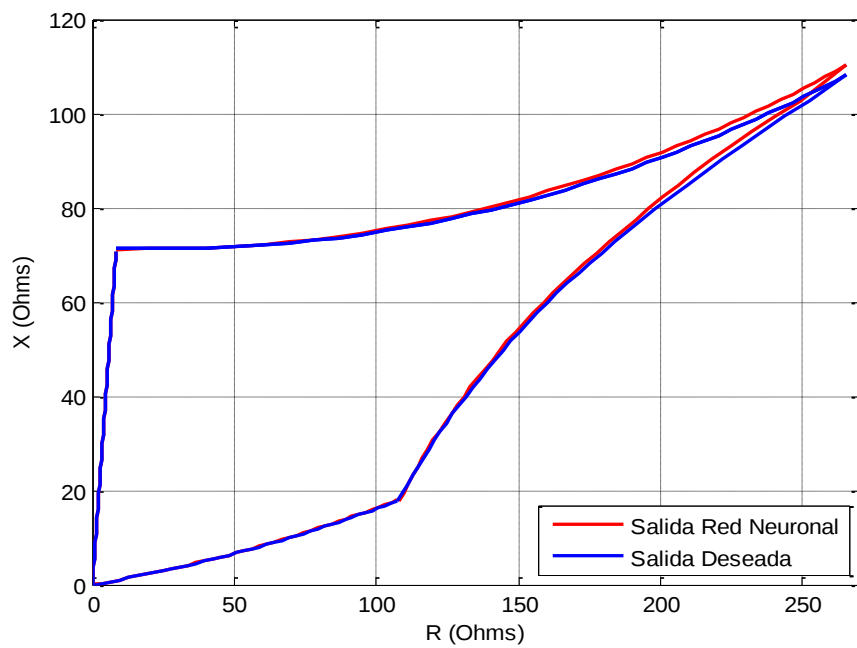


Figura 39 Región ideal de disparo, Caso 1, Modo de operación 2, Valores Calculados matemáticamente Vs Valores obtenidos con redes neuronales⁴³

⁴² Fuente: Elaboración Propia

⁴³ Fuente: Elaboración Propia

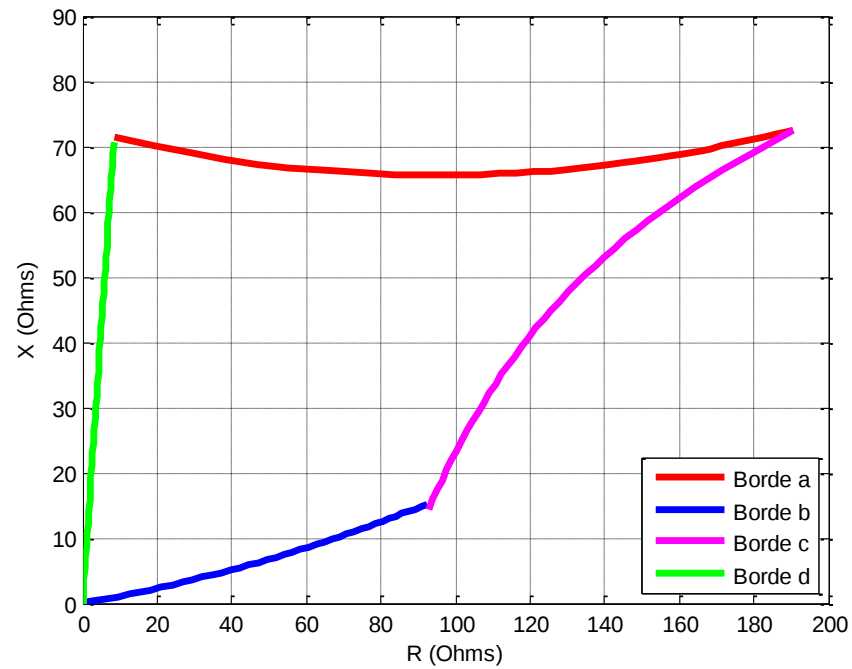


Figura 40 Región ideal de disparo, Caso 2, Modo de operación 2⁴⁴

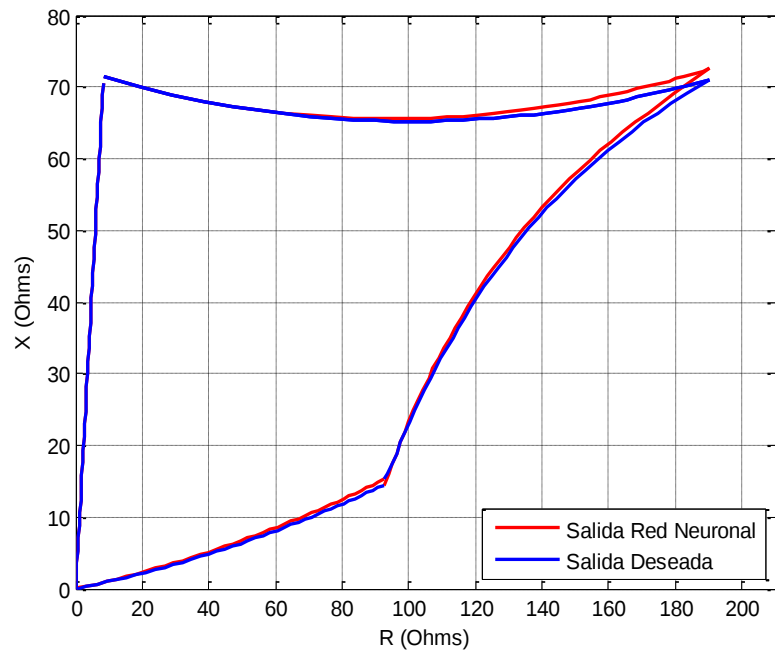


Figura 41 Región ideal de disparo, Caso 2, Modo de operación 2, Valores Calculados matemáticamente Vs Valores obtenidos con redes neuronales⁴⁵

⁴⁴ Fuente: Elaboración Propia

⁴⁵ Fuente: Elaboración Propia

Entonces, también fueron generados por simulaciones varias situaciones de prueba para comprobar la operación de la región ideal de disparo del relé de distancia instalado en el terminal local. Los valores de impedancia de falla seleccionados fueron 25, 50, 100, 150, 180, 220, 250 y 300 Ω . (en el rango de 0 – 300 Ω), en cuanto que para la localización de tales fallas fueron seleccionados los siguientes puntos, 25, 50, 70, 75, 85 y 90 % de la longitud total de la línea. Nuevamente son usados los casos de transferencia de potencia activa y reactiva definidos en la etapa de validación de las redes neuronales.

En la Figura 42 es mostrada la región ideal de operación para el primer caso de transferencia de potencia correspondiente a las dos líneas operando.

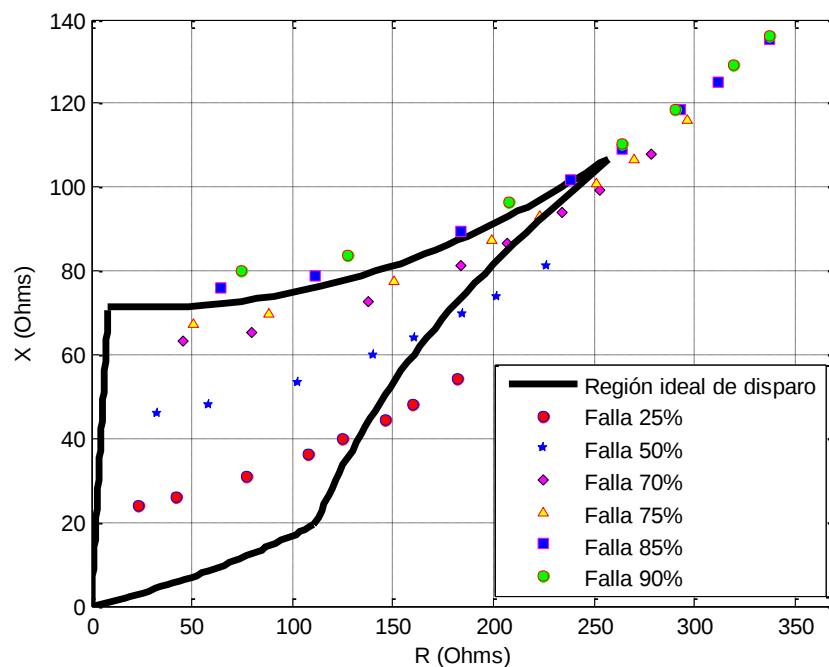


Figura 42 Región ideal de disparo, Caso 1, Modo de operación 1, prueba de diferentes localizaciones e impedancias de falla⁴⁶

⁴⁶ Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que todos los puntos que se encuentren dentro de la región ideal de disparo son detectados como operaciones satisfactorias de la protección de distancia, ya que están cubiertas por la primera zona que tiene un alcance de 80 % de la longitud de la línea, se nota que las fallas de 220, 250 y 300 Ω no son detectadas por el relé, o sea, no se tendrá operación indeseada de la protección ante fallas que no fueron establecidas dentro de los datos de entrenamiento, esto demuestra que el relé instalado en el terminal local es selectivo ante fallas para las que fue diseñado. Ahora, las fallas en el 85 y 90 % de la longitud de la línea caen fuera de la región ideal de disparo, por lo tanto, deben ser detectadas por la primera zona del relé del terminal remoto, en este caso, el relé instalado en el terminal local no sufre sobre alcance. Si el relé del terminal remoto se encuentra conectado con un esquema de comunicaciones con el relé en el terminal local y por alguna situación se perdiera la conexión entre ellos y una falla aconteciera al 90 % desde el terminal local, la operación del relé del terminal remoto va a ser por su primera zona, mientras que el relé del terminal local sin comunicaciones y sin poder operar los esquemas de teleprotección puede operar en la segunda zona con un atraso de tiempo establecido.

Una observación importante para hacer dentro de este análisis, está relacionada con la ventaja de usar la detección de fallas con una característica adaptativa y que tenga en cuenta valores de fallas de alta impedancia, pues las características mho y cuadrilateral posiblemente no detectan ese tipo de fallas dentro de la primera zona pues esta puede tener cobertura limitada ante fallas de alta impedancia.

En la Figura 43 se muestra con más detalle que para los valores de falla al 85 % de la longitud de la línea, más exactamente para la falla de 150 Ω , la protección de distancia no opera, pues, el punto cae por fuera de la región ideal de disparo, aunque en la Figura 42 aparente estar exactamente sobre el borde “a”, o sea, a simple vista podría estar siendo detectada como sobre alcance.

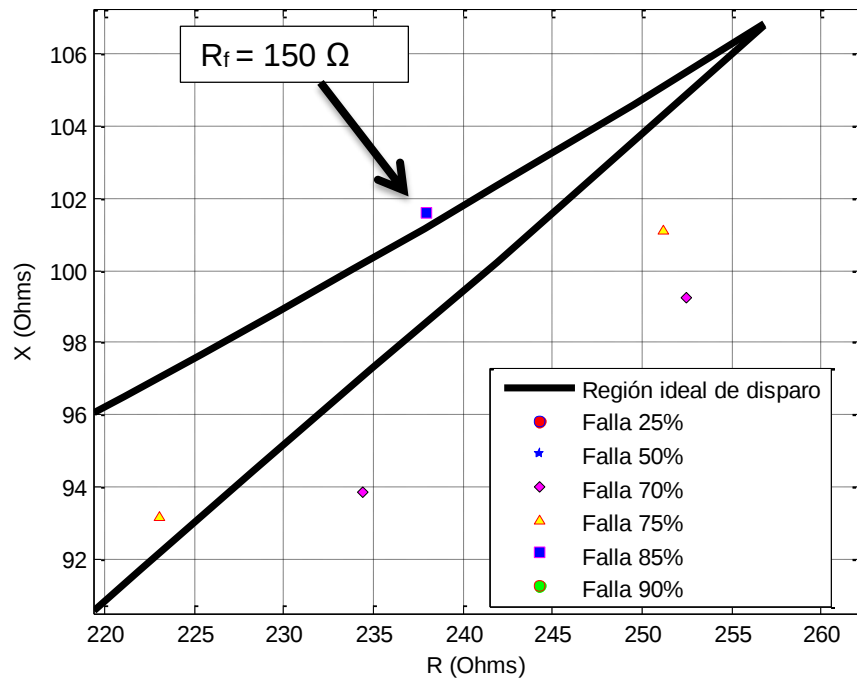


Figura 43 Zoom Región ideal de disparo, Caso 1, Modo de operación 1, prueba de diferentes localizaciones e impedancias de falla⁴⁷

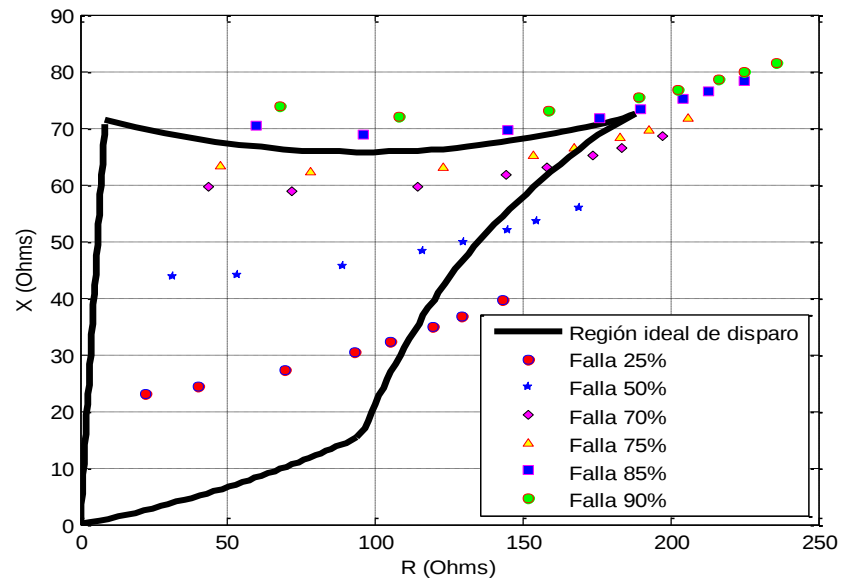


Figura 44 Región ideal de disparo, Caso 2, Modo de operación 1, prueba de diferentes localizaciones e impedancias de falla⁴⁸

⁴⁷ Fuente: Elaboración Propia

⁴⁸ Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 44 acontece lo mismo que para el caso analizado anteriormente. La región de operación cambió por cuenta de un cambio de los valores de potencia activa y reactiva, como aconteció en lo mostrado anteriormente se hace un Zoom para comprobar que el relé instalado en el terminal local no sufre sobre alcance, viendo una falla a más del 80 % como si estuviera dentro de su primera zona, demostrando así que el entrenamiento al que fueron sometidos los bordes de la región de operación fue satisfactorio.

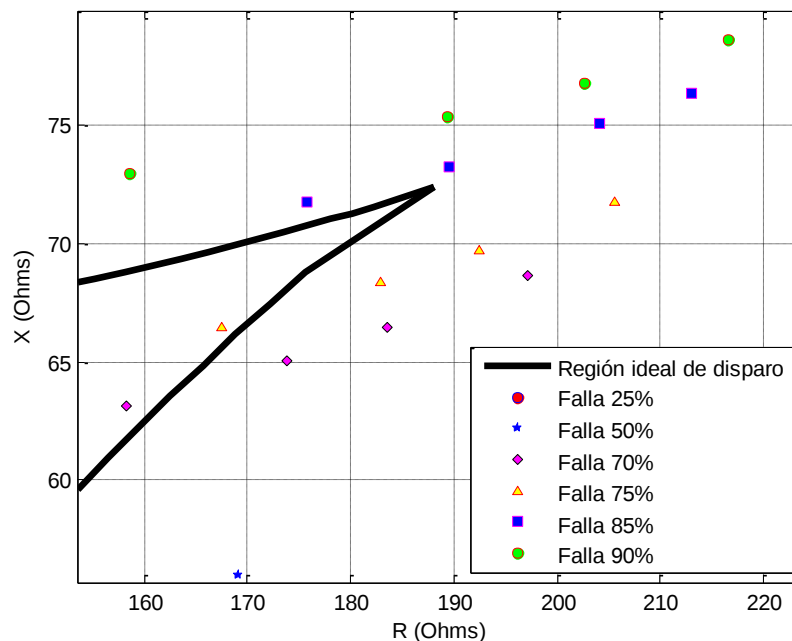


Figura 45 Zoom Región ideal de disparo, Caso 2, Modo de operación 1, prueba de diferentes localizaciones e impedancias de falla⁴⁹

Para las siguientes figuras se puede ver que las fallas a más del 80 % de la longitud de la línea desde el terminal remoto no son detectadas y mucho menos las fallas de alta impedancia de más de 200 Ω . Nuevamente se puede inferir que si se pierde la comunicación entre el relé en el terminal remoto y el terminal local el relé de distancia del terminal local puede operar instantáneamente para fallas dentro de su primera zona, mientras que para fallas de más del 80 % el relé del terminal remoto

⁴⁹ Fuente: Elaboración Propia

operaría en su primera zona y el del terminal local actuaría en su segunda zona, con un retardo de tiempo establecido.

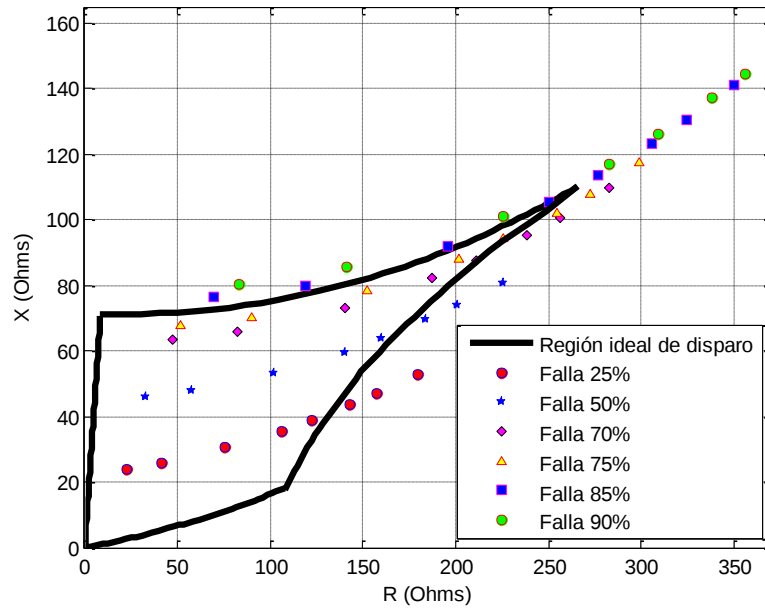


Figura 46 Región ideal de disparo, Caso 1, Modo de operación 2, prueba de diferentes localizaciones e impedancias de falla⁵⁰

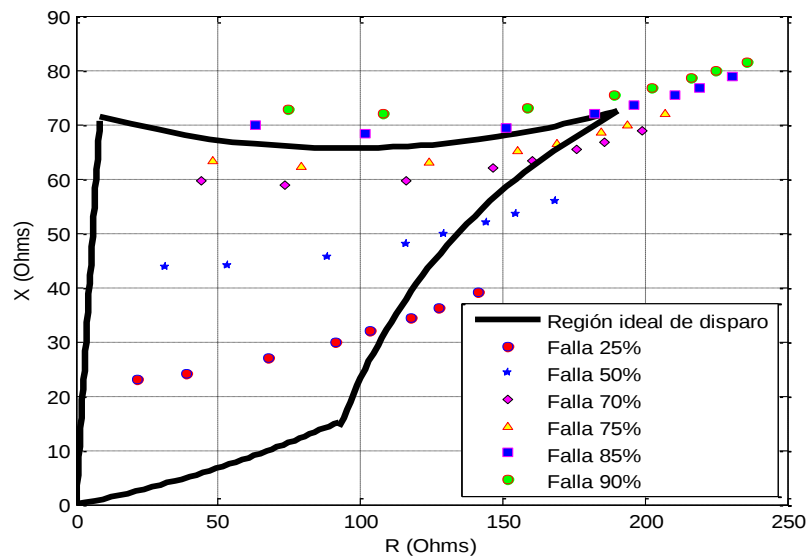


Figura 47 Región ideal de disparo, Caso 2, Modo de operación 2, prueba de diferentes localizaciones e impedancias de falla⁵¹

⁵⁰ Fuente: Elaboración Propia

⁵¹ Fuente: Elaboración Propia

La tabla mostrada a continuación, corresponde a la relación de la decisión de operación que debe tener el relé de distancia ubicado en el terminal local para los 4 casos analizados anteriormente. Puede notarse que si una falla ocurre antes del 80 % de la longitud de la línea es detectada como interna, en su primera zona de protección. Mientras que las fallas ocurridas más allá de la primera zona serán detectadas en su segunda zona. Además las fallas de más de 200 Ω no son detectadas, haciendo que el relé ofrezca tanto seguridad como selectividad a la hora de la detección de fallas.

Tabla 12 **Tabla de decisión de actuación de protección distancia**

Decisión de Operación								
Localización (%)	Resistencia de falla (Ω)							
	25	50	100	150	180	220	250	300
25	Opera	Opera	Opera	Opera	Opera	No opera	No opera	No opera
50	Opera	Opera	Opera	Opera	Opera	No opera	No opera	No opera
70	Opera	Opera	Opera	Opera	Opera	No opera	No opera	No opera
75	Opera	Opera	Opera	Opera	Opera	No opera	No opera	No opera
85	No opera	No opera	No opera	No opera	No opera	No opera	No opera	No opera
90	No opera	No opera	No opera	No opera	No opera	No opera	No opera	No opera

No se necesita entonces un esquema de comunicación (esquemas de teleprotección) entre los dos relés para que se tome la decisión de enviar señal de disparo a sus respectivos interruptores porque la característica adaptativa por si sola puede definir en qué zona de protección fue detectada la falla.

7 CONCLUSIONES

Se puede concluir entonces con la realización de este trabajo lo siguiente, el uso de redes neuronales para la determinación de la región ideal de actuación de un relé de distancia, hace este más confiable y seguro, tomando la decisión de operar o no ante fallas que se encuentren por fuera de su primera zona de protección. Sin importar la condición de operación del sistema eléctrico de potencia, la región adaptativa se acomoda a esas variaciones de potencia activa o reactiva del sistema. En este trabajo solo fue analizada la afectación en el cálculo de la impedancia, sufrida por acoplamiento entre líneas paralelas, puesto que para este tipo de líneas de transmisión, el acoplamiento mutuo de secuencia cero tiene una influencia importante en el cálculo de la impedancia vista por un relé, por lo tanto, solo se analizaron fallas monofásicas a tierra. Fueron entonces realizadas simulaciones asociadas a un sistema de potencia de líneas paralelas con dos terminales y fuentes en cada una de ellas, estas simulaciones sirvieron como insumo para implementar la región ideal de operación de un relé de distancia con redes neuronales. Esa región ideal de disparo puede presentar ser una solución para detección de fallas de alta impedancia que estén muy cerca del límite de actuación de la primera zona de un relé, puesto que el uso de otras características como la M_{ho} no garantiza un buen funcionamiento al presentarse ese tipo de fallas. De los resultados se puede evaluar positivamente el algoritmo Backpropagation y el método de optimización Levenberg-Mardquardt pues presenta una respuesta rápida, confiable y precisa del entrenamiento generado para el cálculo de la región ideal de disparo, ya que todos los bordes calculados para ella, fueron mapeados obteniendo una respuesta muy cercana a los bordes calculados matemáticamente.

Se pudo determinar que la región ideal de disparo del relé no sufre por sobre alcances asociados a las fallas de más de la cobertura de la primera zona de operación, estableciendo que para dos relés que protejan el sistema de estudio, no es necesario el uso de esquemas de comunicación, o si son usados, y estos pueden

estar indisponibles, el relé en la terminal local puede operar instantáneamente si la falla existe dentro de su zona de actuación, mientras que para fallas fuera de su primera zona el relé operaría en la segunda zona, haciendo que el relé más cercano al defecto actúe satisfactoriamente.

La implementación de este tipo de aplicaciones en los sistemas de protección de sistemas eléctricos es positiva, pues los fabricantes de equipos pueden ir incluyéndolas gradualmente dentro de sus servicios ofrecidos, por ejemplo, la implementación que actualmente se puede encontrar en el modelo del relé SEL-411L es la de localización de faltas por ondas viajeras(*traveling waves*), que era considerada solo como un tema meramente académico lleva a pensar que todas esas aplicaciones van a ser tenidas en cuenta en un futuro próximo.

8 OPORTUNIDADES A TRABAJOS FUTUROS

Como complemento al trabajo realizado, para trabajos futuros son sugeridas las siguientes propuestas:

- Realizar el estudio del uso de redes neuronales para protección de distancia para calcular la región ideal de disparo en aplicaciones de líneas multiterminales.
- Implementar la metodología en líneas con compensación serie y revisar que afectación sobre los resultados tendría la aplicación de transferencia de potencia entre el terminal remoto y el terminal local.
- Revisar el efecto del acoplamiento mutuo en un estudio similar aplicando redes neuronales pero aplicando adicionalmente protección de sobrecorriente ya que esta es igual de sensible al acoplamiento mutuo entre líneas de transmisión y a las variaciones de flujos potencia de un sistema eléctrico.
- Aplicación de redes neuronales en la detección de fallas de alta impedancia en líneas dobles de doble circuito asociando adicionalmente el efecto capacitivo presente en las líneas. Entonces podría generarse una comparación entre acoplamiento mutuo y efecto capacitivo.
- Verificar la gran potencialidad que puede brindar la metodología tratada en este trabajo para los expertos en el análisis del desempeño de protecciones y de fallas. Es importante identificar las diferencias que pueden obtenerse entre las características real e ideal.

9 BIBLIOGRAFIA

- [1] K. K. Li, L. L. Lai. "*Ideal operating region of digital distance relay under high resistance earth fault*", Electric power systems research, May 1997, pp. 215-219.
- [2] S Jamali. "*A fast adaptative digital distance protection*" IEE Developments in Power System Protection, conference publication, N° 479, pp. 149–152, 2001.
- [3] Anamika Jain, A.S. Thoke, and R. N. Patel, "*Double circuit transmission line fault location using artificial neural network*", CSVTU Journal, Bhilai, C.G. India, vol. 2, No.1, pp. 40-45 January 2009.
- [4] Bhavesh R. Bhalja and Rudra P. Maheshwari "*High-Resistance Faults on Two Terminal Parallel Transmission Line: Analysis, Simulation Studies, and an Adaptive Distance Relaying Scheme*" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, No. 2, pp. 801–812, April 2007.
- [5] Upendar, J.; Gupta, C.P.; Singh, G.K.; "*Comprehensive Adaptive Distance Relaying Scheme for Parallel Transmission Lines*", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.26, no.2, pp.1039-1052, April 2011
- [6] K. K. Li, L. L. Lai. "*Stand Alone Intelligent Digital Distance Relay*", IEEE Transactions on Power Systems, vol.15, no.1, pp.137-142, February 2000.
- [7] Bhavesh B, Maheshwari R. P., Nilesh G. C. "*Protection and Switchgear*".Oxford university Press, India, 2011, pp. 220-242.
- [8] Hincapie R. A, Tovar N, Salazar H. "*Aplicación de redes neuronales artificiales en la protección de distancia en líneas de transmisión*" Revista et Technica, Año X, N° 24, pp. 97–102, Mayo 2004.
- [9] H. Demuth and M. Beale, "*Neural Network Toolbox Users Guide for Use with Matlab*", Natick, The MathWorks, 2001, Version 4.

- [10] K. K. Li, Y. Q. Xia. “*Considerations for adaptative distance relaying*”, IEE 2nd International conference on advances in power system control, operation and Management, December 1993, Hong Kong, pp. 379-384.
- [11] K. K. Li, Y. Q. Xia, A. K. David. “*Adaptative relay setting for stand-alone digital distance protection*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 1, pp. 480–491, January 1994.
- [12] A. G. Jongepier, L. Van der Sluis. “*Adaptative distance protection of a double-circuit line*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 9, No. 3, pp. 1298–1297, July 1994.
- [13] Y. Hu, D. Novosel, M. M. Saha, V. Leitloff “*An adaptative scheme for parallel-line distance protection*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 1, pp. 105–110, January 2002.
- [14] J. Cho, C. Jung, J. Kim. “*Adaptative setting of digital relay for transmission line protection*”, IEEE.
- [15] Elmore, W. A. “*Protective relaying: Theory and applications*” 2nd edition New York, USA: Marcel Decker Inc. 2003.
- [16] COOK, V. “*Analysis of distance protection*” Letchworth, Hertfordshire, Inglaterra: Willey, 1985.
- [17] Ziegler, G. “*Numerical distance protection Principles and applications*” 2nd edition, Berlin, Germany: Siemens, AG, 2006.
- [18] Tejada, D. Urbaez, S. “*Metodología para el análisis de perturbaciones en sistemas de potencia mediante ATPDraw – Caso de puente abierto en la línea Esmeralda –Yumbo 2 a 230 kV*” Jornadas técnicas ISA, Medellín, Colombia: ISA, 2012.
- [19] Calderón, J. A. “*Modelo adaptativo de inteligencia artificial para el diagnóstico automático de fallas a partir de registros de osciloperturbografía*” Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia: 2007.
- [20] ANDERSON, P.M. “*Power System Protection*”. Piscataway, New Jersey, EUA. John Wiley & Sons, Inc., Publication, 1999.