

**A mi Señor Jesucristo, quien me ha bendecido
con su presencia en mi vida.**

A mis padres, por su apoyo incondicional en todo momento.

**A mis hermanos Andrés y Fernando, por su compañía en este
tiempo.**

Juan Carlos Rodríguez

AGRADECIMIENTOS

Agradezco al Grupo de investigación en Sistemas de Energía, Dr. Gabriel Ordóñez, Dr. Gilberto Carrillo, Dr. Hermann Raúl Vargas, Dr. Juan José Mora por su colaboración y dedicación en el desarrollo de este trabajo y por darme la oportunidad de participar como investigador y ayudarme en desempeñarme como tal.

A mis compañeros, en especial a Jorge Cormane y Víctor Barrera, con quienes compartí el trabajo del proyecto y con quienes pasamos momentos agradables a lo largo de la maestría.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1 PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	3
1.1 DEFINICIÓN Y ACOTACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.3 APORTES ESPERADOS.....	4
1.4 ENTIDADES INTERESADAS	4
1.5 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	4
2 FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	6
2.1 INTRODUCCIÓN.....	6
2.2 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	6
2.3 ANÁLISIS DE FALLAS PARALELAS.....	7
2.3.1 Análisis de fallas en componentes simétricas	7
2.3.2 Resistencia de falla	11
2.3.3 Efecto de la resistencia de falla en la estimación de la sección fallada	12
2.3.4 Efecto de las cargas en la estimación de la sección fallada.....	13
2.4 ÍNDICES DE CONTINUIDAD EN COLOMBIA.....	14
3 MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS	17
3.1 INTRODUCCIÓN.....	17
3.2 MÉTODO DE A. GIRGIS, DAVID LUBKEMAN Y JUN ZHU	17
3.2.1 Modelo del sistema de potencia utilizado	18
3.2.2 Deducción matemática de la distancia de falla	18
3.2.3 Consideraciones adicionales.....	20
3.2.4 Análisis de ventajas y desventajas.....	21
3.3 MÉTODO MYEON-SONG CHOI, SEUNG-JAE LEE, DUCK-SU LEE Y BO-GUN JIN.....	22
3.3.1 Modelo del sistema de potencia utilizado	22
3.3.2 Deducción matemática de la distancia de falla	22
3.3.3 Análisis de ventajas y desventajas.....	27
3.4 MÉTODO DE DAMIR NOVOSEL, DAVID KART, YI HU Y JORMA MYLLYMAKI.....	27
3.4.1 Modelo del sistema de potencia real	27

3.4.2	Modelo del sistema de potencia utilizado.....	28
3.4.3	Consideraciones generales del método propuesto	29
3.4.4	Deducción matemática de la distancia de falla	31
3.4.5	Análisis de ventajas y desventajas.....	34
3.5	MÉTODO DE SAHA	34
3.5.1	Modelo del sistema de potencia utilizado.....	34
3.5.2	Deducción matemática de la distancia de falla	35
3.5.3	Análisis de ventajas y desventajas.....	37
3.6	MÉTODO DE R.K AGGARWAL, Y. ASLAN Y A.T. JOHNS.....	38
3.6.1	Modelo del sistema de potencia utilizado.....	38
3.6.2	Deducción matemática de la distancia de falla	38
3.6.3	Representación de las cargas	40
3.6.4	Matriz de admitancia.....	41
3.6.5	Análisis de ventajas.....	44
3.7	MÉTODO DE RATAN DAS.....	44
3.7.1	Modelo del sistema de potencia utilizado.....	44
3.7.2	Detección de fallas	45
3.7.3	Desarrollo de un sistema radial equivalente	45
3.7.4	Deducción matemática de la distancia de falla	46
3.7.5	Modelamiento de cargas	50
3.7.6	Análisis de ventajas y desventajas.....	52
3.8	COMPARACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS	52
4	MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL	54
4.1	INTRODUCCIÓN.....	54
4.2	APRENDIZAJE A TRAVÉS DE EJEMPLOS	54
4.3	HIPERPLANO CLASIFICADOR ÓPTIMO	55
4.4	SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN CON RESTRICCIONES....	57
4.5	CASO LINEALMENTE NO SEPARABLE	58
4.6	MÁQUINAS DE SOPORTE NO LINEALES	59
4.7	MULTICLASIFICACIÓN CON SVM.....	61
4.7.1	Máquinas multclasificadoras SV	61
4.7.2	Máquinas biclasificadoras SV generalizadas	62
4.8	MÉTODOS DE RECONSTRUCCIÓN	64
4.9	APLICACIÓN DE LA TÉCNICA A LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS.....	65
5	CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA.....	66
5.1	INTRODUCCIÓN.....	66
5.2	DESCRIPTORES.....	66
5.2.1	Extracción de características a partir de la señales transitorias.....	66
5.2.2	Caracterización a partir de huecos de tensión	69
5.3	METODOLOGÍA MEDIANTE SVM.....	73
5.3.2	Zonificación de la red.....	75

5.3.3	Adquisición de datos de falla	75
5.3.4	Preprocesamiento de la señal.....	75
5.3.5	Entrenamiento de la SVM	75
5.3.6	Pruebas de precisión y análisis de resultados.....	77
6	DESARROLLO DEL SISTEMA HÍBRIDO	78
6.1	INTRODUCCIÓN.....	78
6.2	SISTEMAS HÍBRIDOS.....	78
6.3	ARQUITECTURA PROPUESTA.....	79
6.3.1	Sistema SYNHESYS	79
6.3.2	Sistema KBANN	80
6.3.3	Sistema a partir del paradigma de Agentes	81
7	PRUEBAS DESARROLLADAS	85
7.1	INTRODUCCIÓN.....	85
7.2	DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO PROTOTIPO	85
7.2.1	Modelo de la fuente	86
7.2.2	Modelo de línea Trifásica y monofásica	86
7.2.3	Modelo de carga.....	87
7.2.4	Simulación.....	87
7.3	PRUEBAS CON EL ALGORITMO DE RATAN DAS.....	88
7.3.1	Estimación del tipo de falla.....	88
7.3.2	Estimación de la sección en falla.....	88
7.3.3	Estimación de la distancia al punto de falla.....	90
7.4	PRUEBAS CON MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL.....	95
7.4.1	Zonificación del circuito prototipo	95
7.4.2	Resultados esquemas de entrenamiento y validación para localización de fallas.....	96
7.4.3	Análisis de los resultados.....	99
7.5	PRUEBAS CON EL SISTEMA HÍBRIDO.....	99
7.5.1	Resultados Obtenidos.....	99
7.5.2	Análisis de los resultados.....	101
8	APLICACIÓN A LOS ÍNDICES DE CONTINUIDAD	102
8.1	TIEMPOS DE INDISPONIBILIDAD	102
8.2	TIEMPOS DE INCIDENCIA DE LA APLICACIÓN	103
9	APORTES, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.....	104
9.1	APORTES.....	104

9.2	CONCLUSIONES	104
9.3	TRABAJO FUTURO	106
10	BIBLIOGRAFÍA	107
	APÉNDICES	110
	APÉNDICE A.1: Ecuaciones para los distintos tipos de fallas del método de Ratan Das	110
	APÉNDICE A.2: Especificaciones del sistema de distribución prototipo	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sistema típico de distribución.....	6
Figura 2. Esquema para falla monofásica	8
Figura 3. Esquema para falla bifásica	9
Figura 4. Esquema para falla bifásica a tierra	10
Figura 5. Esquema para falla trifásica	10
Figura 6. (a) Diagrama del sistema. (b) Diagrama fasorial de la corriente y la tensión en el nodo M. (c) Diagrama de componentes real e imaginaria de la impedancia.....	12
Figura 7. Sistema de distribución con dos cargas, experimentando una falla.	13
Figura 8. Porcentaje de alimentadores que sobrepasaron el indicador DES durante los años 2001 y 2002.....	15
Figura 9. Diagrama de un alimentador de distribución.....	18
Figura 10. Falla línea a tierra en la fase A.	19
Figura 11. Posibles lugares de falla.	21
Figura 12. Sistema de distribución trifásico.	22
Figura 13. Falla línea-tierra en un sistema trifásico general.....	23
Figura 14. Caminos paralelos en la falla	24
Figura 15. Esquema de la red de distribución.....	28
Figura 16. Esquema de la sección fallada, Zderiv se concentra con Zcarga.....	29
Figura 17. Sistema en condiciones de prefalla.....	29
Figura 18. Circuito con los cambios del sistema de la figura 14 superimpuesto sobre las condiciones de prefalla descrito en la figura 15.....	30
Figura 19. Esquema del alimentador principal en condición de falla.....	35
Figura 20. Esquema equivalente para falla bifásica desde la subestación al punto de falla.	36
Figura 21. Esquema equivalente para falla bifásica más allá del punto de falla.....	36
Figura 22. Modelo de un alimentador radial con múltiples cargas.....	38
Figura 23. Modelo simplificado de un alimentador en condición de falla.	39
Figura 24. Circuito de componentes superimpuestas.....	40
Figura 25. Representación carga monofásica en la derivación.....	41
Figura 26. Representación carga trifásica en la derivación.	41
Figura 27. Circuito general de la carga en la derivación.....	42
Figura 28. Modelo de un alimentador radial con múltiples cargas.....	43
Figura 29. Diagrama del alimentador de distribución ante una falla.....	45
Figura 30. Diagrama lógico para determinar el tipo de falla e identificar las fases falladas.	46
Figura 31. Diagrama modificado de un sistema de distribución radial ante una falla. .	46
Figura 32. Diagrama de flujo del método algorítmico	51
Figura 33. Hiperplanos que separan correctamente los datos. El OSH de la derecha tiene un mayor margen de separación entre clases, por lo tanto se espera una mejor generalización.	55
Figura 34. Hiperplano lineal clasificador para el caso no separable.	58
Figura 35. La SVM no lineal mapea el espacio de entrada en otro de representación de dimensión alta.....	59
Figura 36. Señal transitoria durante una falla monofásica medida en la S/E	67
Figura 37. Detalles de la señal mediante TW	68
Figura 38. Componentes frecuenciales de la señal transitoria aplicando FFT	68
Figura 39. Procedimiento para extraer descriptores de la señal transitoria	69
Figura 40. Hueco de tensión visto por una S/E en condición de falla.....	70
Figura 41. Descriptores monofásicos del hueco de tensión	71
Figura 42. Falla monofásica en la misma fase a diferente ángulo.	72

Figura 43. Descriptores basados en los intervalos de la fase fallada.	72
Figura 44. Esquema Localizador independiente del tipo de falla (LIF)	76
Figura 45. Esquema Localizador dependiente del tipo de falla (LDF)	76
Figura 46. Esquema del sistema híbrido.....	79
Figura 47. Esquema del sistema SYNHESYS	80
Figura 48. Esquema del sistema KBANN.....	81
Figura 49. Arquitectura funcional de un agente.	82
Figura 50. Sistema híbrido basado en MBC y MBC para localización de fallas	83
Figura 51. Diagrama unifilar del modelo de sistema de distribución prototipo.	85
Figura 52. Circuito prototipo implementado en ATP/EMTP.	86
Figura 53. Modelo de la línea de parámetros concentrados	87
Figura 54. Modelo de carga	87
Figura 55. Estimación del tipo de falla del método algorítmico de Ratan Das del circuito prototipo	89
Figura 56. Múltiple estimación del método algorítmico de Ratan Das del circuito prototipo	89
Figura 57. Estimación del error de localización de fallas monofásicas fase A utilizando el algoritmo de Ratan Das	90
Figura 58. Estimación del error de localización de fallas monofásicas fase B utilizando el algoritmo de Ratan Das	91
Figura 59. Estimación del error de localización de fallas monofásicas fase C utilizando el algoritmo de Ratan Das	91
Figura 60. Estimación del error de localización de fallas bifásicas fases AB utilizando el algoritmo de Ratan Das	92
Figura 61. Estimación del error de localización de fallas bifásicas fases BC utilizando el algoritmo de Ratan Das	92
Figura 62. Estimación del error de localización de fallas bifásicas fases AC utilizando el algoritmo de Ratan Das	93
Figura 63. Estimación del error de localización de fallas bifásicas a tierra fases AB utilizando el algoritmo de Ratan Das.....	93
Figura 64. Estimación del error de localización de fallas bifásicas a tierra fases BC utilizando el algoritmo de Ratan Das.....	94
Figura 65. Estimación del error de localización de fallas bifásicas a tierra fases AC utilizando el algoritmo de Ratan Das.....	94
Figura 66. Estimación del error de localización de fallas trifásicas utilizando el algoritmo de Ratan Das	95
Figura 67. Zonas para la localización de fallas mediante SVM.....	96
Figura 68. Número de Vectores de soporte esquema LIF	97
Figura 69. Número de Vectores de soporte esquema LDF	98
Figura 70. Porcentaje de precisión de localización de fallas para los esquemas LIF y LDF.....	98
Figura 71. Porcentaje de precisión de localización de fallas para el sistema híbrido..	100
Figura 72. Comparación del Porcentaje de éxito en la estimación de sección del Algoritmo de Ratan Das y el Sistema Híbrido	101

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de las características de los algoritmos de localización de fallas en sistemas de distribución	52
Tabla 2. Resultados comparativos descriptores ante falla monofásica	74
Tabla 3. Descriptores obtenidos para cada tipo de falla	74
Tabla 4. Número de simulaciones realizadas en ATP/EMTP.....	88
Tabla 5. Datos de zonificación del circuito prototipo.....	96
Tabla 6. Datos de entrenamiento y validación.....	96
Tabla 7. Comparación resultados Algoritmo de Ratan Das y Sistema Híbrido	100

TITULO
DETECCIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN LOS SISTEMAS DE ENERGÍA MEDIANTE LA TÉCNICA MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL (SVM)*

AUTOR

Juan Carlos Rodríguez Suárez**

PALABRAS CLAVES

Calidad de Potencia, Interrupciones, Sistemas de Distribución, Localización de fallas, Inteligencia Artificial, Máquinas de Soporte Vectorial.

DESCRIPCIÓN

La interrupción del suministro de energía eléctrica en forma permanente o transitoria, ocasiona efectos negativos en usuarios industriales, comerciales y residenciales. Las redes de transmisión cuentan con esquemas eficientes de protección y localización de fallas. Sin embargo, las empresas de distribución de energía, en razón de sus implicaciones técnicas, económicas y operativas, están imposibilitadas en implementar los algoritmos y esquemas existentes en las redes de transmisión, para la identificación y localización de fallas.

En este trabajo de investigación se presenta una alternativa de solución al problema de localización de fallas en redes de distribución de energía eléctrica, de manera que requiera un mínimo de inversión por parte de estas empresas y que proporcione la información apropiada para la prevención y atención oportuna de fallas. El objetivo es disminuir el tiempo de restablecimiento del sistema mediante la localización oportuna de una falla, con base en la técnica de inteligencia computacional denominada Máquinas de Soporte Vectorial, combinada con un método algorítmico. Ésta es una herramienta de clasificación binaria que emplea los datos del sistema y de las fallas ocurridas, y utilizando características de las redes neuronales y teoría de optimización, clasifica las fallas nuevas con base en el aprendizaje realizado y en pocas mediciones.

La metodología propuesta emplea descriptores de las medidas de tensión y corriente registrados en la cabecera de la red de distribución durante fallas, los parámetros y la topología propia de la red, como base de aprendizaje. Los resultados obtenidos, con muy bajo costo, permitirán mejorar los índices de continuidad en los sistemas de distribución.

*Trabajo de investigación.

**Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Ingeniería Eléctrica.
Director: Dr. Hermann Raúl Vargas Torres

TITLE
FAULT DETECTION AND LOCALIZATION IN ELECTRIC POWER SYSTEMS THROUGH THE TECHNIQUE SUPPORT VECTORIAL MACHINES *

AUTHOR

Juan Carlos Rodríguez Suárez**

KEY WORDS

Power Quality, Interruptions, Distribution Systems, Fault Location, Artificial Intelligence, Support Vector Machines.

DESCRIPTION

The interruption of supply electrical energy in permanent or transitory state causes negative effects in industrial, commercial and residential customers. The transmission systems have on efficient schemes of protection and faults location. Nevertheless, the distribution power system companies, due to their technical, economic and operative implications, they are disabled in perform the algorithms and schemes designed for the identification and fault location in transmission systems.

The present research work gives an alternative of solution to the problem of fault locations in distribution power system networks. It provides the appropriate information for the prevention and opportune attention of faults and requires a minimum of investment of the companies. The objective is to diminish the time of power system restoration by means of the opportune fault location. It bases in the intelligence computational technique denominated Support Vector Machines (SVM), combined with an algorithm method. This one is a tool of binary classification that uses the data of the system and the happened faults, and using characteristic of the neuronal networks and optimization theory, locates the new faults based on training dates and a few measurements.

The propose methodology uses descriptors of the voltage and current measures in the head of the distribution network during faults, the parameters and the topology of the network, as learning base. The obtained results, with very low cost, allow improving the indices of continuity of the distribution systems.

*Research work.

**Faculty of physical-mechanics engineering. Electrical engineering.
Director: Dr. Hermann Raúl Vargas Torres

INTRODUCCIÓN

Es innegable la importancia que tiene la energía eléctrica; desde las actividades científicas e industriales hasta los simples actos cotidianos se desarrollan con una gran dependencia del suministro de energía eléctrica. Esta fuerte correlación entre desarrollo tecnológico, bienestar y energía eléctrica ha determinado que cada vez con más insistencia se requiera que el suministro de energía eléctrica se realice bajo criterios de seguridad, confiabilidad y calidad. Debido a esta realidad, la monitorización de las ondas de tensión y corriente en los sistemas eléctricos de potencia es una necesidad tanto para las empresas suministradoras del servicio como para los usuarios del mismo, entre otras cosas para garantizar el cumplimiento de unos estándares mínimos recomendados por la normativa para suministradores (tensión) y usuarios (corriente) de la energía eléctrica.

Dentro de esta temática, la continuidad del servicio es actualmente de gran interés para cada uno de los participantes en el negocio: los usuarios requieren un suministro continuo para mantener los diferentes procesos de control, producción y almacenamiento de información; las empresas proveedoras necesitan mantener un flujo de energía para obtener beneficios económicos por el servicio prestado y evitar pagos por compensaciones a los usuarios.

Sin embargo, los sistemas de transmisión y distribución de energía eléctrica están expuestos inherentemente a fallas. Estas están generalmente asociadas a causas externas, tales como fenómenos atmosféricos, sobrecargas debidas a aumentos excesivos de la demanda, acercamientos entre conductores y fallas relacionadas con elementos extraños (árboles, animales, etc.). Es difícil pensar en un sistema en el cual no puedan ocurrir fallas, por lo cual las investigaciones se están centrando en la manera de localizar más precisa y rápidamente los eventos que puedan afectar la continuidad del servicio de energía.

El tema de la localización de fallas en los sistemas eléctricos de transmisión, subtransmisión y distribución ha sido de considerable interés para el sector eléctrico, tanto para ingenieros como investigadores durante más de 30 años. El incremento en las investigaciones en este tema ha confluído en el desarrollo de métodos novedosos descritos en publicaciones de revistas técnicas. Cabe resaltar que en su mayoría las investigaciones han estado encaminadas a localizar fallas en sistemas de transmisión, debido básicamente, al impacto socioeconómico de éstas sobre los sistemas de potencia.

El crecimiento notorio de la demanda junto con las nuevas estrategias de mercado en el sector eléctrico, han llevado al aumento en tamaño y en complejidad de los sistemas de distribución. Adicionalmente, la regulación ha suscrito a las empresas a mantener unos niveles aceptables de calidad de prestación del producto de la energía eléctrica para el correcto funcionamiento de los equipos.

Los sistemas de distribución experimentan fallas causadas principalmente por tormentas, descargas atmosféricas, vandalismo, cortos circuitos causados por animales y otros objetos externos. En la mayoría de los casos, las fallas eléctricas causan daños mecánicos los cuales se deben reparar para restaurar el servicio de forma oportuna.

La restauración del servicio se puede facilitar si la ubicación de la falla se conoce o puede ser estimada con una precisión razonable, especialmente en circuitos altamente ramificados y geográficamente dispersos como son los de distribución.

Para poder enfrentar de manera apropiada las nuevas condiciones del sistema, es indispensable el uso de modernas técnicas de análisis, sin desvincularse totalmente de los avances tecnológicos en el campo del hardware, con el fin de garantizar la efectiva y útil implementación.

Hay dos técnicas que cabe mencionar por su aplicación en este campo específico de trabajo:

- Métodos basados en el modelo¹: usan el valor de la componente fundamental de las señales de tensión y corriente medidas en la subestación y el modelo del sistema de potencia (topología del circuito, datos de cargas y líneas), para calcular la impedancia aparente vista desde la subestación hasta el sitio de falla.
- Métodos basados en el conocimiento: una base de conocimientos con información de los elementos de protección, estado de interruptores, registros de llamadas de los clientes afectados por las fallas, y finalmente, información proveniente del procesamiento de los registros de tensión y corriente medidos en la subestación

Cabe resaltar el hecho de que los trabajos más recientes en el campo de la localización, no separan las técnicas basadas en el modelo, de las de conocimiento, dando lugar a filosofías "híbridas".

En conclusión, el presente trabajo de investigación comprende el estudio y la implementación de un modelo de tipo híbrido que mezcla apropiadamente las diferentes técnicas mencionadas para la localización de fallas en sistemas de distribución.

¹ También llamados métodos convencionales

1 PLANTEAMIENTO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1 DEFINICIÓN Y ACOTACIÓN DEL PROBLEMA

El trabajo de investigación está relacionado con el problema de localización de fallas en sistemas de potencia, específicamente, con la localización de fallas eléctricas en sistemas de distribución de energía eléctrica, los cuales poseen características técnicas muy particulares, como los son la configuración radial, la no homogeneidad de las redes, la presencia de múltiples cargas laterales y transformadores a lo largo de los circuitos alimentadores, que hacen de la localización de fallas un problema de difícil determinación.

Se pretende desarrollar un primer avance hacia una herramienta con la cual las empresas operadoras de red y las empresas distribuidoras de energía eléctrica puedan disminuir los tiempos de reposición de fallas y mejorar así sus índices de calidad y confiabilidad. Con base en una acertada estimación sobre el punto de localización de una falla recurrente o transitoria al interior de una red de distribución, las empresas prestadoras del servicio pueden implementar mejores y más eficientes estrategias de atención y recuperación de fallas que disminuirían los tiempos de duración de las interrupciones asociados a este tipo de anomalías, y consecuentemente, la reducción del índice de Duración Equivalente de las interrupciones del Servicio a nivel de circuito – *DESC*.

La base de desarrollo de la herramienta de localización de fallas es la conjugación de uno de los métodos algorítmicos existentes para la localización de fallas junto con una herramienta de razonamiento basado en conocimiento. Se pretende aprovechar las virtudes del método algorítmico en cuanto al modelado de la red y mejorar su exactitud con la utilización de información complementaria.

1.2 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los trabajos publicados hasta la fecha presentan un interés por proponer métodos convencionales que localicen adecuadamente el punto de falla en sistemas de transmisión y distribución. Sin embargo, las técnicas no convencionales e híbridas han sido poco aplicadas y menos aún tratándose de sistemas de distribución, con limitantes en los equipos y las medidas. Teniendo en cuenta lo anterior, los objetivos del trabajo de investigación son:

1.1.1 Objetivo general

Implementar un método híbrido para la reducción del conjunto de localizaciones probables y de tipo de falla en sistemas de distribución de energía eléctrica.

1.1.2 Objetivos específicos

- Analizar el comportamiento transitorio y de estado estable de los sistemas de distribución ante la ocurrencia de una perturbación que altere su operación normal, a través de modelado y simulación en el computador.

- Implementar un método algorítmico basado en el modelo del sistema, como una aproximación inicial de localización de una falla en el sistema de energía.
- Adaptar la técnica de inteligencia artificial Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) para la identificación y localización de fallas en sistemas de energía eléctrica.
- Proponer un modelo híbrido que utilice un método algorítmico, combinado con la técnica de Inteligencia artificial, para la identificación y localización de fallas, dentro de una red de distribución de energía eléctrica.

1.3 APORTES ESPERADOS

El proyecto de investigación objeto de esta propuesta representa un avance dentro del análisis de sistemas de distribución en condiciones de falla. La metodología propuesta proporcionará herramientas que aprovechan el conocimiento de las redes eléctricas (como resultado del modelado del sistema), junto con las virtudes y ventajas que las técnicas y herramientas de inteligencia artificial ofrecen en la solución de problemas de ingeniería. Con la implementación de estas herramientas por parte de las empresas de distribución de energía y operadoras de red, se establecerá un medio adecuado para mejorar los índices de calidad del servicio a un costo de inversión razonable.

En cuanto al análisis de sistemas de potencia, el proyecto ofrecerá nuevos parámetros y elementos para el análisis de perturbaciones, con base en el estudio en estado transitorio y estable del sistema de potencia. Estos elementos a futuro pueden establecer nuevas formas y estrategias de análisis de los mismos.

De otro lado, la aplicación de técnicas de análisis y modelos basados en el conocimiento al problema específico de localización de fallas, establece un precedente para futuros proyectos que contemplen el mejoramiento de algoritmos basados en métodos analíticos, y la adecuación y aplicación de técnicas de inteligencia artificial para la solución de problemas de ingeniería.

1.4 ENTIDADES INTERESADAS

El presente trabajo de investigación forma parte del proyecto MODELOS HÍBRIDOS PARA LOCALIZACIÓN DE FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN financiado por Colciencias- ISA, el cual propone el diseño de una metodología de sistemas híbridos para la reducción del conjunto de localizaciones probables y de tipo de falla en sistemas de distribución de energía eléctrica. Este proyecto beneficiará a todas las empresas operadoras de red, ya que impulsa una alternativa económica para localizar rápida y efectivamente fallas y por ende mejorar los índices de continuidad de las empresas.

1.5 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El documento de tesis está dividido en nueve capítulos. La descripción de las características de los circuitos de distribución se presentan en el capítulo dos. Posteriormente, en el tercer capítulo se describen detalladamente los diferentes métodos algorítmicos de localización de fallas, su comparación y limitaciones, haciendo énfasis en el algoritmo de Ratan Das. En el capítulo cuatro describe la técnica de inteligencia artificial Máquinas de Soporte Vectorial, sus consideraciones y variantes. La caracterización del sistema en falla es presentada en el capítulo cinco, el método

híbrido propuesto se presenta en el capítulo seis. Finalmente en los capítulos séptimo, octavo y noveno respectivamente, se muestran los resultados de aplicar el método a un sistema prototipo, su aplicación a reducir índices de continuidad y las conclusiones. Las recomendaciones para trabajos posteriores son también tratadas en el último capítulo.

2 FALLAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

2.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describe a grandes rasgos un sistema típico de distribución, se presentan los diferentes tipos de fallas paralelas y su representación en redes de secuencia. Se discute el impacto de la resistencia de falla y de las cargas en la estimación de la localización de la sección fallada y en la parte final se explican los índices que miden la continuidad y el problema que se presenta en los sistemas de distribución.

2.2 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Se entiende por sistema de distribución de energía eléctrica a la disposición adoptada por los conductores, transformadores, consumidores y demás elementos del sistema, para lograr que la energía generada en las centrales pueda ser utilizada en los sitios de consumo [Das98]. Si una falla ocurre en un sistema de distribución se interrumpe el servicio a los consumidores. Se estima que un 80% de todas las interrupciones ocurren debido a fallas en los sistemas de distribución [Bol00].

En la figura 1 se muestra un sistema típico de distribución el cual incluye circuitos de subtransmisión, subestaciones, alimentadores, transformadores, circuitos secundarios y consumidores. Los circuitos de subtransmisión operan a tensiones que oscilan entre los 13,2 y 230 kV, transportan grandes cantidades de potencia hacia las subestaciones distribuidoras. Una subestación distribuidora incluye transformadores de potencia, barrajes, líneas, reactores, condensadores, aisladores, interruptores y seccionadores. Los transformadores reducen la tensión de subtransmisión a niveles más bajos para la distribución local.

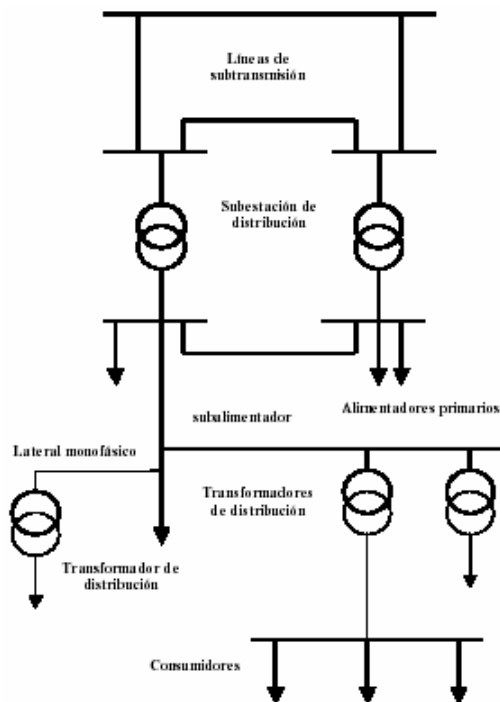


Figura 1. Sistema típico de distribución

Los alimentadores de distribución primaria los cuales operan a tensiones con rangos que varían entre los 4.16 y 34.5 kV, distribuyen energía a los centros de carga. De esos centros salen circuitos ramales laterales con alimentadores trifásicos y monofásicos. Los transformadores de distribución que operan entre los 10 y los 500 KVA están instalados comúnmente en alimentadores primarios o subalimentadores para reducir la tensión de distribución al nivel de utilización. Los circuitos secundarios facilitan la distribución de energía desde los transformadores de distribución a los consumidores dependiendo de las necesidades de consumo.

2.3 ANÁLISIS DE FALLAS PARALELAS

Las fallas en los sistemas de energía pueden ser divididas en dos categorías: fallas serie y fallas paralelas (shunt). Una falla paralela es un desbalance entre fases o entre fase y neutro, mientras que la falla serie es un desbalance entre las impedancias de línea, que no incluye interconexiones entre líneas. Se analizarán las fallas paralelas por ser las más comunes en los sistemas de distribución [Das98]. Para un sistema trifásico, las fallas paralelas se clasifican en cuatro categorías [Das98]:

1. Falla monofásica (FLT): se presenta cuando una línea es interconectada con la tierra a través de un elemento conductor. Muchas de estas fallas ocurren por deterioro en el aislamiento de la línea. De todos los tipos de fallas que ocurren en los sistemas de energía, entre un 70% y 80% son fallas monofásicas a tierra [Ste75] [And95].
2. Falla bifásica (FLL): se presenta cuando dos líneas se conectan entre sí. Es el segundo tipo de fallas más común entre los sistemas de distribución considerándose un 15% de todas las fallas [Wes64].
3. Falla bifásica a tierra (FLLT): se presenta cuando dos líneas son conducidas a tierra. Hasta un 10% de las fallas son de este tipo [Wes64].
4. Falla trifásica (FLLL): se presenta cuando las tres líneas se interconectan entre sí. Se considera que este tipo de fallas son balanceadas (la resistencia de falla entre cada una de las líneas es igual). Aunque puede ser también conducida a tierra se considera su efecto no significativo.

Todas las fallas con excepción de las fallas trifásicas, causan que los sistemas de potencia operen de manera desbalanceada. Debido a esto, la teoría de las componentes simétricas es conveniente para estudiar la operación del sistema durante este tipo de condiciones de desbalance.

2.3.1 Análisis de fallas en componentes simétricas

Los fasores de las tensiones y corrientes de un sistema balanceado trifásico se pueden representar como:

$$\begin{aligned}
 I_{af} &= (I_{0f} + I_{1f} + I_{2f}) \\
 I_{bf} &= (I_{0f} + a^2 I_{1f} + a I_{2f}) \\
 I_{cf} &= (I_{0f} + a I_{1f} + a^2 I_{2f})
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

donde: I_{0f} , I_{1f} y I_{2f} son las componentes de secuencia cero, positiva y negativa respectivamente, con la fase a como referencia.

$a = 1\angle 120^\circ$ es un fasor operador

La relación entre las cantidades de secuencia y las corrientes de línea se expresan como:

$$\begin{aligned} I_{0f} &= \frac{1}{3}(I_{af} + I_{bf} + I_{cf}) \\ I_{1f} &= \frac{1}{3}(I_{af} + aI_{bf} + a^2I_{cf}) \\ I_{2f} &= \frac{1}{3}(I_{af} + a^2I_{bf} + aI_{cf}) \end{aligned} \quad (2.2)$$

De la misma manera, para las tensiones de fase, siendo la fase a la referencia, se obtiene:

$$\begin{aligned} V_{0f} &= \frac{1}{3}(V_{af} + V_{bf} + V_{cf}) \\ V_{1f} &= \frac{1}{3}(V_{af} + aV_{bf} + a^2V_{cf}) \\ V_{2f} &= \frac{1}{3}(V_{af} + a^2V_{bf} + aV_{cf}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

2.3.1.1 Falla monofásica

El esquema de falla es presentado en la figura 2. Los tres tipos de fallas monofásicas a tierra son las siguientes:

1. Falla fase A a tierra
2. Falla fase B a tierra
3. Falla fase C a tierra

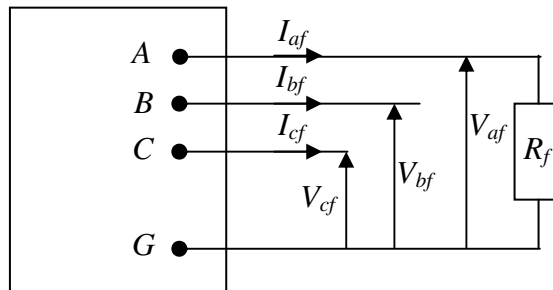


Figura 2. Esquema para falla monofásica

Los parámetros de la falla son:

$$\begin{aligned} I_{bf} &= I_{cf} = 0 \\ V_{af} &= I_{af} * R_f \end{aligned} \quad (2.4)$$

Usando como referencia la fase A y sustituyendo la ecuación (2.4) en las ecuaciones (2.2) y (2.3) se obtiene:

$$V_{0f} + V_{1f} + V_{2f} = (I_{0f} + I_{1f} + I_{2f})R_f \quad (2.5)$$

2.1 Falla bifásica

El esquema de falla es presentado en la figura 3. Los tres tipos de fallas línea-línea, que comúnmente ocurren son los siguientes:

1. Falla fase B y fase C.
2. Falla fase C y fase A
3. Falla fase A y fase B

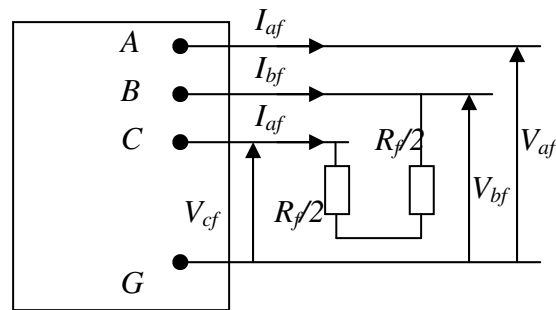


Figura 3. Esquema para falla bifásica

Los parámetros de la falla son:

$$\begin{aligned} I_{af} &= 0 \quad \text{y} \quad I_{bf} + I_{cf} = 0 \\ V_{bf} - I_{bf} \frac{R_f}{2} &= V_{cf} - I_{cf} \frac{R_f}{2} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Usando como referencia la fase A y sustituyendo la ecuación (2.6) en las ecuaciones (2.2) y (2.3) se obtiene:

$$V_{1f} - V_{2f} = (I_{1f} - I_{2f}) \left(\frac{R_f}{2} \right) \quad (2.7)$$

2.3.1.2 Falla bifásica a tierra

El esquema de falla es presentado en la figura 4. Los tres tipos de fallas línea-línea a tierra, que comúnmente ocurren son los siguientes:

1. Falla fase B y fase C a tierra.
2. Falla fase C y fase A a tierra.
3. Falla fase A y fase B a tierra.

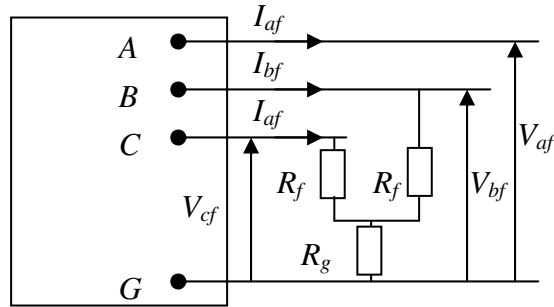


Figura 4. Esquema para falla bifásica a tierra

$$I_{af} = 0 \quad \text{y} \quad I_{bf} + I_{cf} = I_g$$

Los parámetros de la falla son: $V_{bf} = I_{bf} R_f + I_g R_g$ (2.8)

$$V_{cf} = I_{cf} R_f + I_g R_g$$

Usando como referencia la fase A y sustituyendo la ecuación (2.8) en las ecuaciones (2.2) y (2.3) y realizando algunas operaciones algebraicas, se tiene:

$$V_{1f} - V_{2f} = (I_{1f} - I_{2f}) R_f = V_{of} - I_{0f} (R_f + 3R_g) \quad (2.9)$$

2.3.1.3 Falla trifásica

Las fallas trifásicas que poseen resistencias de falla iguales en las tres fases son llamadas fallas trifásicas balanceadas. El esquema de falla es presentado en la figura 5. Estas fallas se dividen en dos categorías, las que involucran la tierra y las que no involucran la tierra

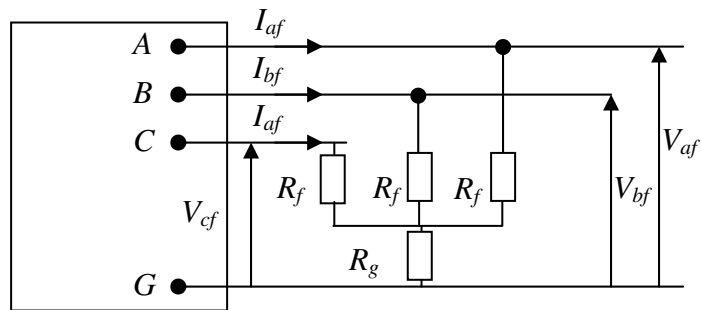


Figura 5. Esquema para falla trifásica

$$I_{af} + I_{bf} + I_{cf} = I_g$$

$$V_{af} = I_{af} R_f + I_g R_g$$

$$V_{bf} = I_{bf} R_f + I_g R_g$$

$$V_{cf} = I_{cf} R_f + I_g R_g$$

Los parámetros de la falla son: (2.10)

Usando como referencia la fase A y sustituyendo la ecuación (2.10) en las ecuaciones (2.2) y (2.3) y realizando algunas operaciones algebraicas, se tiene:

$$V_{1f} - I_{1f}R_f = V_{2f} - I_{2f}R_f = V_{0f} - I_{0f}(R_f + 3R_g) = 0 \quad (2.11)$$

2.3.2 Resistencia de falla

Las fallas resistivas poseen dos componentes principales, la primera, resistencia de arco y la segunda, la resistencia de tierra. La resistencia de falla puede ser constante para la duración de una falla o puede variar con el tiempo debido al alargamiento del arco producido por el flujo de corriente a través de la misma. En fallas línea-línea, la resistencia de falla esta completamente relacionada con el arco, sin embargo, para fallas que involucran la tierra, las fallas resistivas se componen de ambos, la resistencia de tierra y la resistencia de arco. A continuación se definirán cada una de estas dos componentes de las resistencias de falla.

2.3.2.1 Resistencia de arco

La resistencia de arco depende de la corriente y de la longitud del arco, tal y como se muestra en la ecuación (2.12).

$$R_{arc} = \frac{8750L_{arc}}{I_f^{1.4}} \quad (2.12)$$

Donde,

- R_{arc} Resistencia de arco en ohmios.
- L_{arc} Longitud del arco en pies.
- I_f Corriente de falla en amperes.

La longitud del arco inicialmente es igual al espaciamiento entre el conductor y la torre, o el espaciamiento entre dos conductores, pero incrementa debido a la prolongación del arco causado por el viento, convección y propagación electromagnética. Se ha llegado a la conclusión que la resistencia de arco puede ser expresada en términos del espaciamiento del conductor, velocidad del viento y el tiempo, como se muestra en la ecuación (2.13) [Das98].

$$R_{arc} = \frac{(d + 3 \cdot U \cdot T_{arc})}{I_f^{1.4}} \quad (2.13)$$

Donde,

- d Espaciamiento del conductor en pies
- U Velocidad del viento en millas / hora.
- T_{arc} Duración del arco en segundos.

2.3.2.2 Resistencia de Tierra

La resistencia dominante en el circuito de falla es la resistencia de contacto entre el conductor y el flujo de la corriente a través de la tierra. La resistencia de tierra depende de la humedad y del tipo de terreno.

Las resistencias de falla para corto-circuitos entre fases no superan unos pocos ohmios. Sin embargo, la resistencia de falla es mucho mayor para fallas a tierra debido a que la resistencia de la torre puede estar alrededor o por encima de los 10 ohmios. Las resistencias de falla son muy grandes para contactos con árboles o para conductores rotos que caen en pavimento húmedo. Los valores de la resistencia de falla oscilan entre unos pocos ohmios y unos cientos de ohmios.

2.3.3 Efecto de la resistencia de falla en la estimación de la sección fallada

En el sistema representado en la figura 6(a), la corriente I_{mf} registrada en el instante de la falla por los dispositivos localizadores, es equivalente a la corriente I_f en la falla. La impedancia Z_m vista desde el nodo M puede ser expresada matemáticamente como se indica en la ecuación (2.14).

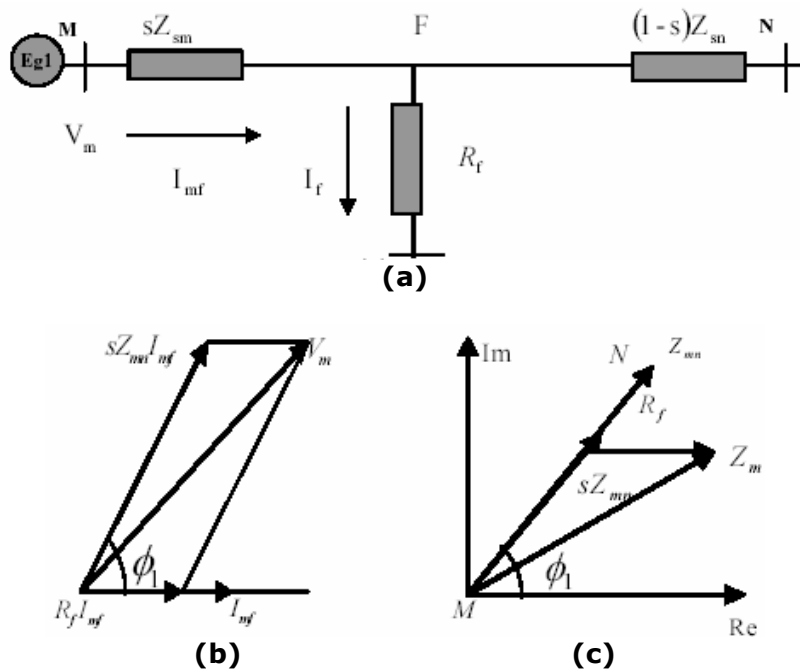


Figura 6. (a) Diagrama del sistema. (b) Diagrama fasorial de la corriente y la tensión en el nodo M. (c) Diagrama de componentes real e imaginaria de la impedancia.

$$Z_m = \frac{V_m}{I_{mf}} = sZ_{mn} + R_f \quad (2.14)$$

Donde,

Z_m Impedancia medida en el nodo M.

V_m Tensión durante la falla en el nodo M.

I_{mf} Corriente que fluye del nodo M hacia la falla en F

s Distancia de la falla desde el nodo M, expresada como una fracción de la longitud de la línea

Z_{mn} Impedancia de la línea de la barra M a N.

R_f Resistencia de falla incluyendo la resistencia de tierra.

El efecto de la resistencia de falla en la estimación de la ubicación de la falla, se muestra en el diagrama fasorial de la figura 6 (c). Esta figura muestra que la impedancia vista por el dispositivo localizador de fallas (en el nodo M) es mayor que la impedancia de la línea desde la barra M hasta la falla (punto F). Sin embargo, la componente reactiva de la impedancia Z_m permanece igual a la componente reactiva de la impedancia de la línea, desde el nodo M hasta la falla, es decir, hasta el punto F donde está ubicada la falla.

Es claro de la ecuación (2.14) que la impedancia, Z_m se compone de la impedancia de la línea desde el nodo M a la falla y la resistencia de falla. La componente reactiva de Z_m es independiente de la resistencia de falla, por consiguiente 's' puede ser calculada a través de la ecuación (2.15).

$$s = \frac{I_m(Z_m)}{I_m(Z_{mn})} \quad (2.15)$$

Vale la pena resaltar que este procedimiento entrega un estimativo de la localización de la falla si la corriente de falla es alimentada solamente en un extremo de la línea, es decir, siempre que el sistema sea radial.

2.3.4 Efecto de las cargas en la estimación de la sección fallada

Al igual que las resistencias de falla, las cargas en sistemas de distribución también pueden influir en la introducción de errores en la estimación de la sección fallada. Dicho error depende del tamaño y las características de las cargas. En la figura 7 se muestra un sencillo sistema de distribución radial que alimenta dos cargas y experimenta una falla en el punto F.

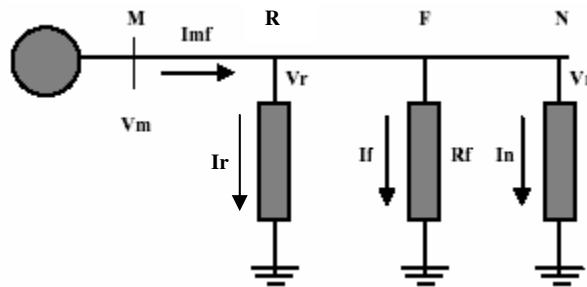


Figura 7. Sistema de distribución con dos cargas, experimentando una falla.

La corriente de falla I_f puede ser expresada matemáticamente como se muestra a continuación en la ecuación (2.16)

$$I_f = I_{mf} - I_r - I_n \quad (2.16)$$

Donde,

I_f , Corriente que fluye por la falla en el punto F
 I_{mf} , Corriente de línea durante la falla en la barra M.
 I_r e I_n , Corrientes de carga durante la falla en los nodos N y R respectivamente.

Las tensiones V_r y V_n en los nodos R y N respectivamente dependen de la magnitud de la resistencia de falla, de la impedancia de la línea y de las cargas. Las corrientes de carga I_r e I_n dependen de las tensiones V_r y V_n , y también de las características de las cargas. Para un valor grande en la magnitud de la resistencia de falla, las tensiones V_r y V_n pueden ser grandes haciendo que las corrientes de carga sean comparables con las corrientes de falla. Esto introduce errores en la medición de la distancia de la falla si no se toman las medidas apropiadas.

2.4 ÍNDICES DE CONTINUIDAD EN COLOMBIA

Para regular la calidad de la prestación del servicio de energía eléctrica en cuanto a continuidad, la normativa colombiana se ha enfocado en abordar dos aspectos fundamentales: la reducción del número de interrupciones y la reducción de la duración de cada interrupción. En Colombia, la Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG – está encargada de reglamentar y vigilar el cumplimiento de los límites máximos permitidos para estos indicadores por parte de las empresas de energía. La violación de estos límites implica el pago de compensaciones económicas a los usuarios.

Se han establecido dos índices que miden la continuidad del servicio de energía eléctrica en nuestro país. Estos son el Indicador de Duración Equivalente de las interrupciones del Servicio (DES) y el indicador de Frecuencia Equivalente de las interrupciones del Servicio (FES), los cuales se definen como:

$$DES = \sum_{i=1}^{NTI} t(i), \text{ Tiempo total de no suministro de energía.} \quad (2.17)$$

$$FES = NTI, \text{ Número total de interrupciones del servicio.} \quad (2.18)$$

De acuerdo con los resultados obtenidos durante los dos primeros años de aplicación de la reglamentación sobre calidad de energía en el país, se ha encontrado que los niveles de los índices DES y FES reportados por las empresas operadoras de red se encuentran muy distantes de los límites máximos permitidos. Por ejemplo, según los consolidados nacionales de la CREG para el año 2001, en el caso más crítico el índice DES promedio fue de 106.60 horas para el Grupo de Calidad 1 (cabeceras municipales con más de 100000 habitantes) y de 137.87 horas para el Grupo de Calidad 4 (cabeceras municipales con menos de 50000 habitantes), superando ampliamente los límites de 19 y 61 horas respectivamente establecidos por la CREG [TAFSQ00]. En la figura 8 se presenta un diagrama de barras del porcentaje de alimentadores que sobrepasaron el índice DES en los años 2001 y 2002 en un estudio realizado por el GISEL en convenio con la SSPD. T1, T2, y T3 corresponden a los Grupos de Calidad uno, dos y tres establecidos por la CREG.

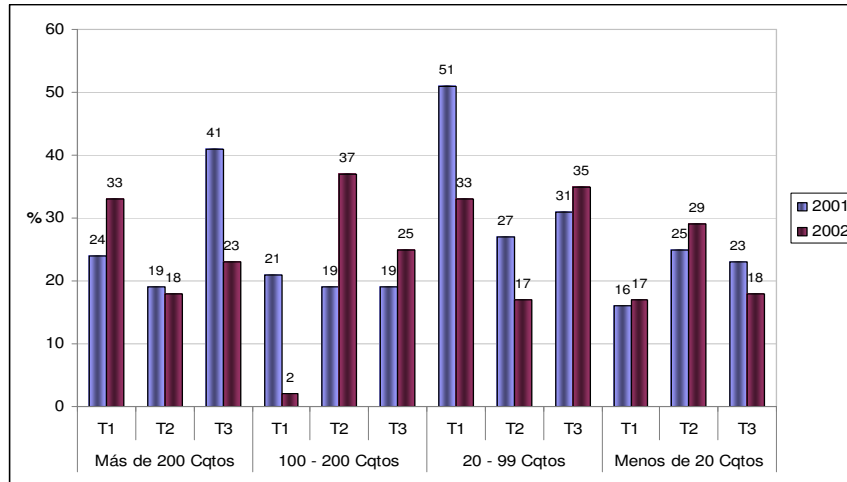


Figura 8. Porcentaje de alimentadores que sobrepasaron el indicador DES durante los años 2001 y 2002

De otro lado, debido al incumplimiento de los índices de continuidad en los tres primeros trimestres del año 2002, los operadores de red tuvieron que hacer compensaciones por \$ 4,137'662,875 a los usuarios Colombianos.

Si se analiza estas cifras teniendo en cuenta la situación actual de las empresas distribuidoras de energía, se puede decir que algunas están destinadas a un fracaso económico, ya que buena parte de sus ingresos y presupuesto de inversión deben ser destinados al pago de compensaciones. Se suma a lo anterior que la normativa es cada año más exigente y las empresas no alcanzan a invertir lo necesario para la mejora de sistemas y redes.

Acorde a sus capacidades, infraestructura y cobertura de servicio, las empresas de transmisión disponen de mayores y más avanzados recursos para el cumplimiento de sus índices de calidad. No ocurre lo mismo con los operadores de red y las empresas distribuidoras, para quienes la implementación de sistemas de identificación y localización de fallas similares a los de los sistemas de transmisión no es económicamente viable dada su relación costo/beneficio [MC03].

Para los sistemas de transmisión se han desarrollado excelentes algoritmos que permiten la localización precisa del punto de falla. Sin embargo, tales algoritmos no son aplicables o presentan una gran incertidumbre en las redes de distribución, debido a que éstas cuentan con características propias [Das98][DS00], tales como:

- La monitorización de tensión y corriente se encuentra sólo en la subestación (o cabecera) del circuito de distribución.
- Las redes no son homogéneas, ya que generalmente presenta diferentes calibres de conductor en un circuito.
- Existen múltiples derivaciones de cargas a lo largo de cada circuito alimentador.
- Los circuitos son altamente ramificados.
- La operación del sistema es radial (alimentación por una sola terminal).

En los últimos años se han adaptado y diseñado diferentes métodos algorítmicos para su aplicación en las redes de distribución. Los métodos desarrollados utilizan la información del modelo de la red (topología y parámetros de líneas y cargas), y los valores eficaces, de falla y de prefalla, de la componente fundamental de tensión y corriente [Das98]. Estos métodos permiten establecer la distancia eléctrica desde el sitio de medida hasta la ubicación de la falla mediante la estimación paramétrica de la impedancia, a partir del cálculo fasorial entre las tensiones y corrientes. El problema actual con los algoritmos básicos es que dada la naturaleza topológica de la red, tiene limitantes y errores, y el inconveniente de la múltiple estimación de posibles localizaciones.

Todos estos inconvenientes hacen que cada una de las técnicas por separado no se desempeñen correctamente en todos los casos que se pueden presentar en condiciones reales de operación. Por ello, la mezcla o combinación de la información proveniente de la medición de las corrientes y tensiones puede ser de mayor utilidad en conjunto con técnicas de análisis más complejas entre las que se destacan las técnicas de inteligencia artificial [MMC05].

3 MÉTODOS DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS

3.1 INTRODUCCIÓN

Los sistemas de distribución son la principal fuente de energía para una gran cantidad de usuarios industriales, comerciales y residenciales. Una falla en el interior de estos sistemas representa una interrupción del servicio a los usuarios, y consecuentemente pérdidas económicas por detención de procesos, pérdidas de información, daños y pérdidas en maquinarias e insumos, etc. A nivel mundial se han realizado diversos estudios en los que se ha establecido que el 80% del total de las interrupciones del suministro de energía eléctrica son originadas por fallas en los sistemas de distribución.

Como una consecuencia natural, diversas investigaciones han sido desarrolladas con el fin de realizar una estimación sobre el punto de localización de fallas; la mayoría de ellas enfocadas hacia los sistemas de transmisión. Sin embargo, otros estudios se han ido centrando en la localización de fallas en sistemas de distribución. Estos métodos utilizan el modelo del sistema, así como los valores de la componente fundamental de tensión y corriente de prefalla y de posfalla para calcular la impedancia aparente vista desde la subestación hasta el sitio de falla [Das98]. Tienen una alta precisión, pero en sistemas altamente ramificados y de diferentes calibres de conductor, esta disminuye. Adicionalmente presentan problemas de múltiple estimación.

Debe quedar claro que para el desarrollo de los algoritmos de localización, es necesario un conocimiento pleno de las características de la red.

En el presente capítulo se describen diferentes métodos de localización de fallas aplicados en los sistemas de distribución. No es un análisis exhaustivo, pero permite el análisis de sus ventajas y limitaciones. Se detalla más extensamente el método algorítmico de Ratan Das, el cual fue implementado en este trabajo de investigación. En la parte final se presenta una comparación entre los métodos descritos y se justifica el uso del algoritmo implementado.

3.2 MÉTODO DE A. GIRGIS, DAVID LUBKEMAN Y JUN ZHU

El esquema de localización de fallas que se describe en esta sección, utiliza un sistema de distribución automatizado, el cual integra información disponible desde la subestación en los diferentes equipos de registro, con el conocimiento de la configuración del alimentador y la coordinación de las protecciones; contenidos en una base de datos [ZLG97].

En este esquema son necesarios tres procesos secuenciales, para localización y diagnóstico de las fallas:

- Procesamiento de la señal:

Corresponde al primer paso necesario en el desarrollo del método de localización de fallas y consiste en procesar las cantidades fasoriales de tensión y corriente registrados en los equipos de la subestación para con ellos extraer la secuencia de los eventos.

- Localización de la falla:

El algoritmo de localización se aplica con las cantidades fasoriales estimadas, para obtener la distancia de falla. Este algoritmo considera las posibles incertidumbres asociadas al modelamiento del sistema y a la estimación de fasores. Para ello desarrolla un algoritmo de extensión probabilística y estima un rango de error para el cálculo de la distancia.

- Diagnóstico de la falla:

Usando información adicional relacionada con la coordinación de las protecciones y la carga del sistema, un algoritmo de diagnóstico de fallas se usa para reducir y clasificar los posibles lugares de la falla.

La estrategia analizada en esta sección, está enfocada principalmente al estudio de un método algorítmico de localización de fallas, seguido por su método de extensión probabilístico y las estrategias para el diagnóstico de fallas.

3.2.1 Modelo del sistema de potencia utilizado

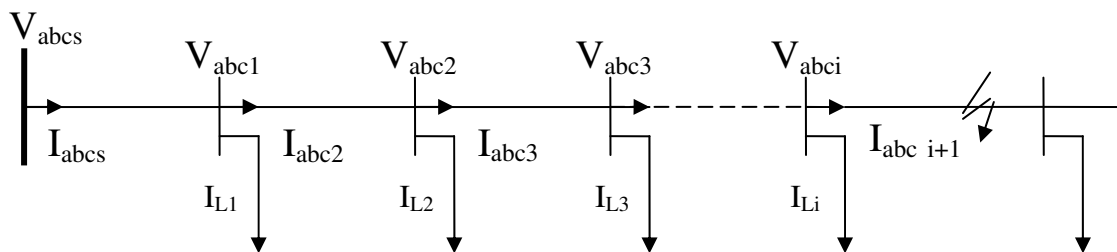


Figura 9. Diagrama de un alimentador de distribución

La figura 9 representa la red de distribución utilizada en el esquema de localización y diagnóstico de fallas que se desarrolla en este método, la red cuenta con múltiples laterales conectados al alimentador principal y algunas cargas monofásicas.

3.2.2 Deducción matemática de la distancia de falla

El algoritmo de localización de la distancia de falla, está basado en una solución iterativa de ecuaciones que describen la condición de estado permanente de la falla.

Para el análisis se considera una falla línea a tierra en la fase A, como se muestra en la figura 10. Se asumen conocidas las tensiones y las corrientes en el extremo de envío.

Considerando los acoples mutuos entre las fases, existe la relación (3.1) para la fase fallada.

$$V_a = D (Z_{aa}I_a + Z_{ab}I_b + Z_{bc}I_c) + I_f R_f \quad (3.1)$$

Donde:

- D es la distancia de falla,
- I_f corriente de falla,
- R_f Resistencia de falla.

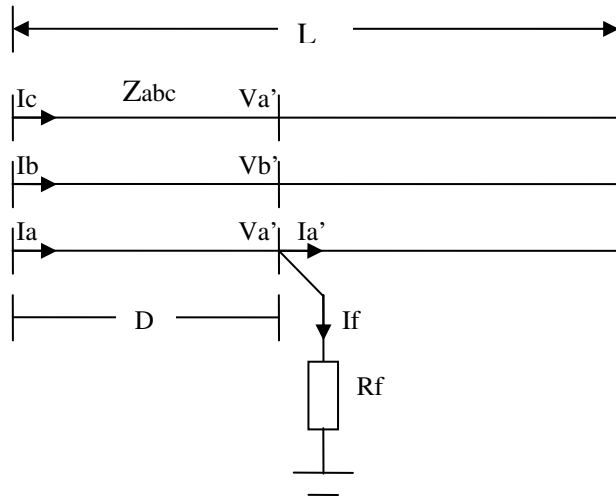


Figura 10. Falla línea a tierra en la fase A.

Para solucionar la distancia de falla D, la ecuación (3.1) se puede separar en su parte real e imaginaria como en (3.4) y (3.8) con A y B definidas en (3.3) y (3.7) respectivamente.

$$V_{ar} = D \{(Z_{aar}I_{ar} - Z_{aai}I_{ai}) + (Z_{abr}I_{br} - Z_{abi}I_{bi}) + (Z_{acr}I_{cr} - Z_{aci}I_{ci})\} + R_f \cdot I_f \quad (3.2)$$

Definiendo:

$$A = Z_{aar}I_{ar} - Z_{aai}I_{ai} + Z_{abr}I_{br} - Z_{abi}I_{bi} + Z_{acr}I_{cr} - Z_{aci}I_{ci} \quad (3.3)$$

La ecuación (3.2) puede ser escrita como:

$$V_{ar} = A \cdot D + R_f \cdot I_f \quad (3.4)$$

Despejando Rf en la ecuación anterior se tiene que:

$$R_f = \frac{V_{ar} - A \cdot D}{I_f} \quad (3.5)$$

Ahora la parte imaginaria de Va es:

$$V_{ai} = D \{(Z_{aar}I_{ai} + Z_{aai}I_{ar}) + (Z_{abr}I_{bi} + Z_{abi}I_{br}) + (Z_{acr}I_{ci} + Z_{aci}I_{cr})\} + R_f \cdot I_f \quad (3.6)$$

Definiendo:

$$B = Z_{aar}I_{ai} + Z_{aai}I_{ar} + Z_{abr}I_{bi} + Z_{abi}I_{br} + Z_{acr}I_{ci} + Z_{aci}I_{cr} \quad (3.7)$$

La ecuación (3.7) se puede escribir:

$$V_{ai} = B \cdot D + R_f \cdot I_f \quad (3.8)$$

Reemplazando Rf de (3.5) en (3.8) se tiene:

$$V_{ai} = B \cdot D + \left(\frac{\text{Var} - A \cdot D}{I_{fr}} \right) \cdot I_{fi} \quad (3.9)$$

Despejando D de la ecuación anterior se tiene que:

$$V_{ai} \cdot I_{fr} = B \cdot D \cdot I_{fr} + \text{Var} \cdot I_{fi} - A \cdot D \cdot I_{fi}$$

$$V_{ai} \cdot I_{fr} - \text{Var} \cdot I_{fi} = D (B \cdot I_{fr} - A \cdot I_{fi})$$

$$D = \frac{V_{ai} \cdot I_{fr} - \text{Var} \cdot I_{fi}}{B \cdot I_{fr} - A \cdot I_{fi}} \quad (3.10)$$

La parte real e imaginaria de If se puede obtener de la relación:

$$I_f = I_a - I_a' \quad (3.11)$$

Donde I_a' es la corriente que llega al extremo remoto de la fase fallada.

Considerando la topología radial de la red de distribución, la corriente en el extremo remoto I_a' solo se puede determinar por las tensiones en el punto de falla y se puede estimar usando un algoritmo de flujo radial donde I_a' está dada por la ecuación (3.12):

$$I_a' = f(V_a', V_b', V_c') \quad (3.12)$$

Las tensiones en el punto de falla V_a', V_b' y V_c' pueden expresarse en términos de la distancia de falla calculada en la ecuación (3.10), las tensiones y las corrientes medidas en la subestación en estado de falla como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} V_a' \\ V_b' \\ V_c' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - D \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

3.2.3 Consideraciones adicionales

El algoritmo de distancia de falla mejora, si se calcula la corriente en el extremo remoto teniendo en cuenta el comportamiento de la carga como una impedancia variable. La ecuación (3.13) simula los diferentes tipos de carga durante condiciones de falla.

$$I = I_r \left| \frac{V}{V_0} \right|^{np-2} + j I_i \left| \frac{V}{V_0} \right|^{nq-2} \quad (3.14)$$

Donde:

V_0 tensión nominal,

I_r e I_i componentes real e imaginaria de la corriente en condiciones nominales,

n_p y n_q coeficientes que reflejan la respuesta dinámica de un tipo particular de cliente.

Como el alimentador de distribución es una red radial con múltiples laterales conectados al alimentador principal, se pueden encontrar varios sitios posibles de falla con las medidas de tensión y corriente disponibles en la subestación. Se deben encontrar entonces todos los posibles lugares de la falla, aplicando el algoritmo de distancia sección por sección en la red.

La búsqueda por la red comienza asumiendo que la sección fallada está conectada directamente a la subestación. De esta manera se calcula la distancia de falla y si ésta es menor que la longitud del segmento de línea analizado, entonces se puede decir que la falla se ha localizado.

Si de alguna manera se confirma que en el segmento considerado no ocurrió la falla, el proceso de búsqueda debe continuar por la línea conectada en el extremo de recibo del segmento anterior y para ello las tensiones y las corrientes de los segmentos conectados a dicho extremo de recibo deben estimarse.

Haciendo un recorrido por la red en una secuencia determinada, se pueden identificar los diferentes lugares posibles de falla como en la figura 11.

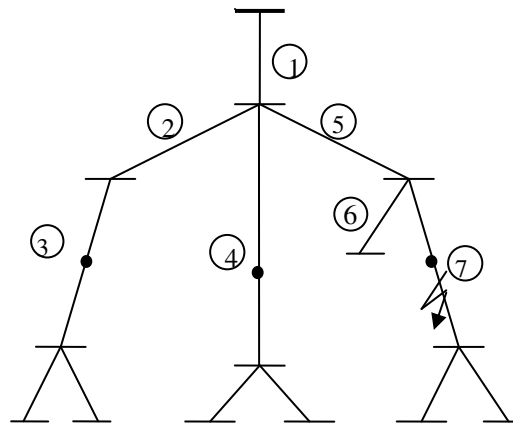


Figura 11. Posibles lugares de falla.

3.2.4 Análisis de ventajas y desventajas

Ventajas

- El método considera el acoplamiento entre líneas.
- Proporciona mayor exactitud en la localización de la falla al considerar una región en vez de un punto, a través de un intervalo de error, dado por la desviación estándar de los valores medios de tensión y corriente.

Desventajas

- El algoritmo de localización de fallas requiere la utilización de un algoritmo adicional que calcula la corriente en el extremo remoto en función de las tensiones de falla.
- Para tener la exactitud deseada con el intervalo de error, requiere de la información de operación de las protecciones; es decir, se debe conocer cuál es el

funcionamiento y los valores de calibración de las protecciones y la revisión de las formas de onda de los mismos.

- Se requiere una completa base de datos de los parámetros de la línea, carga y conectividad de la red.

3.3 MÉTODO MYEON-SONG CHOI, SEUNG-JAE LEE, DUCK-SU LEE Y BO-GUN JIN

El algoritmo de localización de fallas propuesto por los autores [CLLJ04], está basado en el análisis directo del circuito trifásico para el sistema de distribución desbalanceado.

El análisis del método se realiza solucionando las ecuaciones que describen el comportamiento del modelo monofásico equivalente de una red supuesta. Además, se incorpora el lema de la matriz inversa, como un concepto de gran ayuda en la determinación de la ecuación de localización de fallas.

Se señala además la dificultad que existe cuando en la solución del problema de localización se aplica la teoría de las componentes simétricas sobre sistemas desbalanceados. Si el sistema es balanceado no existe tal dificultad.

3.3.1 Modelo del sistema de potencia utilizado

La figura 12 muestra la red de distribución que se utiliza en el desarrollo de la metodología propuesta para la localización de fallas. El sistema es una red trifásica simple, debido a la no transposición de las líneas, la ramificación lateral y la carga.

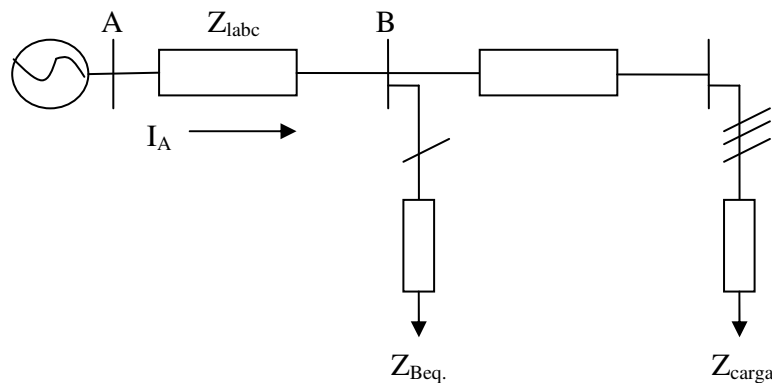


Figura 12. Sistema de distribución trifásico.

3.3.2 Deducción matemática de la distancia de falla

La figura 13 muestra una falla monofásica a tierra en un sistema trifásico general sobre el cual se deduce la distancia de falla.

De la figura 13, la tensión en el extremo de envío está dada por:

$$V_{sabc} = (1-d) Z_{labc} \cdot I_{labc} + V_{fabc} \quad (3.15)$$

Donde:

$V_{sabc} = [V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]$: Vector de tensiones de fase

$I_{sabc} = [I_{sa} \ I_{sb} \ I_{sc}]$: Vector de corrientes de fase

$V_{fabc} = [V_{fa} \ V_{fb} \ V_{fc}]$: Vector de tensiones de fase en el punto de falla

$$Z_{labc} = \begin{bmatrix} Z_{laa} & Z_{lab} & Z_{lac} \\ Z_{lba} & Z_{lbb} & Z_{lbc} \\ Z_{lca} & Z_{lcb} & Z_{lcc} \end{bmatrix} : \text{Matriz de impedancia de la línea AB}$$

I_f = Corriente de falla

$1-d$ = distancia a la cual ocurre la falla, vista desde el extremo de envío.

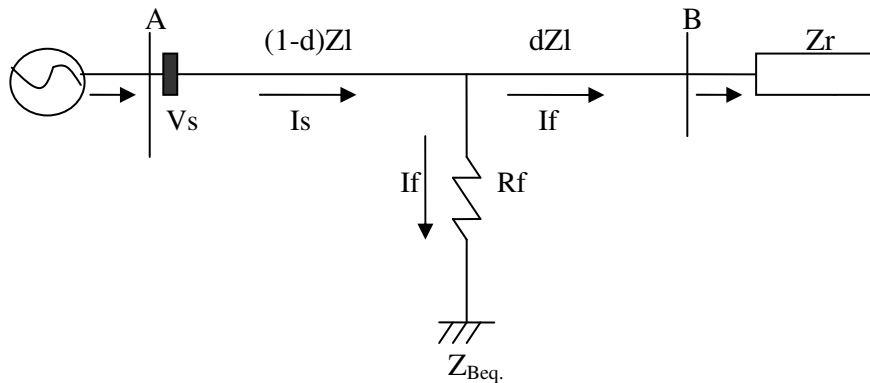


Figura 13. Falla línea-tierra en un sistema trifásico general.

i) Falla monofásica

La tensión de la fase A se puede expresar como sigue:

$$V_{sa} = (1-d) (Z_{laa} \cdot I_{sa} + Z_{lab} \cdot I_{sb} + Z_{lac} \cdot I_{sc}) + I_f \cdot R_f \quad (3.16)$$

Como en el punto de falla, existen dos circuitos en paralelo, entonces uno de los dos circuitos se puede asociar a la falla y el otro con la carga, tal como se muestra en la figura 14.

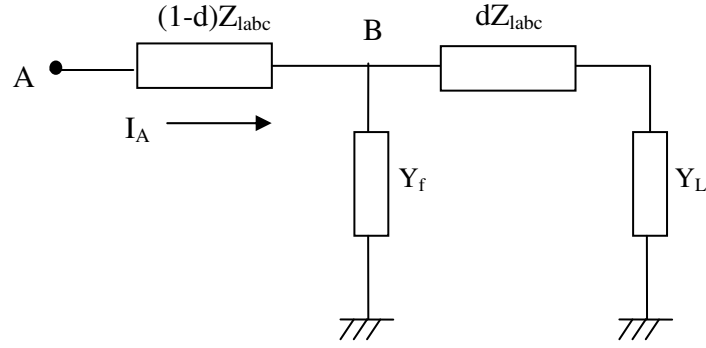


Figura 14. Caminos paralelos en la falla

La admitancia de falla está dada por:

$$Y_f = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

La admitancia de carga se puede obtener tomando el inverso de la impedancia de la conexión serie de la línea y la carga como sigue:

$$Y_L = (d \cdot Z_{labc} + Z_{rabc})^{-1} \quad (3.18)$$

Donde la matriz de impedancia de carga Z_{rabc} es:

$$Z_{rabc} = \begin{bmatrix} Z_{raa} & Z_{rab} & Z_{rac} \\ Z_{rba} & Z_{rbb} & Z_{rbc} \\ Z_{rca} & Z_{rcb} & Z_{rcc} \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Con el valor de la corriente de envío I_s , se puede obtener I_f utilizando la ley de distribución de corriente de un circuito paralelo:

$$I_f = Y_f [Y_f + Y_L]^{-1} \cdot I_s \quad (3.20)$$

$$I_f = Y_f [Y_f + (d \cdot Z_{labc} + Z_{rabc})^{-1}]^{-1} \cdot I_s \quad (3.21)$$

Donde:

$$I_f = [I_f \ 0 \ 0]' \quad (3.22)$$

$$I_s = [I_{sa} \ I_{sb} \ I_{sc}]' \quad (3.23)$$

La solución para la corriente de falla, ecuación (3.21), se puede simplificar aplicando el lema de la matriz inversa que se señala en (3.24):

$$(A^{-1} + DCB)^{-1} = A - AB(C^{-1} + DAB)^{-1}DA \quad (3.24)$$

Definiendo:

$$A \equiv (d \cdot Z_{labc} + Z_{rabc}) = \begin{bmatrix} dZ_{laa} + Z_{raa} & dZ_{lab} + Z_{rab} & dZ_{lac} + Z_{rac} \\ dZ_{lba} + Z_{rba} & dZ_{lbb} + Z_{rbb} & dZ_{lbc} + Z_{rbc} \\ dZ_{lca} + Z_{rca} & dZ_{lcb} + Z_{rcb} & dZ_{lcc} + Z_{rcc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a1 & a2 & a3 \\ a4 & a5 & a6 \\ a7 & a8 & a9 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$$B \equiv \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C \equiv \frac{1}{Rf}, \quad D \equiv [1 \ 0 \ 0] \quad (3.26)$$

Entonces, aplicando el lema de la matriz inversa (3.24):

$$[Yf + (d \cdot Z_{labc} + Z_{rabc})^{-1}J]^{-1} = \begin{bmatrix} a1 & a2 & a3 \\ a4 & a5 & a6 \\ a7 & a8 & a9 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a1 \\ a4 \\ a7 \end{bmatrix} (Rf + a1)^{-1} [a1 \ a2 \ a3] \quad (3.27)$$

Para If en la ecuación (3.22), se requiere la primera fila de la ecuación (3.28):

$$\begin{aligned} [a1 \ a2 \ a3] - \frac{1}{Rf} [a1a1 \ a1a2 \ a1a3] &= \frac{(Rf + a1)[a1 \ a2 \ a3] - a1[a1 \ a2 \ a3]}{Rf + a1} = \\ \frac{Rf[a1 \ a2 \ a3] + a1[a1 \ a2 \ a3] - a1[a1 \ a2 \ a3]}{Rf + a1} &= \frac{Rf[a1 \ a2 \ a3]}{Rf + a1} \end{aligned} \quad (3.28)$$

La corriente de falla, entonces se puede escribir como:

$$\begin{bmatrix} If \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{Rf}{Rf + a1} \begin{bmatrix} a1 & a2 & a3 \\ xx & xx & xx \\ xx & xx & xx \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Isa \\ Isb \\ Isc \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Donde xx, representa algunos elementos que no son necesarios en este desarrollo.

La expresión final para la corriente de falla If es:

$$If = \frac{1}{Rf + d \cdot Z_{laa} + Z_{raa}} * \begin{bmatrix} d \cdot Z_{laa} + Z_{raa} & d \cdot Z_{lab} + Z_{rab} & d \cdot Z_{lac} + Z_{rac} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Isa \\ Isb \\ Isc \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Sustituyendo la ecuación (3.30) en la ecuación (3.16):

$$Vsa = (1-d)(Z_{laa}I_{sa} + Z_{lab}I_{sb} + Z_{lac}I_{sc}) + \frac{Rf[(d \cdot Z_{laa} + Z_{raa})I_{sa} + (d \cdot Z_{lab} + Z_{rab})I_{sb} + (d \cdot Z_{lac} + Z_{rac})I_{sc}]}{Rf + d \cdot Z_{laa} + Z_{raa}} \quad (3.31)$$

Definiendo:

$$C1 = Z_{laa} \cdot I_{sa} + Z_{lab} \cdot I_{sb} + Z_{lac} \cdot I_{sc} \quad (3.32)$$

$$V_{sa} = (1-d)C1 + \frac{Rf[d \cdot Z_{laa} I_{sa} + Z_{raa} I_{sa} + dZ_{lab} I_{sb} + Z_{rab} I_{sb} + d \cdot Z_{lac} I_{sc} + Z_{rac} I_{sc}]}{Rf + d \cdot Z_{laa} + Z_{raa}} \quad (3.33)$$

Definiendo:

$$C2 = Z_{raa} \cdot I_{sa} + Z_{rab} \cdot I_{sb} + Z_{rac} \cdot I_{sc} \quad (3.34)$$

$$V_{sa} = (1-d)C1 + \frac{Rf[d \cdot C1 + C2]}{Rf + d \cdot Z_{laa} + Z_{raa}} \quad (3.35)$$

$$[V_{sa} - (1-d)C1][Rf + d \cdot Z_{laa} + Z_{raa}] - Rf(d \cdot C1 + C2) = 0 \quad (3.36)$$

Reorganizando:

$$V_{sa} (Rf + d \cdot Z_{laa} + Z_{raa}) - (1-d) \cdot C1 \cdot (Rf + d \cdot Z_{laa} + Z_{raa}) - Rf \cdot d \cdot C1 - Rf \cdot C2 = 0$$

$$V_{sa} \cdot Rf + d \cdot Z_{laa} \cdot V_{sa} + Z_{raa} \cdot V_{sa} - Rf \cdot C1 - d \cdot Z_{laa} \cdot C1 - Z_{raa} \cdot C1 + d \cdot C1 \cdot Rf + d^2 \cdot C1 \cdot Z_{laa} + d \cdot C1 \cdot Z_{raa} - Rf \cdot d \cdot C1 - Rf \cdot C2 = 0$$

$$\frac{d^2(C1 \cdot Z_{laa}) + d(V_{sa} \cdot Z_{laa} - C1 \cdot Z_{laa} + C1 \cdot Z_{raa}) + Z_{raa}(V_{sa} - C1) + Rf(V_{sa} - C1 - C2)}{0} = 0 \quad (3.37)$$

Definiendo:

$$ar + jai = C1 \cdot Z_{laa}$$

$$br + jbi = V_{sa} \cdot Z_{laa} - C1 \cdot Z_{laa} + C1 \cdot Z_{raa} \quad (3.38)$$

$$cr + jci = V_{sa} - C1$$

$$dr + jdi = V_{sa} - C1 - C2.$$

Reemplazando (3.34) en (3.37) se tiene:

$$d^2(ar + jai) + d(br + jbi) + (cr + jci) + Rf(dr + jdi) = 0 \quad (3.39)$$

De la parte imaginaria de (3.39) se tiene:

$$d^2 \cdot ai + d \cdot bi + ci + Rf \cdot di = 0 \quad (3.40)$$

Despejando Rf en la ecuación anterior:

$$Rf = -\frac{d^2 ai + dbi + ci}{di} \quad (3.41)$$

De la parte real de (3.39) se tiene:

$$d^2 ar + d br + cr + Rf dr = 0 \quad (3.42)$$

Reemplazando Rf de la ecuación (3.41) en (3.42) se tiene:

$$d^2 ar + d br + cr - \frac{dr}{di} (d^2 ai + d bi + ci) = 0 \quad (3.43)$$

Reorganizando:

$$d^2 \left(ar - \frac{dr}{di} ai \right) + d \left(br - \frac{dr}{di} bi \right) + cr - \frac{dr}{di} ci = 0 \quad (3.44)$$

Para obtener el valor de la distancia 1-d se soluciona la ecuación anterior.

3.3.3 Análisis de ventajas y desventajas

Ventajas

- El costo computacional del método frente a otros es bajo, debido que no es iterativo.

Desventajas

- El método no considera la variabilidad de la admitancia de carga con la tensión.
- En el modelo que se utiliza para deducir la distancia de falla, no se considera que pueden existir cargas entre la subestación y el sitio de falla.
- Al considerar el análisis directo, se deben conocer completamente todos los parámetros del circuito.
- Hasta al momento, por la complejidad del método, no se ha hecho una expansión del análisis de localización en el caso de falla en varias fases.

3.4 MÉTODO DE DAMIR NOVOSEL, DAVID KART, YI HU Y JORMA MYLLYMAKI

El método algorítmico para localización de fallas y estimación de la resistencia de falla propuesto por estos investigadores [NHHM98], considera los efectos de la resistencia de falla y de la corriente de carga de la red de distribución. Se desarrollan dos modelos que hacen uso de los principios del método de la reactancia.

Con los datos de tensión y corriente en condiciones de prefalla, medidos en la subestación, se determinan las impedancias de la fuente y de la carga, las cuales son parte fundamental en el desarrollo de los modelos propuestos. El primer modelo utiliza una iteración sencilla de aproximación y el segundo utiliza cálculos más complejos pero que no requieren iteración. Los valores de impedancia de la fuente y de la carga se utilizan en ambos modelos

3.4.1 Modelo del sistema de potencia real

La figura 15 representa una sección de la red de distribución cuando ocurre una falla y se muestra la presencia de derivaciones a lo largo del alimentador, los cuales se concentran en una impedancia equivalente llamada Z_{deriv} .

El sistema que se presenta en la figura 15, puede describirse a través de:

$$V_{sf} = p \cdot Z_{L1} + n \cdot Z_{L1} I'_{sf} + R_f \cdot I_f \quad (3.45)$$

Donde:

$$I'_{sf} = I_{sf} - I_{deriv} \quad (3.46)$$

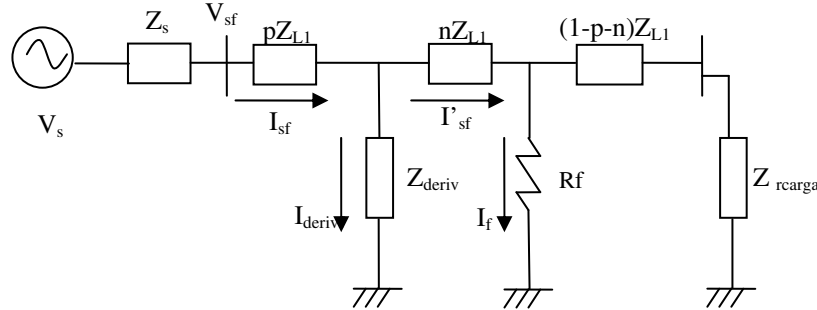


Figura 15. Esquema de la red de distribución.

La impedancia aparente Z_{med} está dada por:

$$Z_{med} = \left(\frac{V_{sf}}{I_{sf}} \right) = pZ_{L1} + nZ_{L1} \left(\frac{I'_{sf}}{I_{sf}} \right) + R_f \left(\frac{I_f}{I_{sf}} \right) \quad (3.47)$$

$$Z_{med} = \left(\frac{V_{sf}}{I_{sf}} \right) = Z_{L1} \left[p + n \left(\frac{I'_{sf}}{I_{sf}} \right) \right] + R_f \left(\frac{I_f}{I_{sf}} \right) \quad (3.48)$$

Reemplazando (3.47) en (3.48) se tiene que:

$$Z_{med} = \left(\frac{V_{sf}}{I_{sf}} \right) = Z_{L1} \left[p + n \left(\frac{I_{sf} - I_{deriv}}{I_{sf}} \right) \right] + R_f \left(\frac{I_f}{I_{sf}} \right) \quad (3.49)$$

El evaluar la corriente de derivación después de ocurrida una falla I_{deriv} , crea dificultades en la estimación de la resistencia y la localización de la falla en la red de distribución.

3.4.2 Modelo del sistema de potencia utilizado

La figura 16 representa el modelo de la sección del sistema de distribución fallado que se utiliza en el desarrollo del algoritmo de localización de fallas, en el sistema, las cargas Z_{deriv} se concentran con la impedancia de carga Z_{carga} .

Donde:

V_s	tensión en la fuente
Z_s	impedancia de la fuente
Z_{L1}	impedancia de secuencia positiva de la línea y se determina del estado de prefalla
R_f	impedancia de la falla
Z_{carga}	impedancia de la carga
V_{sf}	tensión aplicada por la fuente a la sección de línea después de la falla
V_{cargaf}	tensión en la carga después de la falla
m	distancia a la cual ocurre la falla

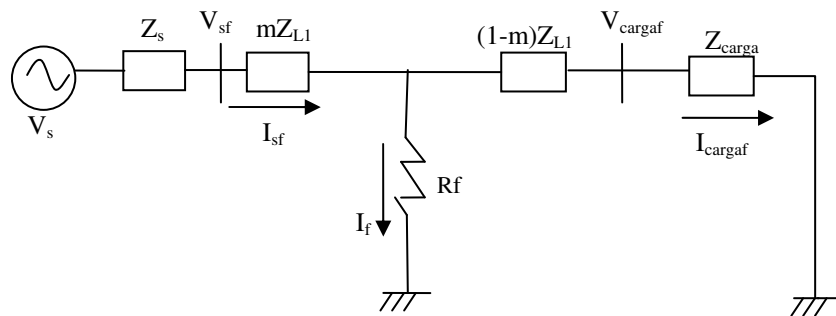


Figura 16. Esquema de la sección fallada, Zderiv se concentra con Zcarga

3.4.3 Consideraciones generales del método propuesto

Con el fin de corregir las inexactitudes mencionadas anteriormente que el método de la reactancia proporciona, los autores proponen el método algorítmico que se presenta en la siguiente sección, basado en el siguiente modelo:

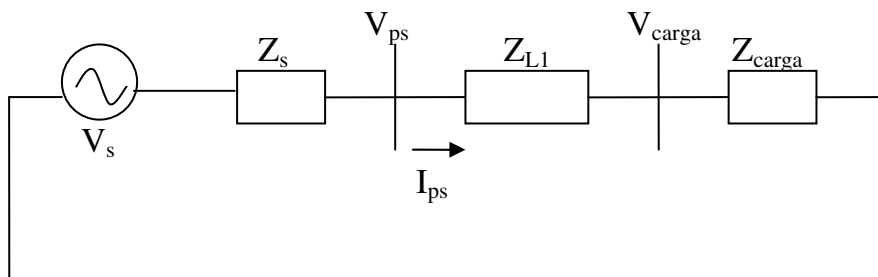


Figura 17. Sistema en condiciones de prefalla.

La impedancia de carga Z_{carga} y la impedancia de la fuente Z_s se calculan haciendo uso de las medidas conocidas de prefalla.

De la figura 17 se tiene que:

$$Z_{\text{carga}} = \frac{V_{\text{ps}}}{I_{\text{ps}}} - Z_{L1} \quad (3.50)$$

La impedancia de carga definida en la ecuación anterior, para la representación monofásica de la red, incorpora todas las cargas entre la subestación y la falla y las cargas que se encuentran más allá del punto de falla. Las técnicas se pueden aplicar a sistemas multifásicos y la impedancia de carga Z_{carga} se puede calcular usando valores de prefalla de la secuencia positiva como sigue:

$$Z_{\text{carga}} = \frac{V_{\text{ps1}}}{I_{\text{ps1}}} - Z_{L1} \quad (3.51)$$

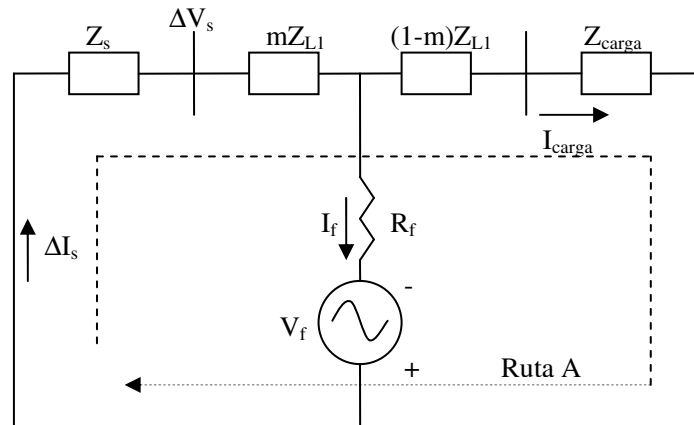


Figura 18. Circuito con los cambios del sistema de la figura 14 superpuesto sobre las condiciones de prefalla descrito en la figura 15.

La figura 18 representa el sistema superpuesto donde la impedancia de la fuente está dada por:

$$Z_s = -\frac{\Delta V_s}{\Delta I_s} \quad (3.52)$$

$$\Delta V_s = V_{\text{sf}} - V_{\text{ps}} \quad (3.53)$$

$$\Delta I_s = I_{\text{sf}} - I_{\text{ps}} \quad (3.54)$$

En las ecuaciones (3.53) y (3.54) se usan los valores de secuencia positiva de la tensión y la corriente. En redes desbalanceadas se pueden usar los valores de secuencia negativa, con el fin de reducir problemas de sensibilidad para el caso único en el que exista diferencia entre los valores de prefalla y falla en la secuencia positiva.

El sistema propuesto estima la localización de la falla usando los valores calculados en las ecuaciones (3.50) y (3.52) mediante un método iterativo o un método directo.

La corriente de prefalla de la fuente I_{ps} es igual a la corriente de la carga I_{carga} , por lo tanto:

$$\Delta I_s = I_{sf} - I_{carga} \quad (3.55)$$

De la figura 18, los cambios causados en la corriente de la fuente $\Delta I_s = ds * I_f$, donde ds es el factor de distribución de corriente que describe el cambio de la corriente de la fuente ΔI_s y la corriente de carga de posfalla por medio de la ecuación (3.56).

$$ds = \frac{\Delta I_s}{I_f} \quad (3.56)$$

Reemplazando (3.56) en la ecuación (3.49) se tiene que:

$$Z_{med} = \frac{V_{sf}}{I_{sf}} = mZ_{L1} + Rf \left(\frac{I_s / ds}{I_{sf}} \right) \quad (3.57)$$

$$Z_{med} = mZ_{L1} + Rf \left(\frac{1}{ds} \right) \left(\frac{1}{\frac{I_{sf}}{I_s}} \right) \quad (3.58)$$

Se define:

$$ns = \frac{I_{sf}}{\Delta I_s} = |ns| \angle \gamma_s \quad (3.59)$$

$$Z_{med} = mZ_{L1} + Rf \left(\frac{1}{ds} \right) \left(\frac{1}{ns} \right) \quad (3.60)$$

Los autores proponen dos métodos para deducir la distancia de falla: el método iterativo y el método directo. Estos se basan en la solución de la ecuación (3.60). Los métodos tratan de corregir los problemas del método de la reactancia, ya que este no toma en cuenta valores necesarios para la exactitud del modelo tales como la corriente de falla I_f , la corriente de derivación de posfalla I_{derivf_r} y la resistencia de falla R_f .

En la siguiente sección se explicará la solución por el método iterativo.

3.4.4 Dedución matemática de la distancia de falla

Método Iterativo

De la figura 18 se puede determinar la ecuación para el cambio de tensión en la fuente aplicando la segunda ley de Kirchhoff a la ruta A. como sigue:

$$\Delta V_s = mZ_{L1} \cdot \Delta I_s + I_{carga} \left((1-m)Z_{L1} + Z_{carga} \right) \quad (3.61)$$

$$\Delta V_s = mZ_{L1} \cdot \Delta I_s + (\Delta I_s - I_f)(Z_{L1} - mZ_{L1} + Z_{carga}) \quad (3.62)$$

Reemplazando (3.52) en (3.62) y reorganizando se tiene que:

$$-Z_s \cdot \Delta I_s = \Delta I_s (Z_{L1} + Z_{carga}) + I_f (mZ_{L1} - Z_{L1} - Z_{carga}) \quad (3.63)$$

$$\Delta I_s (Z_{L1} + Z_{carga} + Z_s) = I_f (Z_{L1} + Z_{carga} - mZ_{L1}) \quad (3.64)$$

Ahora, ds se puede expresar como:

$$ds = \frac{\Delta I_s}{I_f} = \frac{Z_{L1}(1-m) + Z_{carga}}{Z_{L1} + Z_{carga} + Z_s} = |ds| \angle \beta_s \quad (3.65)$$

Donde ΔI_s se define por:

$$\Delta I_s = |\Delta I_s| \angle \lambda_s \quad (3.66)$$

λ_s es el ángulo de desfase entre I_{sf} e I_{ps} .

Reemplazando (3.65) en (3.60):

$$V_{sf} = mZ_{L1} I_{sf} + R_f \left(\frac{1}{ds} \right) \left(\frac{1}{ns} \right) \quad (3.67)$$

$$V_{sf} = mZ_{L1} I_{sf} + R_f \left(\frac{1}{|ds| \angle \beta_s} \right) (\Delta I_s) \quad (3.68)$$

$$V_{sf} = mZ_{L1} I_{sf} + R_f \left(\frac{|\Delta I_s| \angle \lambda_s}{|ds| \angle \beta_s} \right) \quad (3.69)$$

$$V_{sf} = mZ_{L1} I_{sf} + R_f \frac{|\Delta I_s|}{|ds|} \angle \lambda_s - \beta_s \quad (3.70)$$

Definiendo:

$$D = R_f \frac{|\Delta I_s|}{|ds|} \quad (3.71)$$

$$\Phi = e^{j\phi}; \phi = (\lambda_s - \beta_s) \quad (3.72)$$

La ecuación (3.70) puede escribirse como:

$$V_{sf} = mZ_{L1}I_{sf} + D^* \Phi \quad (3.73)$$

La ecuación (3.73) se separa en su parte real e imaginaria para solucionar dos ecuaciones donde las incógnitas son D y m. Se tienen entonces las ecuaciones (3.74) y (3.75):

$$\text{Re}(V_{sf}) = m[R_{L1} \text{Re}(I_{sf}) - X_{L1} \text{Im}(I_{sf})] + D \cdot \text{Re}(\Phi) \quad (3.74)$$

$$\text{Im}(V_{sf}) = m[R_{L1} \text{Im}(I_{sf}) + X_{L1} \text{Re}(I_{sf})] + D \cdot \text{Im}(\Phi) \quad (3.75)$$

De la ecuación (3.75) se despeja D:

$$D = \frac{\text{Im}(V_{sf}) - m(R_{L1} \text{Im}(I_{sf}) + X_{L1} \text{Re}(I_{sf}))}{\text{Im}(\Phi)} \quad (3.76)$$

Reemplazando (3.76) en (3.74), se tiene:

$$\text{Re}(V_{sf}) = m[R_{L1} \text{Re}(I_{sf}) - X_{L1} \text{Im}(I_{sf})] + \frac{\text{Im}(V_{sf}) - m(R_{L1} \text{Im}(I_{sf}) + X_{L1} \text{Re}(I_{sf}))}{\text{Im}(\Phi)} \cdot \text{Re}(\Phi) \quad (3.77)$$

$$\text{Re}(V_{sf})\text{Im}(\Phi) = m[R_{L1} \text{Re}(I_{sf})\text{Im}(\Phi) - X_{L1} \text{Im}(I_{sf})\text{Im}(\Phi) - R_{L1} \text{Im}(I_{sf}) \cdot \text{Re}(\Phi) - X_{L1} \text{Re}(I_{sf})\text{Re}(\Phi)] + \text{Im}(V_{sf})\text{Re}(\Phi) \quad (3.78)$$

$$m = \frac{\text{Re}(V_{sf})\text{Im}(\Phi) - \text{Im}(V_{sf})\text{Re}(\Phi)}{R_{L1} [\text{Re}(I_{sf})\text{Im}(\Phi) - \text{Im}(I_{sf})\text{Re}(\Phi)] - X_{L1} [\text{Im}(I_{sf})\text{Im}(\Phi) + \text{Re}(I_{sf})\text{Re}(\Phi)]} \quad (3.79)$$

Definiendo:

$$M = \text{Re}(I_{sf})\text{Im}(\Phi) - \text{Im}(I_{sf})\text{Re}(\Phi) \quad (3.80)$$

$$N = \text{Im}(I_{sf})\text{Im}(\Phi) + \text{Re}(I_{sf})\text{Re}(\Phi) \quad (3.81)$$

La ecuación (3.79) puede escribirse:

$$m = \frac{\text{Re}(V_{sf})\text{Im}(\Phi) - \text{Im}(I_{sf})\text{Re}(\Phi)}{R_{L1} \cdot M - X_{L1} \cdot N} \quad (3.82)$$

Donde:

R_{L1} es la componente real de Z_{L1}

X_{L1} es la componente imaginaria de Z_{L1}

Una vez calculada la distancia de falla m, la resistencia de falla se calcula de la ecuación (3.70) como sigue:

$$V_{sf} = mZ_{L1}I_{sf} + R_f \frac{(\Delta I_s)}{(ds)}$$

$$\text{Re}(V_{sf}) = mZ_{L1} \text{Re}(I_{sf}) + R_f \text{Re}\left(\frac{\Delta I_s}{ds}\right) \quad (3.83)$$

$$R_f = \frac{\text{Re}(V_{sf}) - mZ_{L1} \text{Re}(I_{sf})}{\text{Re}\left(\frac{\Delta I_s}{ds}\right)} \quad (3.84)$$

3.4.5 Análisis de ventajas y desventajas

Ventajas

- Mejora la exactitud que brinda el método de la reactancia, al considerar la resistencia de falla, corrientes de carga.
- Se presenta un método de análisis sencillo para determinar el tipo de falla, basado en las medidas de prefalla y falla de tensiones y corrientes en la subestación.
- En el desarrollo del algoritmo se considera el filtro de secuencia positiva para la impedancia de la línea Z_{L1} .

Desventajas

- La impedancia de carga se considera constante, ésta no varía según los cambios presentados en el nodo debido a la caída de tensión cuando ocurre la falla. La impedancia de carga se calcula con los valores de tensión y corriente de prefalla.
- Inicialmente se menciona que se consideran las cargas que se encuentran entre la subestación y la falla, pero en el desarrollo del algoritmo éstas se desprecian.
- No soluciona el problema de la múltiple estimación.

3.5 MÉTODO DE SAHA

El método algorítmico para localización de fallas propuesto por Saha [SR02], utiliza las medidas de tensión y corriente a frecuencia fundamental en un terminal de la línea antes y durante la falla. Se estima una distancia a la falla, basado en la topología de la red, secciones de los cables, laterales y cargas a lo largo del alimentador.

La base del método es la comparación de dos impedancias. La impedancia del lazo de falla Z_{1f} utilizando los valores de tensiones y corrientes medidos en estado estable y la impedancia a lo largo del alimentador Z_{1k}^f que se calcula considerando la falla en cada sección de manera sucesiva.

3.5.1 Modelo del sistema de potencia utilizado

La figura 19 representa un esquema equivalente del lazo de falla visto desde la subestación, para éste esquema se cumple que la impedancia de secuencia positiva Z_{1k}^f en estado de prefalla vista desde la subestación para cada nodo es:

$$Z_{1k}^f = (1-m)Z_{1k}^f + \frac{mZ_{1k}^{f1}Z_{1k}^{f2}}{mZ_{1k}^{f1} + Z_{1k}^{f2}} \quad (3.85)$$

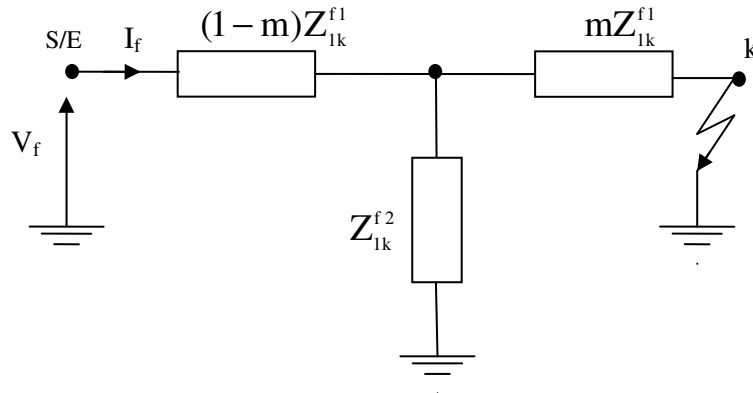


Figura 19. Esquema del alimentador principal en condición de falla.

3.5.2 Deducción matemática de la distancia de falla

El algoritmo que se desarrolla para localización de fallas en sistemas de distribución, depende del tipo de falla: fase-fase ó fase-tierra. En esta sección se presenta el análisis de la falla fase-fase.

Falla fase-fase (a-b, a-c, b-c)

La impedancia de secuencia positiva del lazo de falla vista desde la subestación para una falla fase-fase se puede obtener de las medidas adecuadas de tensión y corriente como sigue:

$$Z_{1f} = \frac{V_{pp}}{I_{pp}} \quad (3.86)$$

Donde:

V_{pp} es la tensión entre fases,
 I_{pp} es la corriente entre fases.

Las figuras 20 y 21 representan el sistema equivalente para el lazo de falla fase-fase desde la subestación al punto de falla y más allá de la falla respectivamente.

La representación de la impedancia Z_{1k}^f de la figura 19 permite incluir la resistencia de falla en el lazo de falla como se muestra en la figura 20.

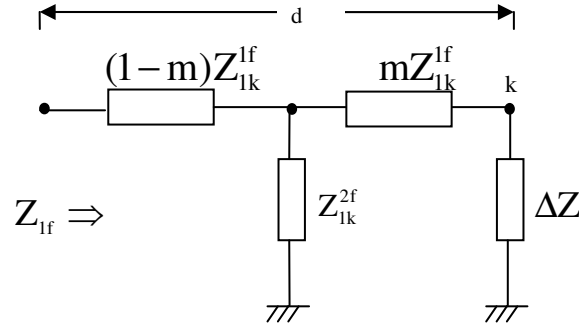


Figura 20. Esquema equivalente para falla bifásica desde la subestación al punto de falla.

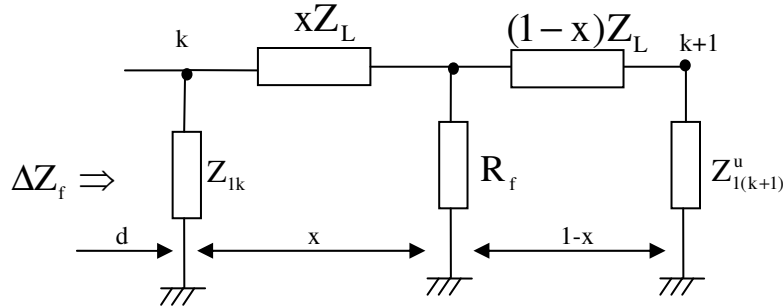


Figura 21. Esquema equivalente para falla bifásica más allá del punto de falla.

La impedancia residual ΔZ_f representa entonces, la impedancia equivalente en el lazo de falla debida a la resistencia de falla, si la falla ocurre en el nodo k o más allá de éste.

De la figura 20, la impedancia del lazo de falla Z_{1f} medida en la subestación, se puede expresar como:

$$Z_{1f} = (1-m)Z_{1k}^f + \frac{(mZ_{1k}^{f1} + \Delta Z_f) \cdot Z_{1k}^{f2}}{mZ_{1k}^{f1} + \Delta Z_f + Z_{1k}^{f2}} \quad (3.87)$$

Despejando la impedancia residual ΔZ_f de la ecuación anterior, se tiene que:

$$\Delta Z_f = \frac{(Z_{1k}^{f1} - Z_{1f})(mZ_{1k}^{f1} + Z_{1k}^{f2}) - (mZ_{1k}^{f1})^2}{mZ_{1k}^{f1} - Z_{1k}^{f2} - (Z_{1k}^{f1} - Z_{1f})} \quad (3.88)$$

De la figura 21, la impedancia equivalente ΔZ_f del nodo k al lugar de la falla puede determinarse por:

$$\Delta Z_f = \frac{Z_{1k} \left(xZ_L + \frac{R_f((1-x)Z_L + Z_{1(k+1)}^u)}{R_f + (1-x)Z_L + Z_{1(k+1)}^u} \right)}{Z_{1k} + xZ_L + \frac{R_f((1-x)Z_L + Z_{1(k+1)}^u)}{R_f + (1-x)Z_L + Z_{1(k+1)}^u}} \quad (3.89)$$

Igualando las ecuaciones (3.88) y (3.89), se puede determinar el valor de la resistencia de falla R_f :

$$R_f = x^2 \frac{Z_L^2 (\Delta Z_f - Z_{1k})}{M} - x Z_L - \frac{\Delta Z_f Z_{1k} (Z_L + Z_{1(k+1)}^u)}{M} \quad (3.90)$$

Donde:

$$M = (\Delta Z_f - Z_{1k})(Z_L + Z_{1(k+1)}^u) - \Delta Z_f Z_{1k}. \quad (3.91)$$

El valor de x puede obtenerse de (3.90) bajo la condición que la resistencia de falla es real, por lo tanto:

$$x^2 \operatorname{Im}\left(\frac{Z_L^2 (\Delta Z_f - Z_{1k})}{M}\right) - x \operatorname{Im}(Z_L) - \operatorname{Im}\left(\frac{\Delta Z_f Z_{1k} (Z_L + Z_{1(k+1)}^u)}{M}\right) = 0 \quad (3.92)$$

La ecuación cuadrática anterior tiene las soluciones:

$$x_1 = \frac{\operatorname{Im}(Z_L) + \sqrt{p}}{2 \operatorname{Im}\left(\frac{Z_L^2 (\Delta Z_f - Z_{1k})}{M}\right)}, \quad x_2 = \frac{\operatorname{Im}(Z_L) - \sqrt{p}}{2 \operatorname{Im}\left(\frac{Z_L^2 (\Delta Z_f - Z_{1k})}{M}\right)}, \quad (3.93)$$

Donde:

$$p = \operatorname{Im}^2(Z_L) + 4 \operatorname{Im}\left(\frac{Z_L^2 (\Delta Z_f - Z_{1k})}{M}\right) \operatorname{Im}\left(\frac{\Delta Z_f Z_{1k} (Z_L + Z_{1(k+1)}^u)}{M}\right). \quad (3.94)$$

La distancia x finalmente se determina por:

$$x = \frac{\operatorname{Im}(Z_L) - \sqrt{p}}{2 \operatorname{Im}\left(\frac{Z_L^2 (\Delta Z_f - Z_{1k})}{M}\right)} \quad (3.95)$$

3.5.3 Análisis de ventajas y desventajas

Ventajas

- Realiza una estimación del posible lugar de falla y después trata de encontrar el punto exacto de la misma.
- En el método propuesto se consideran cargas intermedias.
- En el desarrollo del algoritmo se considera el filtro de secuencia positiva para la impedancia de la línea Z_{L1} .

Desventajas

- Se requiere una completa base de datos de los parámetros de la línea, carga y conectividad de la red.

- El método no considera la variabilidad de la admitancia de carga con la tensión.

3.6 MÉTODO DE R.K AGGARWAL, Y. ASLAN Y A.T. JOHNS

El método de las componentes superimpuestas propuesto por Aggarwal, Aslan y Johns [AAJ97], se basa en la diferencia entre las medidas de estado estable y las medidas de falla de la tensión y la corriente en un extremo de la línea. El algoritmo se desarrolla de modo iterativo. Primero se asume que la falla ocurre a una distancia β de la subestación y ésta varía sistemáticamente bajo ciertas consideraciones hasta que el punto actual de la falla se encuentra.

Inicialmente, el método de localización de fallas se desarrolla para líneas de transmisión, pero se hace extensivo para líneas de distribución, cuando se considera la presencia de cargas monofásicas y trifásicas a lo largo del alimentador. El análisis para determinar la distancia es hecho para falla monofásica.

3.6.1 Modelo del sistema de potencia utilizado

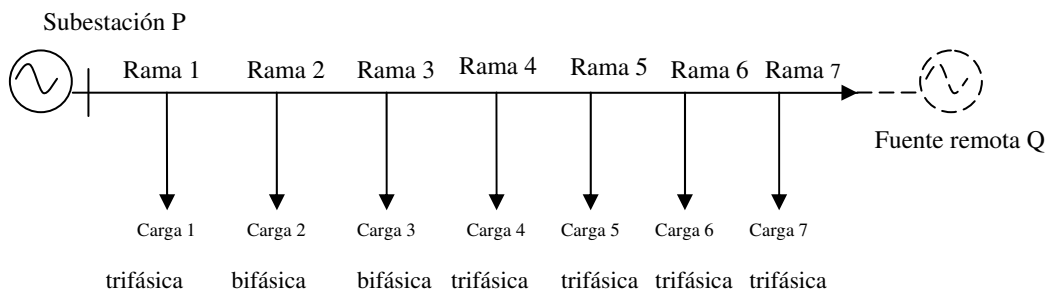


Figura 22. Modelo de un alimentador radial con múltiples cargas.

La figura 22 es la representación de un alimentador radial con múltiples cargas a lo largo de éste, el cual como en la mayoría de los sistemas de distribución, tiene el extremo remoto abierto, pero sin desestimar la probable presencia de una subestación al final de la línea.

3.6.2 Dedución matemática de la distancia de falla

La figura 23, representa un alimentador sencillo sin derivaciones, sobre el cual se desarrolla el algoritmo de localización de fallas.

Asumiendo el modelo de parámetros concentrados de la línea, la tensión V_f en el punto de falla se puede relacionar con las tensiones medidas en la subestación de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} V_{fa}(\beta) \\ V_{fb}(\beta) \\ V_{fc}(\beta) \end{bmatrix} = \beta \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{Sa} \\ I_{Sb} \\ I_{Sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{Sa} \\ V_{Sb} \\ V_{Sc} \end{bmatrix} \quad (3.96)$$

Donde:

β distancia desde la subestación al punto de falla asumido.

Z_s, Z_m impedancia propia y mutua de la línea por unidad de longitud,

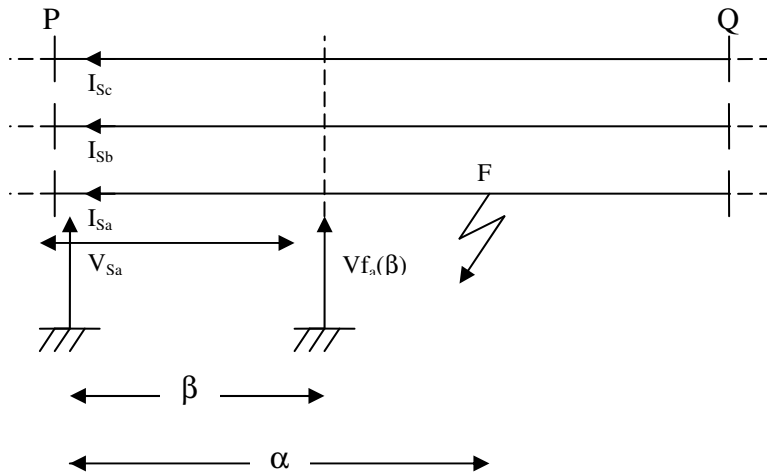


Figura 23. Modelo simplificado de un alimentador en condición de falla.

La tensión superimpuesta en el punto de falla asumido se puede expresar como:

$$[V'_{fa,b,c}] = [V_{fa,b,c}(\beta)_{falla} - V_{fa,b,c}(\beta)_{prefalla}] \quad (3.97)$$

La tensión de prefalla en β se determina por:

$$[V_{fa,b,c}(\beta)_{prefalla}] = [Z_{\beta}] [I_{Sa,b,c}(\beta)_{prefalla}] + [V_{Sa,b,c}(\beta)_{prefalla}] \quad (3.98)$$

Las tensiones y las corrientes superimpuestas en el extremo de medida P están dados por:

$$[V'_{Sa,b,c}] = [V_{Sa,b,cfalla} - V_{Sa,b,cprefalla}] \quad (3.99)$$

$$[I'_{Sa,b,c}] = [I_{Sa,b,cfalla} - I_{Sa,b,cprefalla}] \quad (3.100)$$

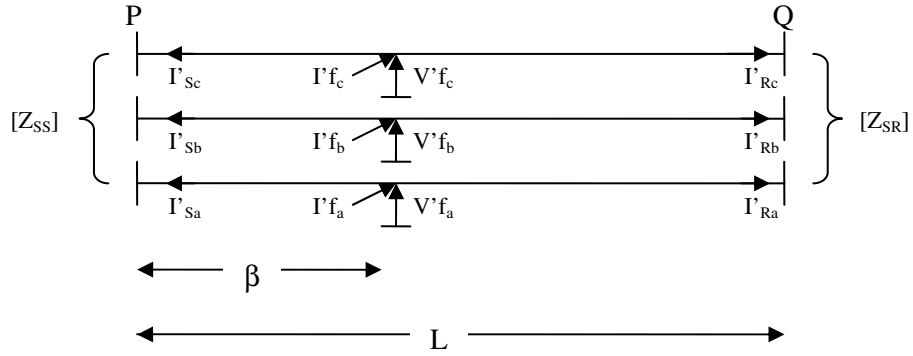


Figura 24. Circuito de componentes superimpuestas.

La figura 24, muestra el modelo del sistema superimpuesto, donde se observa que las corrientes superimpuestas en el extremo remoto Q están dadas como:

$$\begin{bmatrix} I'_{Ra} \\ I'_{Rb} \\ I'_{Rc} \end{bmatrix} = \left[(L - \beta) \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} + [Z_{SR}] \right]^{-1} \begin{bmatrix} V'_{fa} \\ V'_{fb} \\ V'_{fc} \end{bmatrix} \quad (3.101)$$

Donde:

L longitud total de la línea

$[Z_{SR}]$ Matriz que representa la fuente en el extremo remoto Q.

Se tiene también que:

$$[I'_{f_{a,b,c}}] = [I'_{S_{a,b,c}}] + [I'_{R_{a,b,c}}] \quad (3.102)$$

En la técnica de localización de falla, se asume un lugar de falla β que varía iterativamente, con el fin de deducir el punto en la línea en el que se tiene un valor mínimo de las corrientes I'_{f} en las fases no falladas.

3.6.3 Representación de las cargas

En el proceso de localización de fallas, cuando el alimentador tiene múltiples cargas, se debe considerar la mezcla de cargas monofásicas y trifásicas al final del transformador.

Carga Monofásica

La impedancia de la carga referida al primario del transformador está dada por:

$$Z_{LN} = [|V_L|^2 / M] \angle \cos^{-1} f_p \quad (3.103)$$

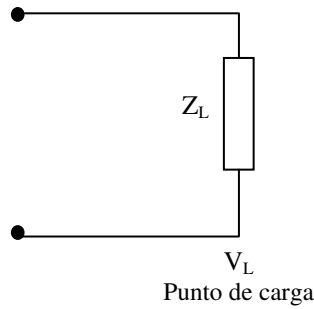


Figura 25. Representación carga monofásica en la derivación.

Donde:

- fp factor de potencia [0.8-0.95],
- V_L tensión en el punto de carga,
- M relación nominal del transformador,
- N nodo donde se calcula la impedancia.

Carga Trifásica

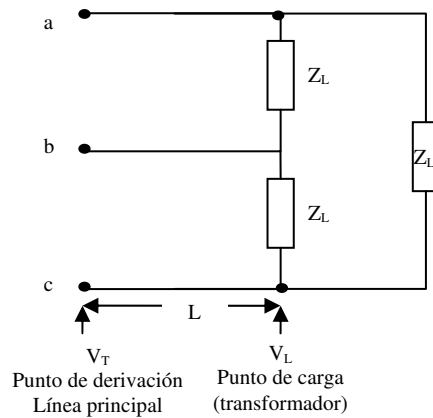


Figura 26. Representación carga trifásica en la derivación.

La impedancia de la carga conectada en Δ referida al primario del transformador está dada por:

$$Z_{LN} = 3 \left[\frac{V_L^2}{M} \right] \angle \cos^{-1} fp \tag{3.104}$$

3.6.4 Matriz de admitancia

Como es necesario determinar la impedancia en cada lugar donde se asume el punto de falla, se hace necesario determinar la admitancia equivalente asociada con una carga particular, para ello se hace uso de la figura 27. donde se representa un ramal que termina en una impedancia de carga derivada de la matriz $[Y_L]$,

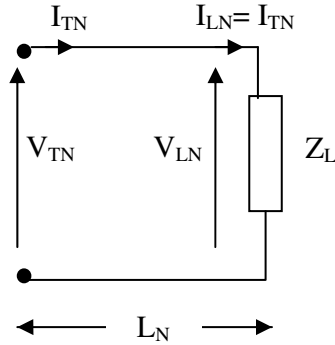


Figura 27. Circuito general de la carga en la derivación.

De la figura anterior, se observa que:

$$V_{TN} = I_N Z I_{LN} + V_{LN} \quad (3.105)$$

$$I_{LN} = I_{TN} = Y_{LN} V_{LN} \quad (3.106)$$

Donde:

$$Y_{LN} = [Z_{LN}]^{-1} \quad (3.107)$$

Reemplazando (3.107) en (3.105) se tiene que:

$$V_{TN} = [U + I_N Z Y_{LN}] V_{LN} \quad (3.108)$$

Donde:

I_N longitud desde la derivación N a la carga L_N

Z matriz de impedancia por unidad de longitud

Z_{LN} matriz impedancia de la carga L_N .

Despejando V_{LN} en la ecuación (3.108):

$$V_{LN} = [U + I_N Z Y_{LN}]^{-1} V_{TN} \quad (3.109)$$

Sustituyendo (3.109) en la ecuación (3.106):

$$I_{LN} = I_{TN} V_{TN} = [Y_{LN}] [U + I_N Z Y_{LN}]^{-1} V_{TN} = [Y_{EN}] V_{TN} \quad (3.110)$$

Donde Y_{EN} es la admitancia equivalente vista desde la derivación N hasta el final de L_N .

En el sistema de la figura 28, es de interés determinar las admitancias $[Y_{ES}]$ y $[Y_{ER}]$ en el punto de falla considerado.

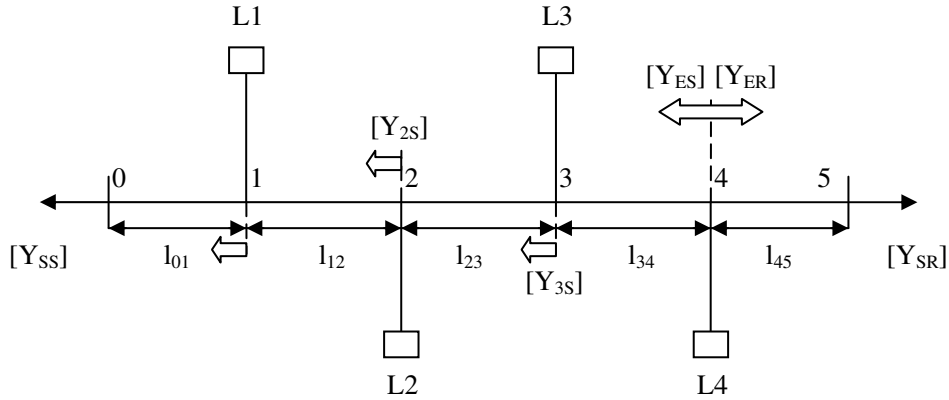


Figura 28. Modelo de un alimentador radial con múltiples cargas.

Para el caso específico de falla en el punto 4 en el esquema anterior, se tiene que:

$$[Y_{ER}] = [Y_{E4}] + [Y_{45}] \quad (3.111)$$

$[Y_{ER}]$ Matriz admitancia equivalente vista desde el punto de falla 4 hasta el siguiente nodo (fuente remota en Q).

Donde:

$$[Y_{E4}] = [Y_{L4}] [U + I_4 Z Y_{L4}]^{-1} \quad (3.112)$$

$[Y_{E4}]$ Matriz admitancia vista en la línea l_4 (desde la derivación hasta la carga L_4).

$$[Y_{45}] = [Y_{SR}] [U + I_{45} Z Y_{SR}]^{-1} \quad (3.113)$$

$[Y_{45}]$ Matriz admitancia equivalente vista en la línea l_{45} desde el punto de falla 4 a la fuente remota que se representa por la admitancia $[Y_{SR}]$ en 5.

$[Y_{SR}]$ Matriz admitancia de la fuente remota en Q.

Reemplazando (3.112) y (3.113) en (3.111) se tiene:

$$[Y_{ER}] = [Y_{L4}] [U + I_4 Z Y_{L4}]^{-1} + [Y_{SR}] [U + I_{45} Z Y_{SR}]^{-1} \quad (3.114)$$

$[Y_{ES}]$ Matriz admitancia equivalente vista desde el punto de falla 4 hacia atrás.

Para determinar $[Y_{ES}]$ se analizan los nodos anteriores a la falla, tal como sigue:

$$[Y_{IS}] = [Y_{I0}] + [Y_{E1}] \quad (3.115)$$

$$[Y_{E1}] = Y_{L1} [U + I_1 Z Y_{L1}]^{-1} \quad (3.116)$$

$$[Y_{I0}] = Y_{SS} [U + I_{01} Z Y_{SS}]^{-1} \quad (3.117)$$

$$[Y_{2S}] = [Y_{21}] + [Y_{E2}] \quad (3.118)$$

$$[Y_{E2}] = Y_{L2} [U + I_{2Z} Z Y_{L2}]^{-1} \quad (3.119)$$

$$[Y_{21}] = Y_{1S} [U + I_{12} Z Y_{1S}]^{-1} \quad (3.120)$$

$$[Y_{3S}] = [Y_{32}] + [Y_{E3}] \quad (3.121)$$

$$[Y_{E3}] = Y_{L3} [U + I_{3Z} Z Y_{L3}]^{-1} \quad (3.122)$$

$$[Y_{32}] = Y_{2S} [U + I_{23} Z Y_{2S}]^{-1} \quad (3.123)$$

Finalmente, la matriz admitancia $[Y_{ES}]$ está dada por:

$$[Y_{ES}] = Y_{3S} [U + I_{34} Z Y_{3S}]^{-1} = [Z_{ES}]^{-1} \quad (3.124)$$

En la ecuación (3.124), el efecto de la carga L_4 se incluyó al evaluar $[Y_{ER}]$.

3.6.5 Análisis de ventajas

- El método considera cargas intermedias desde la subestación y el punto de falla.
- Considera el acoplamiento mutuo entre líneas.
- Considera la posible presencia de un generador privado conectado al sistema.
- No requiere una base de datos muy completa.

3.7 MÉTODO DE RATAN DAS

El método propuesto estima la localización de fallas en un sistema de distribución radial, el cual incluye cargas laterales, no homogeneidad de los conductores de la red y cargas distribuidas polifásicas. Para ello utiliza las medidas de tensión y corriente en estado de prefalla y posfalla a frecuencia fundamental en el alimentador de la red, así como los parámetros de la línea y datos referentes a las cargas conectadas al sistema [Das98].

Se seleccionó este método para ser implementado en este trabajo de investigación a partir de una comparación realizada con los otros métodos algorítmicos existentes, como se verá en la sección 3.8. Adicionalmente, es una de las técnicas más sencillas, precisas, de mejor documentación y actual.

3.7.1 Modelo del sistema de potencia utilizado

El modelo utilizado es el de un circuito alimentador de distribución con diferentes secciones de conductor, una fuente equivalente, cargas laterales y en varios nodos. La figura 29 presenta el modelo del sistema utilizado.

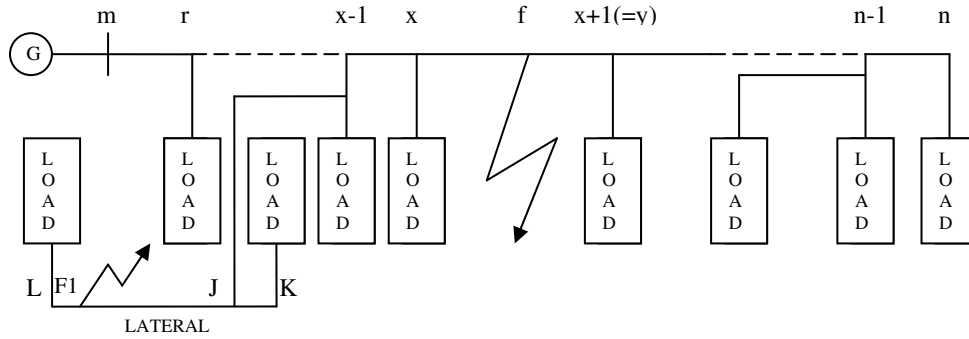


Figura 29. Diagrama del alimentador de distribución ante una falla.

3.7.2 Detección de fallas

Para estimar la localización de la falla en una línea de distribución, el primer paso es determinar la presencia de la falla e identificar el tipo de esta. Si la falla se detecta, se reúnen los datos de prefalla y falla para estimar la localización de la misma.

Para el procedimiento de detección de falla, en este documento se sigue el diagrama lógico de la figura 30.

Si una o más de las corrientes de línea son mayores a un valor límite I_t , se asume que ha ocurrido una falla. Esta variable se calcula realizando un análisis de cortocircuito para el método propuesto y encontrando el valor de corriente mínimo para cualquier condición de falla.

I_{amr} = Corriente de la línea a desde M hasta R.

I_{bmr} = Corriente de la línea b desde M hasta R.

I_{cmr} = Corriente de la línea c desde M hasta R.

Con las corrientes de línea I_{amr} , I_{bmr} , I_{cmr} es posible determinar la corriente de secuencia cero como sigue:

$$I_{omr} = \frac{I_{amr} + I_{bmr} + I_{cmr}}{3} \quad (3.125)$$

Si la corriente de secuencia cero I_{omr} es mayor que un valor límite I_{tg} , se asume que dos fases están en cortocircuito a tierra.

3.7.3 Desarrollo de un sistema radial equivalente

Una vez determinada la ocurrencia de una falla y una localización posible entre los nodos x y $x+1$, en el modelo de la figura 29, el sistema de distribución con laterales se convierte a una red radial sin laterales como se muestra en la figura 31 donde dichos laterales se consolidan con las cargas de los nodos al cual están conectados como ocurre con los nodos $x-1$ y $n-1$.

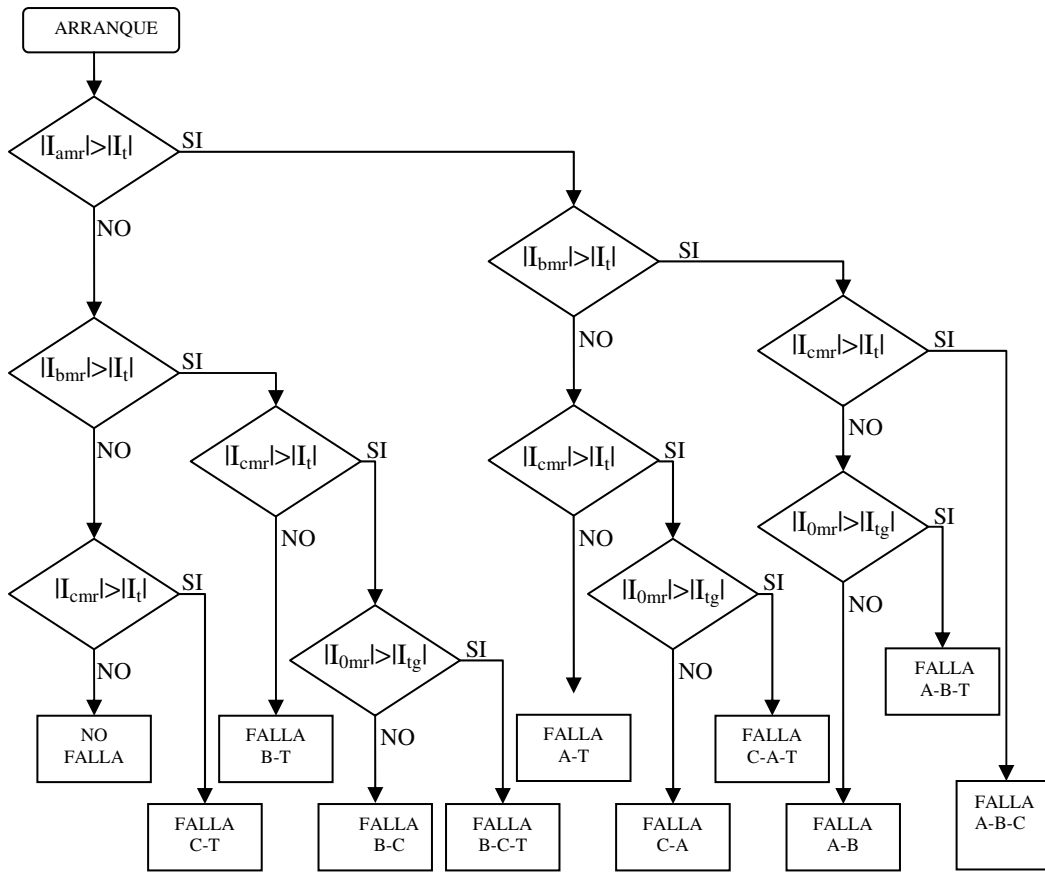


Figura 30. Diagrama lógico para determinar el tipo de falla e identificar las fases falladas.

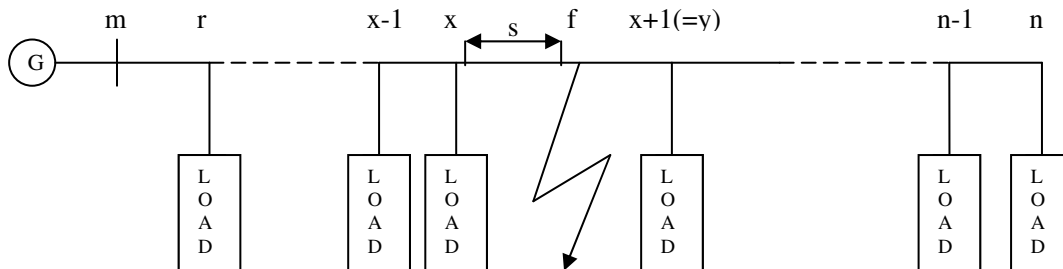


Figura 31. Diagrama modificado de un sistema de distribución radial ante una falla.

3.7.4 Deducción matemática de la distancia de falla

Partiendo del sistema de distribución de la figura 31, las tensiones y las corrientes en el nodo de falla f se pueden expresar en función de las tensiones y las corrientes en el nodo x como sigue:

$$\begin{bmatrix} V_f \\ I_{fx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -sB_{xy} \\ sC_{xy} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} \quad (3.126)$$

Donde s es la distancia desde el nodo x al nodo f y está expresada como una fracción de longitud de línea entre los nodos x y $x+1(=y)$:

$$I_{xf} = s L_{xy} \quad (3.127)$$

B_{xy} y C_{xy} son las constantes de la línea entre los nodos x y $x+1(=y)$.

Las tensiones y las corrientes en el nodo n durante la falla se obtienen de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_e & -B_e \\ C_e & -A_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -(1-s)B_{xy} \\ -(1-s)C_{xy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ I_{fn} \end{bmatrix} \quad (3.128)$$

Donde A_e , B_e , C_e y D_e son las constantes de la línea entre los nodos $x+1(=y)$ y n y están dadas por:

$$\begin{aligned} A_e &= \cosh(\gamma_e L) \\ B_e &= Z_c \sinh(\gamma_e L) \\ C_e &= \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma_e L) \\ D_e &= \cosh(\gamma_e L) \end{aligned}$$

Donde: γ_e es la constante de propagación de la línea por unidad de longitud
 L es la longitud de la línea entre los nodos $x+1(=y)$ y n
 Z_c es la impedancia característica de la sección

Las constantes La ecuación 3.128, pueden escribirse:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_a + sK_b & K_c + sK_d \\ K_e + sK_f & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ I_{fn} \end{bmatrix} \quad (3.129)$$

Donde las constantes son valores complejos definidos como sigue:

$$\begin{aligned} K_a &= D_e + B_e C_{xy}, & K_b &= -B_e C_{xy}, & K_c &= -B_e - D_e B_{xy}, & K_d &= D_e B_{xy}, \\ K_e &= C_e + A_e C_{xy}, & K_f &= -A_e C_{xy}, & K_g &= -A_e - C_e B_{xy}, & K_h &= C_e B_{xy}. \end{aligned} \quad (3.130)$$

La corriente en el nodo f , I_{fn} está definida por:

$$I_{fn} = -I_{fx} - I_f \quad (3.131)$$

Sustituyendo (3.131) en (3.129) se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_a + sK_b & K_c + sK_d \\ K_e + sK_f & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ -I_{fx} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_a + sK_b & K_c + sK_d \\ K_e + sK_f & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -I_f \end{bmatrix} \quad (3.132)$$

Sustituyendo V_f e I_{fx} de la ecuación (3.126) se tiene que:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_a + sK_b & K_c + sK_d \\ K_e + sK_f & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -sB_{xy} \\ -sC_{xy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} - \text{If} \begin{bmatrix} K_c + sK_d \\ K_g + sK_h \end{bmatrix} \quad (3.133)$$

Además como:

$$I_n = Y_n * V_n \quad (3.134)$$

Se obtiene que:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ -Y_n V_n \end{bmatrix} + \text{If} \begin{bmatrix} K_c + sK_d \\ K_g + sK_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_a + sK_b & K_c + sK_d \\ K_e + sK_f & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -sB_{xy} \\ -sC_{xy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} \quad (3.135)$$

Escribiendo de nuevo la ecuación (3.135) y no teniendo en cuenta los términos que dependen de potencias positivas de s mayores a 1, se tiene que²:

$$\begin{bmatrix} 1 & K_c + sK_d \\ -Y_n & K_g + sK_h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ \text{If} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_a + sK_i & K_e + sK_j \\ K_e + sK_k & K_g + sK_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} \quad (3.136)$$

Donde:

$$K_i = K_b - K_c C_{xy},$$

$$K_j = K_d - K_a B_{xy}, \quad (3.137)$$

$$K_k = K_f - K_g C_{xy} \quad y$$

$$K_l = K_h - K_e B_{xy}.$$

Despejando V_n e If de la ecuación (3.136) se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_n \\ \text{If} \end{bmatrix} = \frac{\begin{bmatrix} K_g + sK_h & -K_c - sK_d \\ Y_n & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_a + sK_i & K_c + sK_j \\ K_e + sK_k & K_g + sK_l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix}}{K_g + sK_h + Y_n(K_c + sK_d)} \quad (3.138)$$

$$\begin{bmatrix} V_n \\ \text{If} \end{bmatrix} = \frac{1}{K_v + sK_w} \begin{bmatrix} K_m + sK_n & sK_p \\ K_q + sK_r & K_v + sK_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} \quad (3.139)$$

Donde:

$$K_m = K_g K_a - K_c K_e,$$

$$K_n = K_h K_a + K_g K_i - K_d K_e - K_c K_k, \quad (3.140)$$

$$K_p = K_h K_c + K_g K_j - K_d K_g - K_c K_l,$$

²Esta aproximación es válida dado que s es un número entre 0 y 1.

$$K_q = Y_n K_a + K_{er}$$

$$K_r = Y_n K_i + K_{kr}$$

$$K_u = Y_n K_j + K_{lr}$$

$$K_v = Y_n K_c + K_g$$

$$K_w = Y_n K_d + K_h$$

Teniendo en cuenta las ecuaciones (3.126) y (3.138), se pueden determinar las tensiones y las corrientes de secuencia en el nodo f y las tensiones de secuencia en el nodo n:

$$V_{0f} = V_{0x} - s B_{0xy} I_{0xf}$$

$$V_{1f} = V_{1x} - s B_{1xy} I_{1xf}$$

$$V_{2f} = V_{2x} - s B_{2xy} I_{2xf}$$

$$\begin{aligned} I_{0f} &= \frac{1}{K_{0v} + sK_{0w}} \{ (K_{0q} + sK_{0r}) V_{0x} + (K_{0v} + sK_{0u}) I_{0xf} \} \\ I_{1f} &= \frac{1}{K_{1v} + sK_{1w}} \{ (K_{1q} + sK_{1r}) V_{1x} + (K_{1v} + sK_{1u}) I_{1xf} \} \\ I_{2f} &= \frac{1}{K_{2v} + sK_{2w}} \{ (K_{2q} + sK_{2r}) V_{2x} + (K_{2v} + sK_{2u}) I_{2xf} \} \end{aligned} \quad (3.141)$$

$$\begin{aligned} V_{0n} &= \frac{1}{K_{0v} + sK_{0w}} \{ (K_{0m} + sK_{0n}) V_{0x} + sK_{0p} I_{0xf} \} \\ V_{1n} &= \frac{1}{K_{1v} + sK_{1w}} \{ (K_{1m} + sK_{1n}) V_{1x} + sK_{1p} I_{1xf} \} \\ V_{2n} &= \frac{1}{K_{2v} + sK_{2w}} \{ (K_{2m} + sK_{2n}) V_{2x} + sK_{2p} I_{2xf} \} \end{aligned} \quad (3.142)$$

El siguiente paso en el procedimiento consiste en sustituir las tensiones y las corrientes de secuencia, obtenidos de las ecuaciones (3.141) y (3.142) dependiendo el tipo de falla. En el apéndice A.1 se explica en detalle este procedimiento. El resultado para cada tipo de falla se enuncia a continuación:

i) falla fase-tierra

$$s = \frac{K_{Ar} K_{Ci} - K_{Ai} K_{Cr}}{(K_{Cr} K_{Bi} - K_{Ci} K_{Br}) + (K_{Dr} K_{Ai} - K_{Di} K_{Ar})} \quad (3.143)$$

ii) Falla fase-fase y fase-fase a tierra

$$S = \frac{K_{A2r}K_{C2i} - K_{A2i}K_{C2r}}{(K_{C2r}K_{B2i} - K_{C2i}K_{B2r}) + (K_{D2r}K_{A2i} - K_{D2i}K_{A2r})} \quad (3.144)$$

iii) Falla trifásica balanceada

$$S = \frac{K_{A3r}K_{C3i} - K_{A3i}K_{C3r}}{(K_{C3r}K_{B3i} - K_{C3i}K_{B3r}) + (K_{D3r}K_{A3i} - K_{D3i}K_{A3r})} \quad (3.145)$$

Donde K_A , K_B , K_C , K_D , K_{A2} , K_{B2} , K_{C2} , K_{D2} , K_{A3} , K_{B3} , K_{C3} y K_{D3} son constantes en función de las tensiones y corrientes de secuencia (Ver apéndice A.1). Los subíndices r e i , indican parte real y parte imaginaria respectivamente.

3.7.5 Modelamiento de cargas

Los efectos de las cargas son considerados por la compensación de las corrientes de carga. Ratan Das utilizó modelos de carga de tipo estáticos en su análisis, para todas las cargas hasta el nodo x e igualmente para las demás cargas representadas como una carga concentrada en el extremo remoto. Este modelo está descrito por la siguiente ecuación, para un nodo r :

$$Yr = Gr|Vr|^{np-2} + jBr|Vr|^{nq-2} \quad (3.146)$$

Donde Vr es la tensión en un nodo cualquiera r , Yr la admitancia de carga, Gr y Br constantes proporcionales a la conductancia y susceptancia respectivamente (estimadas de los valores de prefalla), y np y nq las constantes para las componentes activa y reactiva de la carga. Los voltajes y corrientes en el nodo f durante la falla, son calculados asumiendo que todas las cargas que están ubicadas después del sitio de la estimación de la falla se encuentran concentradas en el extremo remoto (nodo n) Sin embargo para usar Modelos de carga de tipo estático para todas las cargas hasta el nodo x requiere de consideraciones adicionales dependiendo de la conexión de la carga (monofásica, bifásica o trifásica).

Las constantes de carga Gr y Br , para cada carga monofásica, son estimados utilizando la tensión de prefalla, la admitancia de carga y los valores apropiados de las constantes de la respuesta de carga np , y nq . Los valores de np y nq , están disponibles en la base de datos de la carga. La constante de carga para cada fase de una carga trifásica se considera iguales. La admitancia de carga, las constantes de respuesta de la carga y las tensiones de fase son usadas para determinar Gr y Br de las cargas fase-fase.

Los valores para np y nq para tres tipos de cargas son los siguientes:

$np = nq = 0$ para modelo de carga a potencia constante.

$np = nq = 1$ para modelo de carga de corriente constante.

$np = nq = 2$ para modelo de carga de impedancia constante

Finalmente, el diagrama de flujo del método se presenta en la figura 32.

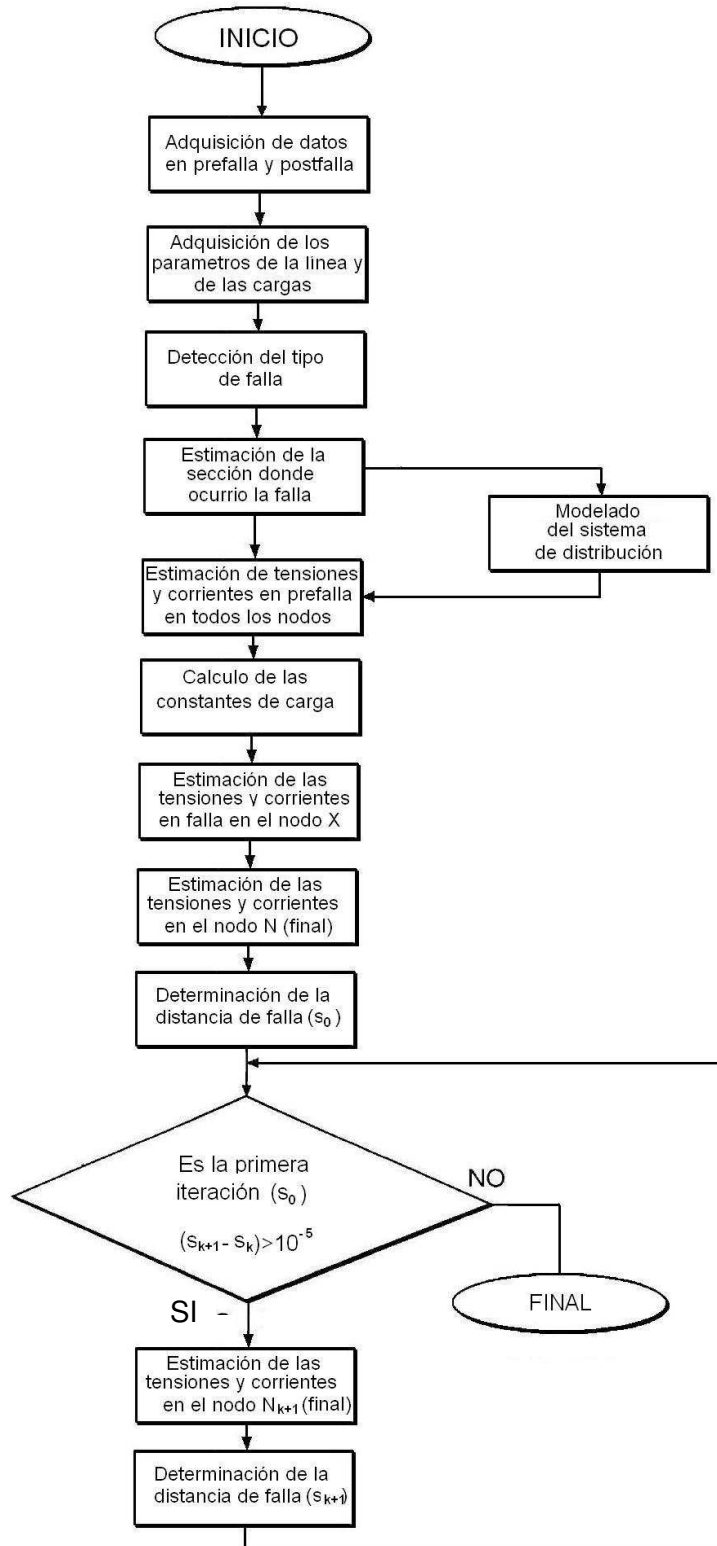


Figura 32. Diagrama de flujo del método algorítmico

3.7.6 Análisis de ventajas y desventajas

Ventajas

- El método propuesto considera que una línea de distribución puede tener conductores diferentes por tramo.
- Toma en cuenta que la admitancia de la carga varía en función de la tensión.
- Considera la compensación de corrientes debido a las cargas laterales.

Desventajas

- Se tiene que caracterizar la carga en cada uno de los nodos para poder obtener valores reales de las constantes de carga n_p y n_q .
- No es claro el proceso para concentrar las cargas que tienen valores diferentes de n_p y n_q .

3.8 COMPARACIÓN DE LOS ALGORITMOS DE LOCALIZACIÓN DE FALLAS

A continuación se presenta en la Tabla 1 una comparación de algunas características de los algoritmos de localización de fallas mencionados anteriormente. El signo ✓ indica que el método tiene en cuenta la característica y el signo ✗ indica lo contrario.

ALGORITMO	CARACTERÍSTICAS					
	Modelo de Línea	Cargas Laterales	Heterogeneidad de la Red	Tipo de Falla	Múltiple estimación	Información
RATAN DAS	Larga	✓	✓	✓	si	Pre-Postfalla
GIRGIS	Corta	✓	✓	✓	si	Pre-Postfalla y Protecciones
MYEON	Corta	✗	✓	✗	si	Pre-Postfalla
SAHA	Corta	✓	✓	✓	si	Pre-Postfalla
AGGARWAL	Corta	✓	✓	✓	si	Pre-Postfalla
NOVOSEL	Corta	✗	✗	✓	si	Pre-Postfalla

Tabla 1. Comparación de las características de los algoritmos de localización de fallas en sistemas de distribución

De la Tabla 1 se puede resaltar que existen algoritmos que tienen ventajas comparativas con otros, como son los algoritmos de Ratan Das, Saha y Aggarwal. Ésto es debido a que consideran un modelo de línea adecuado para el sistema de distribución, presencia de circuitos laterales, cargas desequilibradas, análisis según el tipo de falla y la utilización las señales de tensión y corriente a frecuencia fundamental. El método de Girgis, aunque también tiene buenas características, necesita mucha más información que los otros métodos y generalmente no se cuenta con las protecciones en todos los circuitos.

El método de Saha tiene la desventaja de no considerar la variación de la carga con la tensión (ver sección 3.5). Adicionalmente, tanto para el algoritmo de Saha como para el de Aggarwal, la información correspondiente para la implementación del algoritmo es muy limitada que dificultó una comparación más completa entre los métodos.

Después del análisis de las ventajas y limitantes de cada método, para este estudio como primera opción se ha seleccionado el algoritmo de Ratan Das para su implementación en el modelo híbrido. Éste cuenta con las características completas de aplicación en un sistema de distribución, fácil implementación, precisión y actualidad. Adicionalmente, se han encontrado gran disponibilidad de pruebas e información sobre el algoritmo. En [Das98] existe una comparación de la precisión de este método respecto al algoritmo de la componente reactiva, un análisis de sensibilidad, y resultados de pruebas realizadas, lo cual nos da confiabilidad en la selección del mismo.

4 MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL

4.1 INTRODUCCIÓN

Los métodos de inteligencia artificial, especialmente aquellos que utilizan una base de conocimiento, son aquellos que utilizan características significativas o patrones para determinar la solución a un problema. Este trabajo utiliza la técnica de inteligencia artificial llamada Máquinas de Soporte Vectorial (SVM) aplicada en la localización de fallas.

Desarrolladas por Vladimir Vapnik y sus colaboradores, su primera presentación fue en 1992, aunque sus propiedades ya existían y habían sido usadas en las máquinas de aprendizaje desde 1960. Durante varios años un creciente número de investigadores han trabajado en el análisis algorítmico y teórico de estos sistemas, creando una nueva línea de investigación, fusionando conceptos de disciplinas tan distantes como estadística, análisis funcional, optimización y máquinas de aprendizaje.

Las máquinas de vectores de soporte son una consecuencia práctica de la teoría de aprendizaje y su estudio es útil básicamente por sus excelentes características:

- Ausencia de mínimos locales
- Alta capacidad de generalización y control
- Uso de funciones kernel

Las máquinas de Soporte vectorial a diferencia de otros métodos, presenta la ventaja de no requerir ningún tipo de hipótesis sobre la densidad de probabilidad de los rasgos y de ser convenientes en términos de la dimensionalidad del problema³ [HOOC04].

En este capítulo se presenta una breve introducción a la teoría de las SVM, se describen sus diferentes parámetros y se presentan sus variantes para el caso de multclasificación. En la parte final se explica su aplicación al campo de la localización de fallas.

4.2 APRENDIZAJE A TRAVÉS DE EJEMPLOS

Considérese n datos de entrenamiento \mathbf{N} dimensional (x_i^p) con su respectiva etiqueta (y_i)

$$x_i \in R^N \text{ y } y_i \in \{+1, -1\} \quad (4.1)$$

Con los cuales se busca estimar una función f tal que para una entrada en R^N produzca una salida en $\{\pm 1\}$

$$f: R^N \rightarrow \{+1, -1\} \quad (4.2)$$

³ Como se verá más adelante, la arquitectura de las SVM sólo depende del parámetro \mathbf{C} y la función *kernel* (incluyendo sus parámetros), que para el caso del Kernel de Base Radial es uno. De esta manera se evitan requerimientos sobre parámetros exclusivos de arquitectura, tales como número de nodos y capas, tipo de conexión entre capas, etc.

para que así pueda clasificar correctamente un nuevo dato (\mathbf{x}, y) (téngase en cuenta que $y = f(\mathbf{x})$ para este nuevo dato, y es generado con la misma distribución de probabilidad $P(\mathbf{x}_i, y_i)$ de los datos de entrenamiento). Pero no se impone restricción alguna en la clase de función que se escoge, se pueden cometer errores en el estimado, pues aunque trabaje bien en los datos de entrenamiento, no necesariamente tiene una buena generalización para datos desconocidos, luego el aprendizaje es imposible y la minimización del error de entrenamiento no implica que se deba esperar un pequeño error de prueba.

4.3 HIPERPLANO CLASIFICADOR ÓPTIMO

Los clasificadores de soporte vectorial están basados en hiperplanos que separan los datos de entrenamiento en dos subgrupos que poseen cada uno una etiqueta propia. En medio de todos los posibles planos de separación entre las dos clases, etiquetadas y $\{-1, +1\}$, existe un único hiperplano óptimo de separación (OSH). Se busca que la distancia entre el hiperplano óptimo y el patrón de entrenamiento más cercano sea máxima, con la intención de forzar la generalización de la máquina de aprendizaje [Bur98, SS02].

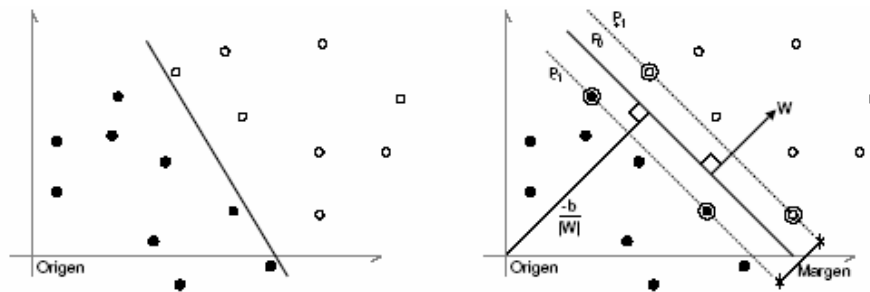


Figura 33. Hiperplanos que separan correctamente los datos. El OSH de la derecha tiene un mayor margen de separación entre clases, por lo tanto se espera una mejor generalización.

Por tanto el hiperplano óptimo de separación (OSH) se expresa de la forma⁴:

$$g(\mathbf{x}) = (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}) + b = 0 \quad (4.3)$$

donde se desea maximizar el margen (figura 33). Se proponen dos planos paralelos que contienen los puntos más cercanos al OSH. Definiendo como $1/\|\mathbf{w}\|$ la distancia entre el punto más cercano al OSH se obtienen las ecuaciones de dichos planos⁵:

$$p_{+1} = (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}) + b = +1 \quad (4.4)$$

$$p_{-1} = (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}) + b = -1 \quad (4.5)$$

⁴ Un plano N dimensional es de la forma $a_n x_n + a_{n-1} x_{n-1} + \dots + a_1 x_1 + a_0 = 0$, donde se puede volver a escribir de la forma $(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}) + b = 0$, siendo $\mathbf{w} = [a_n, a_{n-1}, \dots, a_1]$ un vector perpendicular al hiperplano,

$\mathbf{x} = [x_n, x_{n-1}, \dots, x_1]$, y $b = a_0$

⁵ Recordando la distancia perpendicular que hay entre cualquier punto a un plano: $\frac{(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}) + b}{\|\mathbf{w}\|}$

Siendo el margen la distancia perpendicular entre (4.4) y (4.5):

$$\begin{aligned} [(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_{+1}) + b] - [(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_{-1}) + b] &= +1 - (-1) \\ \mathbf{w} \cdot (\mathbf{x}_{+1} - \mathbf{x}_{-1}) &= 2 \\ \frac{\mathbf{w}}{\|\mathbf{w}\|} \cdot (\mathbf{x}_{+1} - \mathbf{x}_{-1}) &= \frac{2}{\|\mathbf{w}\|} \end{aligned} \quad (4.6)$$

y la distancia entre el OSH y el origen:

$$\begin{aligned} (\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i) + b &= 0 \\ \mathbf{x}_i &= 0 \\ \frac{(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i) + b}{\|\mathbf{w}\|} &= \frac{b}{\|\mathbf{w}\|} \end{aligned} \quad (4.7)$$

donde (4.4), (4.5), (4.6) y (4.7) se muestran en la figura 34.

Debe notarse que entre (4.4) y (4.5) no existen datos de entrenamiento, todos los datos deben cumplir:

$$(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}) + b \geq +1 \quad \text{para } y_i = +1 \quad (4.8)$$

$$(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}) + b \leq -1 \quad \text{para } y_i = -1 \quad (4.9)$$

Luego la función decisión $f_{w,b}(\mathbf{x}_i) = y_i$, puede definirse como el signo que resulta de evaluar un dato en la ecuación del OSH (4.3):

$$f_{w,b}(\mathbf{x}_i) = \text{sign}[g(\mathbf{x}_i)] = \text{sign}[(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i) + b] \quad (4.10)$$

Combinando (4.8) y (4.9) se obtiene:

$$y_i(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b) \geq 1 \quad (4.11)$$

Si existe un hiperplano que satisfaga (4.11), se dice que los datos son linealmente separables.

Para encontrar el OSH se debe maximizar el margen (4.6), teniendo en cuenta la restricción (4.11), equivalente a resolver el siguiente problema:

$$\text{mín}_{w,b} \frac{1}{2} (\mathbf{w} \cdot \mathbf{w}) \quad (4.12)$$

$$\text{Sujeto a } y_i(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) \geq 1, \forall i \quad (4.13)$$

La función (4.12) se llama función objetivo, y junto con (4.13) se denomina problema de optimización cuadrático con restricciones. Los problemas de este tipo se tratan introduciendo el *método de multiplicadores de Lagrange*.

4.4 SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN CON RESTRICCIONES

Para esta clase de problemas con restricciones, se introducen los *multiplicadores de Lagrange* $\alpha_i \geq 0$ (uno por cada restricción). Para las restricciones de la forma $R_i \geq 0$, cada restricción se multiplica por α_i (un multiplicador de Lagrange positivo) y se restan de la función objetivo, para así formar la *función de Lagrange* [Bur98]:

$$L(\vec{w}, \vec{\alpha}, b) = \frac{1}{2} \|\vec{w}\|^2 - \sum_{i=1}^n \alpha_i [y_i (\vec{w} \cdot \vec{x}_i + b) - 1] \quad (4.14)$$

La función de Lagrange (4.14) se debe minimizar con respecto a las variables primarias \vec{w} y b , y maximizada sobre los α_i (en otras palabras, encontrar el punto de silla) [SS02]. Para el caso de $y_i (\vec{w} \cdot \vec{x}_i + b) - 1 > 0$, el correspondiente α_i debe ser cero, debido a que éste es el valor que maximiza (4.14). Los $\alpha_i \neq 0$ son para el caso en que $y_i (\vec{w} \cdot \vec{x}_i + b) - 1 = 0$ (estos son los patrones de entrenamiento que quedan sobre los planos paralelos (4.4) y (4.5) al OSH). Este último enunciado son las condiciones de *Karush-Kuhn-Tucker* (condiciones complementarias de optimización) [KT51]:

$$\alpha_i [y_i (\vec{w} \cdot \vec{x}_i + b) - 1] = 0, \forall i \quad (4.15)$$

$$\frac{\partial}{\partial \vec{w}} L(\vec{w}, \vec{\alpha}, b) = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{w} = \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \vec{x}_i \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial}{\partial b} L(\vec{w}, \vec{\alpha}, b) = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \quad (4.17)$$

La solución de \vec{w} en (4.16) queda en función de un subconjunto de patrones de entrenamiento, aquellos cuyo multiplicador de Lagrange es diferente de cero. Es decir, el soporte de \vec{w} está en los patrones de entrenamiento más cercanos al OSH. De aquí el nombre de *Máquinas de Soporte Vectorial*.

Reemplazando (4.16) y (4.17) en (4.14), se eliminan las variables primarias \vec{w} y b llegando así al *problema de optimización dual de Wolfe*, el cual se resuelve en la práctica:

$$\max_{\alpha} \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (\vec{x}_i \cdot \vec{x}_j) \quad (4.18)$$

$$\text{sujeto a } \alpha_i \geq 0, \forall i \text{ y } \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \quad (4.19)$$

Este problema puede ser resuelto con métodos de programación cuadrática estándar [Bur98]. Una vez obtenido el vector $\vec{\alpha}$, se pueden obtener los parámetros \vec{w} y b con (4.16) y (4.15) respectivamente:

$$\begin{aligned} \vec{w} &= \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i \vec{x}_i \\ b &= y_i - \vec{w} \cdot \vec{x}_i \end{aligned}$$

Ahora, la ecuación del OSH y la función de decisión se pueden expresar como:

$$g(\mathcal{X}) = \sum_{i=1}^n [\alpha_i y_i (\mathcal{X}_i \cdot \mathcal{X}_i)] + b \quad (4.20)$$

$$f(\mathcal{X}) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^n [\alpha_i y_i (\mathcal{X}_i \cdot \mathcal{X}_i)] + b \right) \quad (4.21)$$

Se trabajó con teoría de Lagrange por dos razones fundamentales [Bur98]:

- Las restricciones (4.13) fueron remplazadas y quedaron en términos de α_i (4.19), lo cual es mucho más fácil de manejar.
- En la reformulación del problema, los datos de entrenamiento \mathcal{X}_i sólo aparecen en forma de productos punto entre ellos mismos (4.18), (4.20) y (4.21), lo cual es muy conveniente como se verá más adelante en la sección 4.6.

4.5 CASO LINEALMENTE NO SEPARABLE

Hasta el momento se ha descrito la manera en la cual funcionan las SVMs, pero su implementación puede crear clasificadores erróneos, debido a que en la práctica no necesariamente existe un hiperplano separador, y si existe, no siempre es la mejor solución para el problema de clasificación. Esto es, si existen datos erróneos, ruido o alto solapamiento de clases en los datos de entrenamiento, puede afectar bastante el hiperplano clasificador óptimo. Por esta razón se cambia un poco la perspectiva y se busca el mejor hiperplano que pueda tolerar el ruido en los datos de entrenamiento. Una solución que sería obvia es encontrar el hiperplano que conduzca al menor número de errores de entrenamiento, pero desafortunadamente, esto se convierte en un problema combinatorial el cual es difícil de aproximar.

Cortes y Vapnik [CV95], toman un acercamiento diferente para las SVMs, basándose en [BM92], para permitir la posibilidad de ejemplos que violen la restricción (4.13), ellos introducen las variables slack (de relajación), como se presenta en la figura 34.

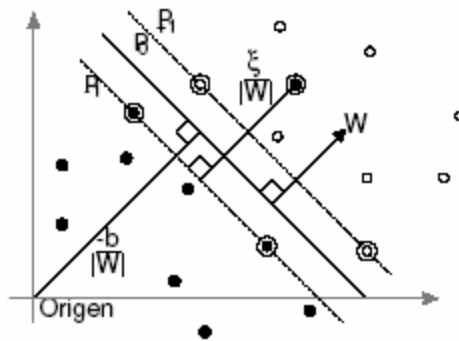


Figura 34. Hiperplano lineal clasificador para el caso no separable.

$$\xi_i \geq 0, \forall i \quad (4.22)$$

Para formular una nueva restricción:

$$y_i(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) \geq 1 - \xi_i, \forall i \quad (4.23)$$

Luego el clasificador que generaliza bien se halla controlando tanto su capacidad de clasificación (con $\|\mathbf{w}\|$), como el límite superior del número de errores de entrenamiento $(\sum_{i=1}^n \xi_i)$. Una posible forma de obtener el hiperplano óptimo con margen débil es minimizando la función:

$$\min_{\mathbf{w}, b} \frac{1}{2}(\mathbf{w} \cdot \mathbf{w}) + C \sum_{i=1}^n \xi_i \quad (4.24)$$

$$\text{Sujeto a } y_i(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x}_i + b) \geq 1 - \xi_i, \forall i \quad (4.25)$$

El parámetro C se elige a priori por el usuario de tal manera que un valor grande es una alta penalización a lo errores. Si se emplean los multiplicadores de Lagrange el problema se transforma en:

$$\max_{\alpha} \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j (\mathbf{x}_i \cdot \mathbf{x}_j) \quad (4.26)$$

$$\text{sujeto a } 0 \leq \alpha_i \leq C, \forall i \text{ y } \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0 \quad (4.27)$$

Cuya solución da como resultado (4.16). El hiperplano separador solución se puede expresar como (4.20), y la función de decisión como (4.21).

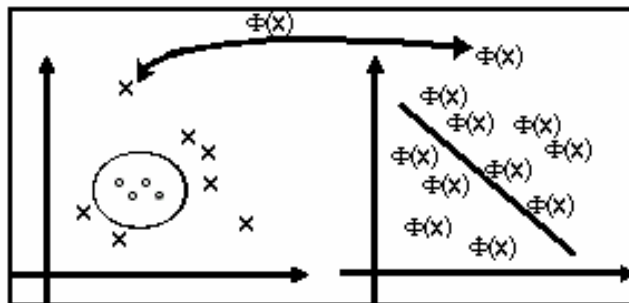


Figura 35. La SVM no lineal mapea el espacio de entrada en otro de representación de dimensión alta.

4.6 MÁQUINAS DE SOPORTE NO LINEALES

El principio de las SVM no lineales consiste en mapear el espacio de entrada a un espacio de representación de dimensión alta a través de una función no lineal elegida a priori [BGV92] (figura 35). Por medio de una función (Φ) se trazan los datos de entrada $(\mathbf{x}_i \in R^N)$ a algún espacio de mayor dimensión y con producto punto. Este espacio se llama *espacio característico* (\mathbf{F}).

$$\Phi: \mathbb{R}^N \rightarrow F \quad (4.28)$$

Así la función (4.20) que depende del producto punto de los vectores en el espacio de entrada, pasa a una función que depende del producto punto de los vectores en el espacio característico:

$$g(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n [\alpha_i y_i (\Phi(\mathbf{x}_i) \cdot \Phi(\mathbf{x}))] + b \quad (4.29)$$

Entonces se define una función que sea el producto punto de los vectores en el espacio característico:

$$k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) = \Phi(\mathbf{x}_i) \cdot \Phi(\mathbf{x}) \quad (4.30)$$

Debido a que (F) es de alta dimensión, el lado derecho de la ecuación (4.30) es costoso en términos computacionales. Sin embargo existe una función *kernel* (\mathbf{k}), que puede evaluarse eficazmente y demostrar que corresponde un trazado de (Φ) en un espacio que abarca todos los productos punto. Por ejemplo para el *kernel* polinomial:

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (\mathbf{x} \cdot \mathbf{y})^d \quad \text{con } (\mathbf{x}, \mathbf{y}) \in \mathbb{R}^2 \text{ y } d = 2 \quad (4.31)$$

Se tiene que:

$$\begin{aligned} k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) &= \left[\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \right]^2 \\ k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) &= [x_1 y_1 + x_2 y_2]^2 \\ k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) &= x_1^2 y_1^2 + 2x_1 y_1 x_2 y_2 + x_2^2 y_2^2 \end{aligned} \quad (4.32)$$

Esta ecuación se puede escribir de la forma:

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \left[\begin{pmatrix} x_1 \\ \sqrt{2}x_1 x_2 \\ x_2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_1 \\ \sqrt{2}y_1 y_2 \\ y_2 \end{pmatrix} \right] = \Phi(\mathbf{x}) \cdot \Phi(\mathbf{y}) \quad (4.33)$$

Se observa que la función *kernel* nos ahorra buscar explícitamente la función Φ , y nos lleva directamente al resultado del producto punto, que es lo que realmente interesa.

Generalizando, se puede probar que por cada función *kernel* que presente una matriz definida positiva, se puede construir una función Φ que cumpla (4.30). Los *kernel* más utilizados son:

- Polinomial:

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (\mathbf{x} \cdot \mathbf{y} + c)^d \quad \text{para } c > 0 \quad (4.34)$$

- Función de base radial (RBF):

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = e^{-\frac{\|\mathbf{x}-\mathbf{y}\|^2}{2\sigma^2}} \quad (4.35)$$

- Sigmoide:

$$k(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \tanh(\kappa(\mathbf{x}, \mathbf{y}) + \theta) \quad (4.36)$$

Ahora se puede reescribir (4.26) sujeta a (4.27):

$$\max_{\alpha} \sum_{i=1}^n \alpha_i - \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^n \alpha_i \alpha_j y_i y_j k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \quad (4.37)$$

$$\text{sujeto a } 0 \leq \alpha_i \leq C, \forall i \text{ y } \sum_{i=1}^n \alpha_i y_i = 0$$

y las ecuaciones del OSH (4.20) y función decisión (4.21) también cambiarán a:

$$g(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^n [\alpha_i y_i k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x})] + b \quad (4.38)$$

$$f(\mathbf{x}) = \text{sign} \left(\sum_{i=1}^n [\alpha_i y_i k(\mathbf{x}_i, \mathbf{x})] + b \right) \quad (4.39)$$

4.7 MULTICLASIFICACIÓN CON SVM

Hasta el momento solo se ha tratado el problema de la biclasificación (en los cuales las clases solo pueden tomar valores: ± 1), pero en la vida real, muchos problemas son de más de dos clases ($y_i \in \{1, 2, \dots, l\}$, $l > 2$). Para resolver el problema de multclasificación con máquinas de vectores de soporte se admiten dos tipos de arquitectura.

4.7.1 Máquinas multclasificadoras SV

Esta máquina construye una función clasificadora global directamente considerando todas las posibles clases a la vez. Se puede intentar resolver el problema, modificando la función objetivo de la SVM de tal manera que permita calcular una única máquina capaz de trabajar con todas las clases a la vez. Así pues por [WW99, BVB95], podemos usar la siguiente función objetivo:

$$\min_{w_r, b_r, \xi^r} \frac{1}{2} \sum_{r=1}^{\lambda} \|w_r\|^2 + \frac{C}{m} \sum_{i=1}^m \sum_{r \neq y_i} \xi_i^r \quad (4.40)$$

$$\text{Sujeto a } (w_{y_i} \cdot \mathbf{x}_i + b_{y_i}) \geq w_r \cdot \mathbf{x}_i + b_r + 2 - \xi_i^r, \quad \xi_i^r \geq 0, \quad (4.41)$$

$$m \in \{1, \dots, \lambda\}, \quad y_i \in \{1, \dots, \lambda\}$$

La principal desventaja de esta generalización se encuentra en el problema de optimización cuadrático, donde se manejan $n(l-1)$ variables sujetas a $2n(l-1)+2l$ restricciones de desigualdad. Esta desventaja es realmente visible en experimentos empíricos, donde se muestra que este tipo de solución es lenta. Además, no existe ninguna inclusión de técnicas que mejoren la robustez del sistema, ni ningún estudio teórico sobre la cota de error [Ang01].

4.7.2 Máquinas biclasificadoras SV generalizadas

Este tipo de máquina construye una función clasificadora global a partir de un conjunto de funciones biclasificadoras. Existen técnicas de descomposición y reconstrucción que permiten a las SVM biclasificadoras manejar problemas de multclasificación con mayor simplicidad y/o menor tiempo de respuesta que una SVM generalizada a multclasificación.

4.7.2.1 Arquitecturas de descomposición estándares

En el esquema de descomposición estándar se construyen m máquinas biclasificadoras, en paralelo que son entrenados sobre modificaciones del conjunto de aprendizaje. Se crea una matriz de descomposición, donde los elementos de unas clases son asignados a salidas positivas, los de otras a salidas negativas, y si es el caso, los restantes no son tenidos en consideración en aquel clasificador en particular.

Uno contra el resto

Conocido como 1-v-r (*one-versus-rest*), este esquema se basa en la idea de que si existe un grupo de n datos de entrenamiento donde existen l clases ($l > 2$), se pueden tener un grupo de m clasificadores binarios (donde $m=l$), cada uno entrenado para separar una clase del resto de clases existentes ($l-1$). La descomposición se realiza de la siguiente manera: existe un grupo de datos (n_j) que pertenecen a la j -ésima clase ($j \in \{1, \dots, l\}$), a los cuales se les dará una etiqueta positiva ($t_j = +1$) y al resto de datos ($n_r = n - n_j$) se les dará una etiqueta negativa ($t_r = -1$) para el entrenamiento de la i -ésima SVM. Así se crea una matriz de descomposición (D_{1-v-r}) de m filas y l columnas

$$D_{i,j} = \begin{cases} +1 & \text{si } n_h \in n_j \\ -1 & \text{si } n_h \in n_r \end{cases} \quad (4.42)$$

Por ejemplo, para una máquina de clasificación multiclase (1-v-r) con $l=5$, se obtiene $m=5$. Entonces la correspondiente matriz de descomposición es la siguiente:

$$D_{1-v-r} = \begin{pmatrix} +1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & +1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & +1 & -1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & +1 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & +1 \end{pmatrix} \quad (4.43)$$

En esta arquitectura propuesta por [Vap95, CV95], el tiempo de entrenamiento es proporcional al número de clases, y debido a que el entrenamiento de cada

biclasificador es con el conjunto de datos de entrenamiento completo su costo computacional es alto.

Uno contra uno

Conocido como 1-v-1 (*one-versus-one*), se realiza implementando $m=l(l-1)/2$ clasificadores binarios, luego el entrenamiento de la i -ésima SVM se realiza con solo 2 de las l clases existentes ($l>2$) en el grupo de n datos de entrenamiento, otorgándole etiqueta positiva ($t_j=+1$) a los datos (n_j) que pertenecen al subgrupo de datos de la clase j ($j \in \{1, \dots, l\}$), y etiqueta negativa ($t_p=-1$) a los datos (n_p) que pertenecen al subgrupo de datos de la clase p ($p \in \{1, \dots, l\}$ y $p \neq j$), los demás datos ($n_r=n-n_j-n_p$) no se utilizan en el entrenamiento de la i -ésima SVM por lo tanto son etiquetados con cero ($t_r=0$), creándose la matriz de descomposición (D_{1-v-1})

$$D_{i,j} = \begin{cases} +1 & \text{si } n_h \in n_j \\ -1 & \text{si } n_h \in n_p \\ 0 & \text{si } n_h \in n_r \end{cases} \quad (4.44)$$

Por ejemplo, para una máquina de clasificación multiclase (1-v-1) con $l=5$, se obtiene $m=10$. Entonces la correspondiente matriz de descomposición es la siguiente:

$$D_{1-v-1} = \begin{pmatrix} +1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & +1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & +1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & +1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & +1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & +1 & -1 \end{pmatrix} \quad (4.45)$$

4.7.2.2 Arquitectura de descomposición ECOC

La técnica ECOC (del inglés *Error Correcting Output Codes*) [DB95], ECOC utiliza la codificación estándar para obtener robustez contra fallos en las máquinas biclasificadoras. Se denomina codificación estándar a cada una de las posibles particiones de todo el conjunto de clases $y_i \in \{1, \dots, l\}$ en problemas de biclasificación que asignan etiquetas positivas $t_p = +1$ a los patrones de entrenamiento n_j de un cierto subconjunto de clases Y_j , y etiquetas negativas $t_p = -1$ a los patrones de entrenamiento n_r representantes del resto de clases Y_r . La de descomposición debe ser tan diferente como sea posible en términos de la distancia *Hamming* para añadir redundancia, en este caso $m=2^{l-1}-1$. Por ejemplo, para una máquina de clasificación multiclase (ECOC) con $l=4$, se obtiene $m=7$, entonces la correspondiente matriz de descomposición es la siguiente:

$$D_{ECOC} = \begin{pmatrix} +1 & -1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & -1 \end{pmatrix} \quad (4.46)$$

4.8 MÉTODOS DE RECONSTRUCCIÓN

Cada máquina biclasificadora entrenada emite una respuesta en forma numérica $z_i = g_i(\mathcal{X})$ a una entrada \mathcal{X} . La información más importante en esta respuesta, en principio, se encuentra en el signo $s^i = f_i(\mathcal{X}) = \text{sign}(g_i(\mathcal{X}))$ que adopta la función de decisión. En la determinación de la respuesta final facilitada por el método de reconstrucción de la máquina de aprendizaje multiclase han de ser tomados en consideración los siguientes elementos:

- Las predicciones numéricas parciales de los nodos de dicotomía, $z_i = g_i(\mathcal{X})$
- El signo de las predicciones numéricas, $s^i = f_i(\mathcal{X}) = \text{sign}(g_i(\mathcal{X}))$
- Un elemento interprete de las predicciones numéricas y binarias, $\theta(\mathbf{z}^i, \mathbf{s}^i)$, con el fin de asignar o no, una o varias clases como posible respuesta de clasificación a una entrada \mathcal{X} .
- Un elemento $\Psi(\theta(\mathbf{z}^1, \mathbf{s}^1), \dots, \theta(\mathbf{z}^m, \mathbf{s}^m))$ de combinación de las predicciones, que tenga o pueda tener en consideración las predicciones numéricas, sus signos y/o la clase o clases asignadas.

Esquemas de votación

Son la forma de reconstrucción más habitual. Se tiene en consideración solo el signo de las predicciones de todas las máquinas biclasificadoras. Estos signos se interpretan en función de las clases implicadas en las máquinas biclasificadoras utilizado en el esquema de descomposición.

- i-ésimo 1-v-r máquina biclasificadora

$$\theta(s^i) = \begin{cases} y_i & \text{si } s^i = +1 \\ 0 & \text{si } s^i = -1 \end{cases} \quad (4.47)$$

- i-ésimo 1-v-1 máquina biclasificadora

$$\theta(s^i) = \begin{cases} y_j & \text{si } s^i = +1 \\ y_p & \text{si } s^i = -1 \end{cases} \quad (4.48)$$

- i-ésimo ECOC máquina biclasificadora

$$\theta(s^i) = \begin{cases} y_j & \text{si } s^i = +1 \\ y_r & \text{si } s^i = -1 \end{cases} \quad (4.49)$$

Tras la interpretación de las predicciones, el elemento de combinación realiza un recuento del número de clases votadas, acción de la que toma el nombre de esquema de reconstrucción, que posee diferentes variantes. Se define a continuación algunas de estas posibilidades para las arquitecturas de descomposición:

- Votación por unanimidad: se determina como respuesta aquella única clase que haya obtenido todos los votos posibles en las predicciones.
- Votación por mayoría absoluta: se determina como respuesta final aquella única clase que haya obtenido más de la mitad de los votos posibles.
- Votación por mayoría simple: se determina como respuesta final aquella única clase que haya obtenido más votos que el resto de clases.

4.9 APLICACIÓN DE LA TÉCNICA A LA LOCALIZACIÓN DE FALLAS

A continuación se realiza una breve descripción de la primera aproximación de la aplicación de la técnica a la localización de fallas en sistemas de distribución.

Inicialmente se plantea la simulación de un sistema prototipo en condiciones de falla, con el fin de obtener la respuesta del sistema a las perturbaciones a la cual fue sometido. Como resultado de esta actividad se obtienen las señales de tensión y corriente medidos en la cabecera del circuito.

Seguidamente, se plantea la caracterización del sistema basada en el cálculo de descriptores monofásicos de la señal de tensión, tales como: profundidad del hueco de tensión, pendiente de descenso del valor rms, frecuencia característica de la señal transitoria, etc. (ver capítulo 5).

Luego se realiza la adecuación de información extractada en los descriptores para determinar posibles zonas dentro del circuito. Finalmente, se realiza la clasificación de los datos utilizando la técnica planteada, con la cual se obtendrá la zona probable de la falla.

5 CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA

5.1 INTRODUCCIÓN

Hasta ahora, los métodos más documentados para los sistemas de distribución son los basados en el modelo, debido a que su implementación y operación no es tan costosa como los basados en el conocimiento. Sin embargo, su alta dependencia de un buen modelo y la múltiple estimación de la posible localización de la falla (estiman una distancia eléctrica desde la subestación hasta el sitio de falla), son sus grandes desventajas [ZLG97] [NHHM98]. Así mismo, las desventajas de los métodos basados en el conocimiento es que necesitan gran cantidad de información y su precisión no es tan alta como la de los basados en el modelo [Mor03].

Adicionalmente, en la mayoría de las empresas distribuidoras, solo se tienen señales de tensión y de corriente medidas en la subestación. Por esta razón, es importante desarrollar metodologías que permitan extraer la información significativa que pueda ser relacionada con la localización de la falla a partir de estas mediciones. La caracterización permite aprovechar toda la información disponible en la subestación, sin aumentar significativamente el costo de la implementación de un método basado en el conocimiento.

En el presente capítulo se detalla la caracterización que es posible realizar para las señales de tensión y corriente, monitorizadas en la subestación, cuando un sistema de distribución presenta fallas. En principio se presentan algunos patrones extractados de las señales de falla en estado transitorio y estado permanente, para terminar con la escogencia de ellos y la metodología propuesta para su uso con la técnica SVM.

5.2 DESCRIPTORES

Un descriptor es un patrón que describe un comportamiento en el sistema. A continuación se describirán los descriptores propuestos para la caracterización de fallas, basados en dos tipos de análisis: el primero apoyado en el análisis de la señal transitoria y el segundo basado en la señal en estado estable antes, durante y después de la falla

5.2.1 Extracción de características a partir de la señales transitorias

Las señales de voltaje y corriente medidas en la subestación, presentan fuertes oscilaciones en el momento en que ocurre una perturbación en la red, estas oscilaciones son conocidas como transitorios. El análisis de transitorios se realiza con el objetivo de extraer las componentes frecuenciales de una señal y asociarlas a una distancia eléctrica de ocurrencia de la falla.

El tiempo de duración y la frecuencia del transitorio son descriptores que están directamente relacionados con la distancia de falla. En un sistema de potencia existe una relación entre los parámetros R , L , C con la frecuencia y la distancia. Los parámetros L y C presentan una relación fuerte con la frecuencia, ya que definen la frecuencia natural de la oscilación transitoria. La duración de los eventos transitorios depende de los parámetros R , L y C del circuito [Gre91]. Debido a que la frecuencia del transitorio depende solo de L y C , este descriptor permite encontrar la distancia de

falla sin considerar los efectos de la resistencia de la misma. Esta es una gran ventaja asociada a este descriptor en particular.

Para obtener las componentes frecuenciales que presentan estos transitorios, se utilizan dos herramientas de análisis de señales: la transformada wavelet (TW) y la transformada de Fourier (TF).

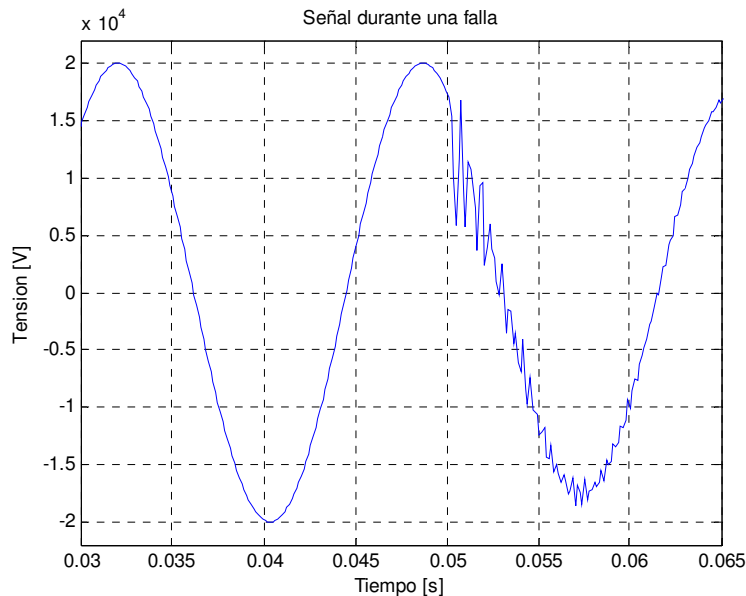


Figura 36. Señal transitoria durante una falla monofásica medida en la S/E

5.2.1.1 Transformada Wavelet (TW)

La transformada Wavelet (TW) es una rápida y eficiente forma de analizar transitorios en las señales de tensión y corriente. Este método de análisis de señales, filtra una señal en el dominio del tiempo mediante filtros pasa bajo y pasa alto que eliminan componentes de alta y baja frecuencia de la señal. El filtrado se aplica de manera secuencial, para las señales resultantes del proceso de filtrado anterior. Este procedimiento continúa hasta que la señal se ha descompuesto un cierto número de niveles predefinidos [Mal02].

Para el proceso de descomposición se utilizan algunas funciones denominadas *Wavelets madre*, que para el caso de sistemas de potencia se recomienda utilizar la *Daubechies 4* y *Daubechies 8*, debido a su similitud con la forma de la señal transitoria. Como resultado del proceso de descomposición, se obtiene un conjunto de señales en diferentes bandas de frecuencia que representan a la señal original [Mal02].

A través de esta herramienta (TW) se logra una buena representación tanto en tiempo como en frecuencia de la señal, ya que se puede determinar el intervalo de tiempo en el cual aparecen determinadas componentes espectrales.

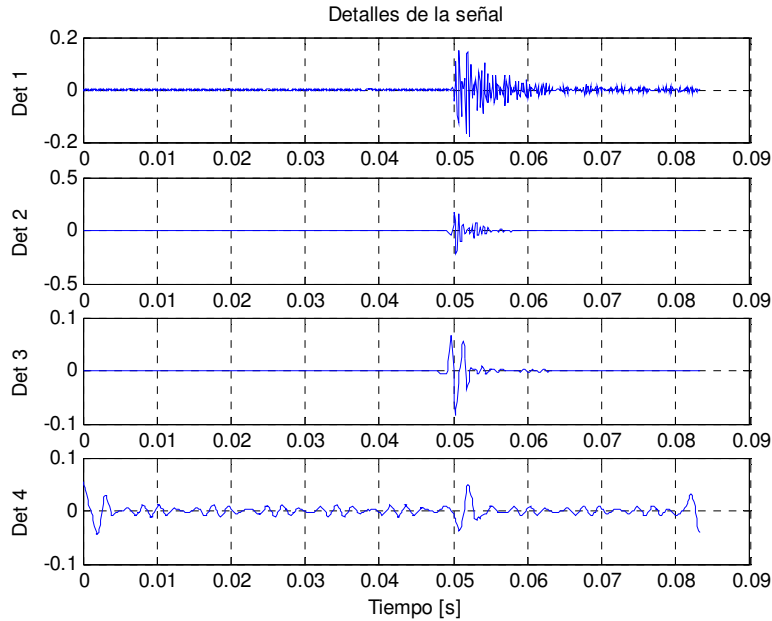


Figura 37. Detalles de la señal mediante TW

5.2.1.2 Transformada Rápida de Fourier (FFT)

Los detalles obtenidos con la TW se analizan con la transformada de Fourier, ya que ésta permite analizar señales no estacionarias, dividiendo la señal original en pequeñas partes que se asumen estacionarias. La principal ventaja de la FFT frente a la TW es la exactitud que ofrece ésta para ubicación en el dominio de la frecuencia.

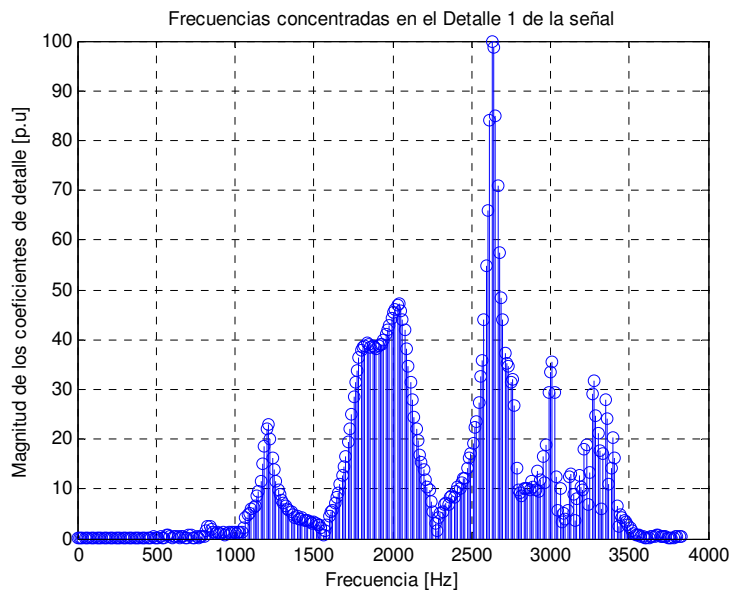


Figura 38. Componentes frecuenciales de la señal transitoria aplicando FFT

El proceso para el análisis transitorio se presenta en la figura 34 y se describe a continuación:

- 1) Medición de señales de tensión. Normalmente, las señales de corriente no permiten observar el fenómeno transitorio con suficiente claridad.
- 2) Análisis de las señales de tensión mediante la TW, para obtener un nivel de descomposición y un número de detalles a obtener.
- 3) Determinación del detalle con mayor índice Wavelet. Este detalle es el utilizado para obtener el tiempo de duración del transitorio. Una frecuencia característica del transitorio producido por la falla del sistema es obtenida del detalle número uno.
- 4) Obtención de las componentes frecuenciales, a partir del análisis mediante la FFT, del detalle que posee el mayor índice Wavelet.
- 5) Obtención de la duración del transitorio, definido como el tiempo en que el valor pico de la señal transitoria cae debajo de un umbral del 2% de su valor pico máximo.

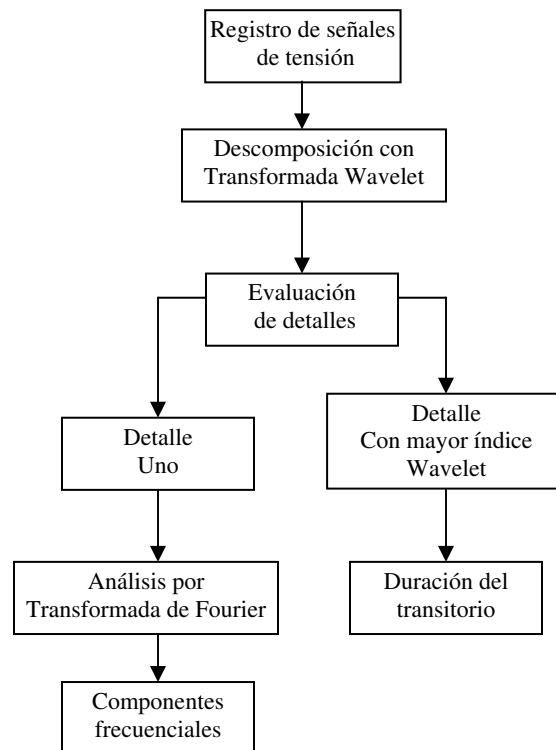


Figura 39. Procedimiento para extraer descriptores de la señal transitoria

5.2.2 Caracterización a partir de huecos de tensión

Al presentarse una falla en el sistema de distribución, se produce un incremento en la corriente del sistema y una reducción en los valores de tensión. Como las únicas

medidas disponibles están en la subestación, se caracterizarán las fallas con las señales de tensión y corriente que allí se miden. Los aparatos de medida en las subestaciones nos pueden proveer los valores rms, los valores máximos y mínimos de la tensión y la corriente.

La señal de tensión medida en la subestación experimental, generalmente, un hueco de tensión, como el mostrado en la figura 40. Según el estándar IEEE Std 1159 y la norma colombiana NTC 5000, un hueco de tensión se define como la reducción del valor eficaz de la tensión entre el 0,9 y 0,1 p.u. de su valor nominal, durante 8,33ms a 1 minuto, caracterizada a frecuencia industrial (60Hz en Colombia).

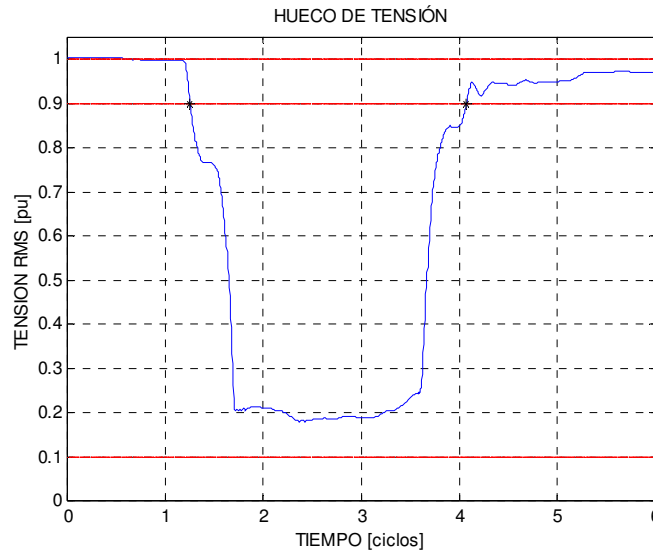


Figura 40. Hueco de tensión visto por una S/E en condición de falla

A través de la caracterización del hueco de tensión medido en la subestación, es posible describir una falla y encontrar su probable localización. Los descriptores planteados en este trabajo son una modificación de la propuesta encontrada en [Mor03].

La figura 41 presenta de una manera gráfica cada uno de los descriptores. La definición formal es la siguiente:

- **Magnitud (h):** es la medida, en estado de falla, de la máxima reducción o elevación del valor rms de las señales de tensión del sistema. Si la tensión rms es menor a uno en p.u, representa una reducción y se calcula por $1 - V_{min}$. Si es mayor a uno en p.u, representa una elevación y se calcula mediante $1 - V_{max}$.
- **Pendiente de descenso (mf):** es la rata de variación inicial que presenta cada una de la señales de tensión al ocurrir la falla. Esta se calcula mediante la linealización de la señal desde la detección del hueco de tensión ($V < 0.9$ p.u), hasta el punto de estabilidad de la señal en falla.

- **Pendiente de ascenso (ms):** es la rata de variación final que presenta cada una de la señales de tensión al ocurrir la falla. Se calcula de manera análoga a la pendiente de descenso.
- **Duración del hueco (ds):** tiempo máximo durante el cual el valor rms de la tensión está por debajo de 0.9 p.u.
- **Duración de estado mínimo (dms):** tiempo durante el cuál el valor rms de la tensión permanece en una banda de amplitud α sobre el valor de la magnitud de tensión. En este caso se selecciona $\alpha=0,2*h$.

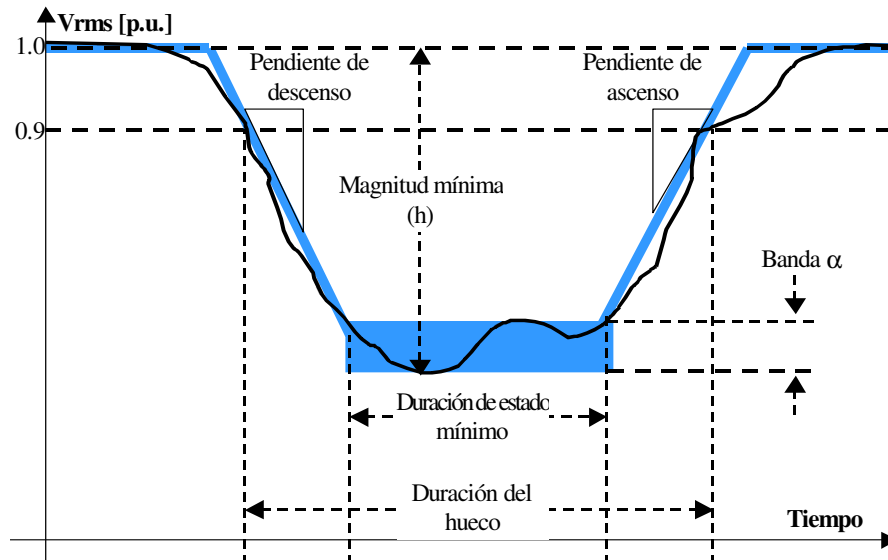


Figura 41. Descriptores monofásicos del hueco de tensión

Los descriptores anteriormente mencionados son sencillos de obtener debido a que solamente es necesaria la señal rms de tensión y un algoritmo simple de procesamiento. Debido a que dos fallas ubicadas en dos lugares diferentes dentro del sistema de distribución, vistas desde la subestación podrían producir huecos similares y localizarse erróneamente, se concluye que esta información no es suficiente para determinar la ubicación del evento, pero al observar el comportamiento de las fases no falladas, las tensiones de línea y de secuencia cero se obtiene una marcada diferencia entre estas fallas. Por lo tanto, las señales sobre las cuales se aplicará serán las tensiones de fase, línea y en algunos casos, la tensión de secuencia cero [MG05].

Para la obtención de estos descriptores es importante tener en cuenta dos aspectos:

1. Ubicar el estado estable del hueco de tensión. Esto es necesario debido a que la parte transitoria del hueco de tensión varía con respecto al ángulo de incidencia de la falla como se muestra en la figura 42.

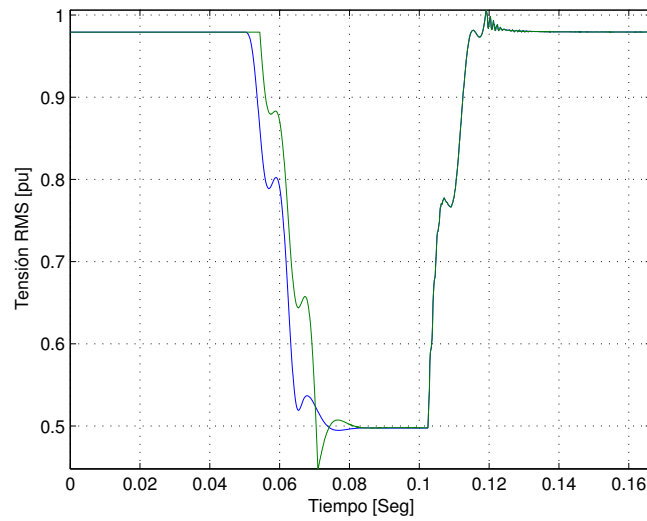


Figura 42. Falla monofásica en la misma fase a diferente ángulo.

2. Tiempo de inicio del hueco. Durante las fallas monofásicas y bifásicas una o varias fases no presentan huecos. Por lo tanto, es necesaria la referencia de una de las fases falladas para el cálculo del descriptor de pendiente y duración. En el caso de la falla monofásica, la referencia será la fase fallada y en el caso bifásico, son utilizados los intervalos de tiempo del hueco más profundo para observar las demás señales de tensión. La figura 43 muestra los descriptores de las tensiones de fase para una falla monofásica en la fase C. Nótese que la fase C provee los intervalos de tiempo para obtener los descriptores de las fases A y B.

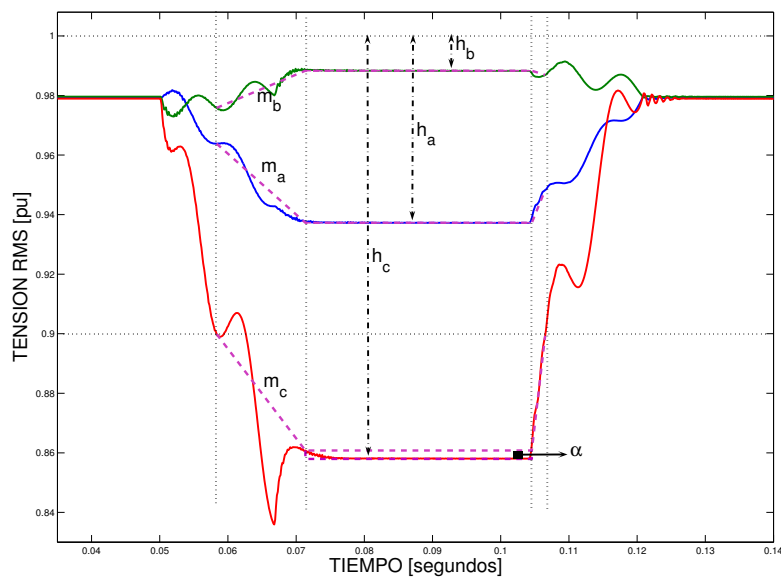


Figura 43. Descriptores basados en los intervalos de la fase fallada.

5.3 METODOLOGÍA MEDIANTE SVM

A continuación se explica el procedimiento utilizado para la caracterización de un sistema en condiciones de falla y su aplicación con las máquinas de soporte vectorial. En el capítulo 7 se presenta un ejemplo de implementación de la metodología.

5.3.1 Selección de descriptores

De los descriptores planteados en la sección 5.2 se seleccionaron los extraídos a partir de la caracterización del hueco de tensión para que la metodología implique equipos de no muy alta tasa de muestreo y por ende más general, más económica y accesible al mayor número de empresas operadoras de red.

Se definieron 31 grupos con las combinaciones todos los descriptores y se probaron en la localización de zonas utilizando SVM. Las tensiones utilizadas fueron de fase, de línea y de secuencia cero y combinaciones entre ellas (Para un mayor detalle consultar [MG05]). Se realizó una comparación entre los resultados obtenidos por tipo de falla, como el presentado en la Tabla 2 para la falla monofásica. Los datos para tal comparación se obtuvieron del sistema prototipo implementado (ver sección 7.1)

El desempeño de la SVM, se mide a partir de sus aciertos definidos como se muestra en la ecuación (5.1) sobre los datos de prueba. Cabe resaltar que estos datos de prueba no se utilizan en el entrenamiento y por tanto este porcentaje es una medida del comportamiento de la máquina clasificadora ante datos desconocidos.

$$\% \text{ precisión} = \frac{N^{\circ} \text{ datos clasificados correctamente}}{N^{\circ} \text{ total de datos}} * 100 \quad (5.1)$$

Grupo	Descriptores					Exactitud entrenamiento	Exactitud Test
	Vh	Vmf	Vms	ds	dms		
1	•					0.67532	0.62
2		•				0.64935	0.575
3			•			0.95238	0.685
4				•		0.47619	0.68
5					•	0.45455	0.675
6	•	•				0.77489	0.815
7	•		•			0.93939	0.7
8	•			•		0.70996	0.66
9	•				•	0.70563	0.665
10		•	•			0.93939	0.7
11		•		•		0.70996	0.65
12		•			•	0.67532	0.625
13			•	•		0.96104	0.685
14			•		•	0.93506	0.695
15				•	•	0.50216	0.72
16	•	•	•			0.95671	0.68
17	•	•		•		0.77056	0.805

18	•	•		•	0.77922	0.81
19	•		•	•	0.96537	0.69
20	•		•	•	0.9697	0.685
21	•			•	0.73593	0.695
22		•	•	•	0.95671	0.715
23		•	•	•	0.97403	0.705
24		•		•	0.72727	0.66
25			•	•	0.97403	0.705
26	•	•	•	•	0.9697	0.685
27	•	•	•	•	0.94805	0.72
28	•	•		•	0.79221	0.83
29	•		•	•	0.96104	0.71
30		•	•	•	0.96537	0.67
31	•	•	•	•	0.95238	0.705

Tabla 2. Resultados comparativos descriptores ante falla monofásica

Como se observa en la Tabla 2, para la falla monofásica, con los grupos 6, 18 y 28 se obtiene buena precisión tanto de entrenamiento como de prueba. Sin embargo, el grupo que presenta ventajas adicionales es el grupo 6, por las siguientes razones:

- Sólo son necesarios dos descriptores (la profundidad del hueco - Vh y la pendiente de descenso -Vmf) facilitando el procesamiento de la información.
- Los descriptores sugeridos son calculados con la primera parte del evento, lo cual tiene ventaja de tiempo de adquisición de la información, que facilitará su implementación en tiempo real.

Un resultado similar se presentó para los demás tipos de fallas. El resultado final es presentado en la Tabla 3. La ventaja de obtener estos resultados es que con muy poca información tomada de los valores rms, es posible localizar fallas en los sistemas de distribución. Adicionalmente, sólo es requerida la señal de tensión para la obtención de la información.

Tipo de falla	Descriptores seleccionados
Monofásica	Profundidad y pendiente de descenso de las tensiones de fase, línea y secuencia cero
Bifásica	Profundidad y pendiente de descenso de las tensiones de fase y línea
Bifásica a tierra	Profundidad y pendiente de descenso de las tensiones de fase, línea y secuencia cero
Trifásica	Profundidad y pendiente de descenso de las tensiones de fase y línea

Tabla 3. Descriptores obtenidos para cada tipo de falla

5.3.2 Zonificación de la red

En principio, las SVM estimarán una zona probable de ubicación de la falla. Cada zona es una clase para la máquina. Por lo tanto se debe analizar el circuito en el cual se localizarán las fallas para agrupar los nodos o ramales en zonas. El criterio de zonificación queda a cargo del operador que implemente esta metodología, basado en el conocimiento de la topología, protecciones, longitudes de las redes, usuarios, estrato, etc., de su sistema. Sin embargo, se recomienda utilizar una zona por cada circuito ramal para eliminar la múltiple estimación.

5.3.3 Adquisición de datos de falla

Se refiere a la creación de una base de datos que contenga las señales vistas en la subestación cuando ha ocurrido una falla en el sistema de distribución. Esta puede ser obtenida basada en el historial de fallas existente en la subestación o por la simulación del sistema fallado con algún software especializado.

5.3.4 Preprocesamiento de la señal

En esta etapa se plantea la caracterización del sistema basada en el cálculo de descriptores de la señal de tensión, corriente u otras señales como temperatura, estado de las protecciones, etc. Como se presentó en la sección 5.3.1, en la presente investigación se utilizarán sólo las señales de tensión. Así, se obtiene el valor eficaz de las tensiones de fase, línea y secuencia cero. Seguidamente se obtienen los descriptores para cada falla y se guardan como vectores. Estos a su vez son agrupados y etiquetados dependiendo de la zona a la cual pertenece la falla.

Se realiza un escalamiento simple de los vectores (entre [-1,1]) Ver [LCH04]. Este paso es muy importante para evitar dificultades numéricas durante los cálculos. Se puede utilizar el escalamiento que se desee y se recomienda escalar únicamente los descriptores de pendiente.

5.3.5 Entrenamiento de la SVM

Como se presentó en el capítulo 4, las máquinas de soporte vectorial necesitan la definición a priori tanto del parámetro de penalización C , como de la función kernel y sus respectivos parámetros. Para el presente estudio, se realizaron diversas pruebas para encontrar los parámetros más adecuados. El modelo de mejores resultados se logró con el Kernel RBF. Para el entrenamiento se toma el 70% - 80% de los datos simulados. Para un mayor detalle de la pruebas realizadas consultar [MG05].

Se proponen dos esquemas para la localización de fallas mediante SVM [MG05]:

- Localizador independiente del tipo de falla
- Localizador dependiente del tipo de falla

5.3.5.1 Localizador independiente del tipo de falla - LIF

Para este esquema propuesto se trabaja con dos clasificadores independientes entre sí, cuya conexión se muestra en la figura 44.

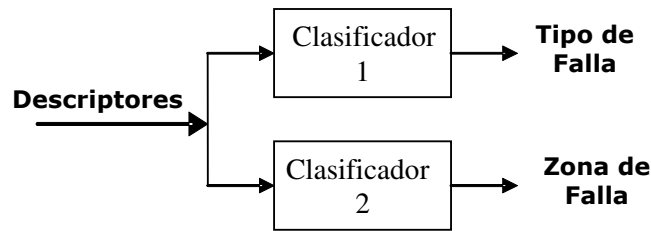


Figura 44. Esquema Localizador independiente del tipo de falla (LIF)

El clasificador 1 es la encargada de especificar el tipo de falla, según su clase:

- Clase 1: Falla monofásica.
- Clase 2: Falla bifásica.
- Clase 3: Falla bifásica a tierra.
- Clase 4: Falla trifásica y falla trifásica a tierra⁶.

El descriptor utilizado por este clasificador es la profundidad del hueco de tensión de las tensiones de fase y la tensión de la secuencia cero.

El clasificador 2 se encarga de encontrar la zona donde ocurrió la falla dentro del circuito, según la zonificación realizada. Los descriptores utilizados por este clasificador son la profundidad y pendiente de descenso de las tensiones de fase, línea y secuencia cero

5.3.5.2 Localizador dependiente del tipo de falla - LDF

En esta configuración se trabaja con dos etapas conectadas en serie como se presenta en la figura 45.

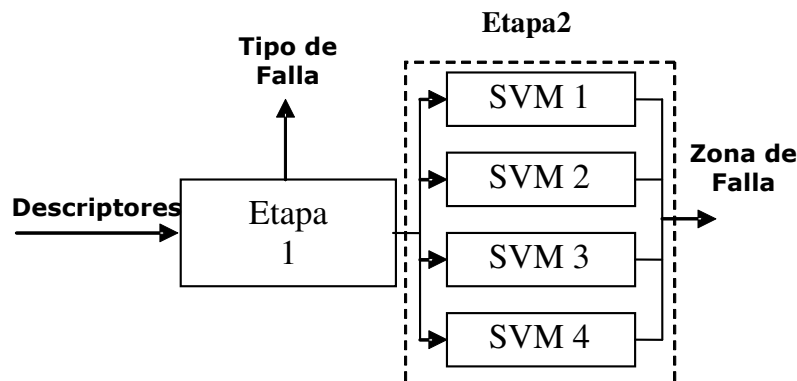


Figura 45. Esquema Localizador dependiente del tipo de falla (LDF)

La etapa 1, compuesta por una SVM, tiene como objetivo determinar el tipo de falla. Es el mismo clasificador 1 del esquema LIF (ver sección 5.3.5.1). La salida de esta etapa activa la etapa 2 del esquema.

⁶ Las fallas trifásicas y trifásicas a tierra son fallas simétricas y dado los descriptores planteados en esta investigación no existe una clara diferenciación de estas dos fallas, por ello se consideran como una sola clase.

La etapa 2 está conformada por cuatro SVMs especializadas en cada tipo de falla. Una de estas SVMs se activa dependiendo de la salida de la etapa 1. Cada una de éstas puede determinar la zona más probable de localización de la falla para una única clase de falla. Los descriptores utilizados varían dependiendo del tipo de falla, como se presenta en la Tabla 3.

5.3.6 Pruebas de precisión y análisis de resultados

Se realiza una prueba final con datos desconocidos con el fin de obtener la precisión del modelo. Estos son generalmente el 20% o 30 % de la base de datos y son extraídos justo antes de la etapa de entrenamiento de la SVM. En caso de no estar preprocesados estos datos, deben recibir exactamente el mismo tratamiento dado a los datos de entrenamiento en la etapa de preprocesamiento.

Los resultados obtenidos son analizados para detectar las causas de éxito y error. Esto determina los parámetros más adecuados para el procesamiento de los datos mediante SVM en la localización de fallas. Es importante decir que las SVM no producen "magia", sino que dependiendo de la caracterización realizada (descriptores) y de los parámetros con la cual es entrenada, se obtienen buenos resultados.

6 DESARROLLO DEL SISTEMA HÍBRIDO

6.1 INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas muchas herramientas de soporte en la toma de decisiones se han desarrollado en el campo de la computación suave y la inteligencia artificial. En cada uno de los problemas reales, generalmente complejos, la mayoría de desarrollos tratan de aprovechar las ventajas de cada una de las éstas técnicas.

En este capítulo se presenta una breve introducción a los sistemas híbridos y la arquitectura aplicada al problema de localizar fallas.

6.2 SISTEMAS HÍBRIDOS

La mayoría de investigaciones, han demostrado que con la unión de algunas técnicas, se puede obtener una mejor respuesta a la necesidad planteada por algún problema en particular. De manera general, en la literatura especializada, a todo sistema que integra dos o más métodos diferentes se le conoce como un "sistema híbrido". Sin embargo, existen diferentes formas de integración de métodos con características claramente definidas [MMC05].

Existen cuatro formas de integración de técnicas claramente definidas: de componente simple, fusión-base, jerárquicos e híbridos.

Sistemas de componente simple: Emplean una sola técnica y buscan la forma de adaptarla para obtener la mejor solución al problema propuesto.

Sistemas basados en fusión: Incluyen sistemas que combinan diferentes técnicas en un modelo único de computación. Las ventajas de cada técnica empleada son aprovechadas para realizar un mapeo desde un espacio de entrada hacia uno de salida.

Sistemas jerárquicos: Se conforman de varios módulos y el sistema se diseña de tal forma que cada función es ejecutada por la técnica que brinde mejores resultados para el subproblema particular, en una estructura como la presentada en la figura XX. Su correcto funcionamiento depende de la operación de las partes que lo conforman; así, un posible error en una de las partes tiende a propagarse afectando el desempeño general. El sistema no tiene lazos de realimentación o de atenuación de errores y cada técnica trabaja de manera aislada

Sistemas híbridos: tienen una arquitectura en la cual interaccionan todas o algunas de las técnicas empleadas, como la presentada en la figura 46. La interacción permite explotar la integración de técnicas y su mutualidad. De esta forma se aprovechan las ventajas de diferentes técnicas para la solución de tareas específicas.

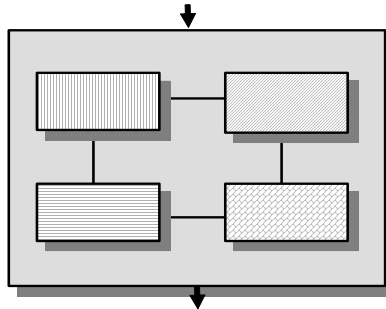


Figura 46. Esquema del sistema híbrido

La utilización de un sistema híbrido tiene ventajas, tales como [Inv03]:

- La integración de dos técnicas complementarias, permite que una mejore las deficiencias de la otra, de forma que se pueda obtener un mejor desempeño.
- El uso de diferentes técnicas de representación del conocimiento, amplía la capacidad del sistema de recibir nueva información. Un solo método aumenta las imposiciones y restringe el sistema, dificultando la solución del problema.
- Algunos sistemas complejos, que no pueden ser abordados a través de una sola técnica para su solución pueden ser divididos en subproblemas, y tratarlos individualmente para obtener una solución global óptima del problema.
- El procesamiento en paralelo de la información en diferentes módulos, permite obtener un sistema con mayor desempeño, más robusto, y con una mayor tolerancia a fallos.

En conclusión, con la utilización de sistemas híbridos o la integración de varios módulos que cooperan entre si, cada uno con sus especificaciones, se busca mejorar el tratamiento que se da a un objetivo común o a la solución de un problema .

6.3 ARQUITECTURA PROPUESTA

Se describirán tres arquitecturas de sistemas híbridos encontrados en la literatura. El último basado en agentes es el implementado en este trabajo para la propuesta del sistema híbrido de localización.

6.3.1 Sistema SYNHESYS

El sistema SYHNESYS, se compone de dos módulos principales, un modulo simbólico (MS) y un modulo conexionista (MC). Estos dos módulos pueden ser utilizados en paralelo en un modo de cooperación o bien puede realizarse transferencia de conocimiento entre los dos.

Los dos módulos poseen el mismo número de entradas provenientes de una situación, produciendo cada uno de estos una decisión que puede ser analizada por un experto [San91][SV99].

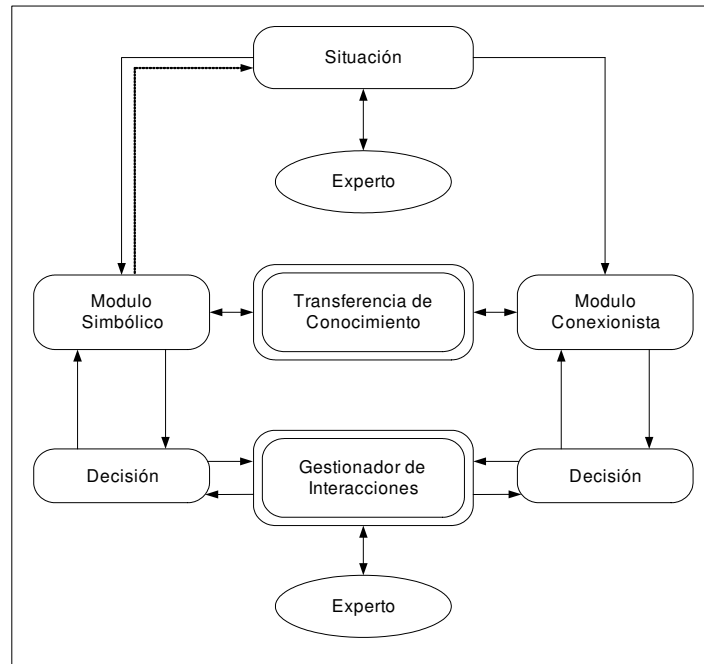


Figura 47. Esquema del sistema SYNHESYS

Módulo simbólico: trabaja sobre reglas proporcionales de orden O^+ . Estas reglas representan el conocimiento teórico del sistema y su problema en cuestión.

Modulo conexionista: esta compuesto por una red de tres capas (multicapas): una capa de entrada, una capa oculta de prototipos y una capa de salida donde se reagrupa las decisiones.

Transferencia de conocimiento: en esta parte el sistema transfiere los conocimientos entre los módulos, estos pueden ser de dos tipos:

- MS hacia el MC: transferencia de una base de reglas en una red (compilación de reglas).
- MC hacia el MS: transferencia de los conocimientos obtenidos por la red a una base de reglas (extracción de reglas).

Gestionador de interacciones: presta cooperación entre los módulos (MS y MC) del sistema. Se puede tener diferente tipo de iteración entre los módulos, estos dependen del orden utilizado para ser consultados, la forma de ser interpretados los resultados y las prioridades otorgadas a las respuestas de los módulos.

6.3.2 Sistema KBANN

El funcionamiento de este sistema, sirve de prototipo de los sistemas expertos híbridos simbólico-conexionistas, en la medida que se presenta transferencia de conocimiento [Tow91]. Esta transferencia de conocimiento recibe el nombre de compilación de reglas, cuando se transfiere conocimiento de un MS hacia un MC y extracción de reglas cuando la transferencia es hecha de un MC hacia un MS. A continuación se presentara en la figura 48 la estructura del sistema KBANN.

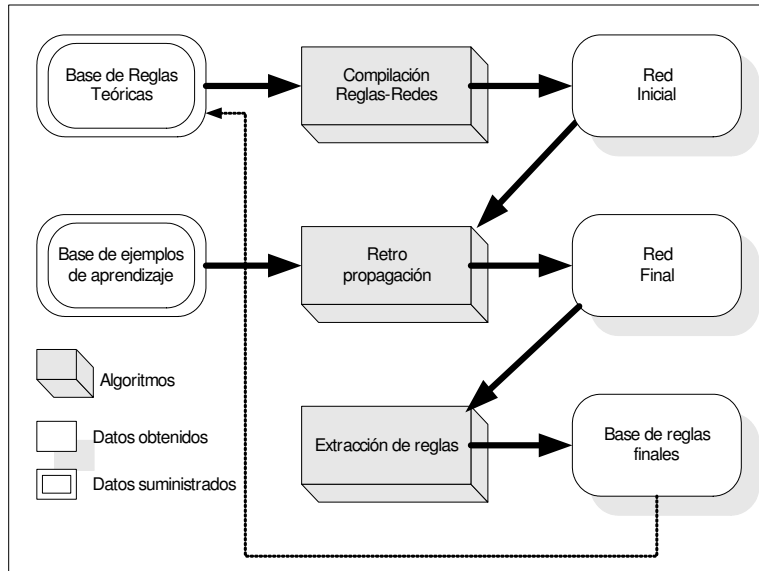


Figura 48. Esquema del sistema KBANN

Funcionamiento del sistema global [Gia92]:

Etapa 1: Inicialmente una base de reglas es construida e implementada en el MS con el fin de modelar los conocimientos de un tema en concreto.

Etapa 2: La base de reglas obtenidas es compilada en forma de una red conexionista multicapas, por lo tanto la transferencia que se presenta es de un MS hacia un MC.

Etapa 3: Se le introduce perturbaciones a la red conexionista, las cuales pueden ser: añadir unidades ocultas, añadir nuevas unidades de entrada y realizar cambios en las unidades de activación.

Etapa 4: El conocimiento de la red conexionista es beneficiado por el aprendizaje de ejemplos.

Etapa 5: El conocimiento de la red es convertido en nuevas base de reglas, las cuales sustituirán las reglas iniciales del MS (vuelve más explícito el conocimiento).

6.3.3 Sistema a partir del paradigma de Agentes

La estructura del sistema híbrido de localización de fallas diseñada, se fundamenta en la propuesta de estructura general basada en agentes. Los agentes tienen una arquitectura basada en la interacción de varios módulos con un sistema de realimentación que permite su mejor desempeño interno, así como la medición y adaptación de las acciones de acuerdo con el efecto de ellas sobre el medio. La figura 49 presenta el esquema general.

Las partes que interactúan en la arquitectura son:

- **Ambiente.** En él se encuentra el proceso por controlar, el espacio de decisión por analizar o el problema de aprendizaje por resolver. Entra en contacto con el agente a

través de los sensores; asimismo, los efectores se constituyen en el medio de acción del agente.

- **Elemento de desempeño.** Tiene el conocimiento necesario para controlar los efectores y, por tanto, las diferentes acciones sobre el ambiente.

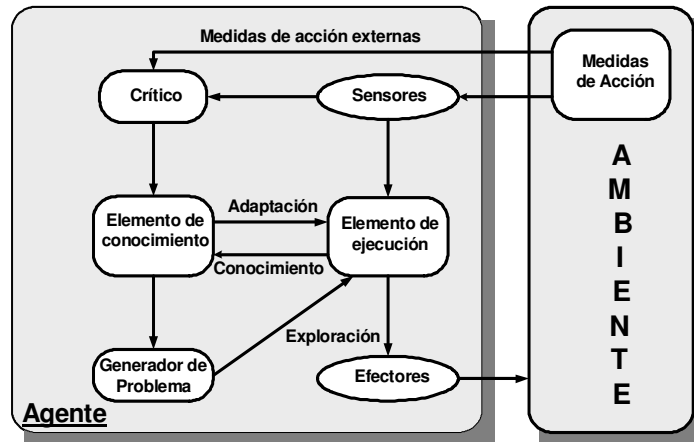


Figura 49. Arquitectura funcional de un agente.

- **Elemento de aprendizaje.** Actualiza el conocimiento representado en el elemento de desempeño para optimizar las acciones del agente. Tiene acceso a los estados del ambiente, a las acciones anteriores y a una señal de refuerzo inmediato de las acciones, que indica la idoneidad de la última acción sobre el medio. Después de recibir la información, el elemento de desempeño se adapta para que las futuras acciones sean más pertinentes.

- **Crítico.** Se encarga de transformar una señal externa de refuerzo en una interna. El problema general es que la señal externa es muy leve o puede indicar algún tipo de fallo complejo, y debe traducirse en una señal de refuerzo útil como elemento de aprendizaje, con el propósito de resolver el problema en forma adecuada. La señal de refuerzo indica cuándo una acción es o no adecuada.

- **Generador del problema.** Su función es contribuir a la exploración del espacio del problema. En forma abstracta, propone diferentes acciones que pueden permitir descubrir nuevas y mejores soluciones. En muchos de los sistemas existentes esto se logra mediante la adición de ruido a la acción de salida; si el sistema aún se desempeña bien puede decidirse que no se necesita una nueva solución; en caso contrario es necesario buscar mejores alternativas para la solución del problema

De esta manera, la estructura del sistema híbrido aplicado a localización de fallas se presenta en la figura 50.

En este caso el crítico es solo un elemento de validación que determina la distancia real a la cual ocurrió la falla, y la distancia estimada. Esta herramienta solo debe actuar en el periodo de entrenamiento de la SVM, con el fin de incluir en la base de

aprendizaje solo los ejemplos que conducen a resultados aceptables dentro de un margen de tolerancia.

El elemento de aprendizaje está constituido por la técnica máquinas de soporte vectorial (SVM) y tiene como entradas las señales preprocesadas en forma de descriptores y la señal de refuerzo del aprendizaje definida por el crítico. Las SVM mediante el reconocimiento de características de las señales de tensión, determinan una zona de ocurrencia probable de la falla.

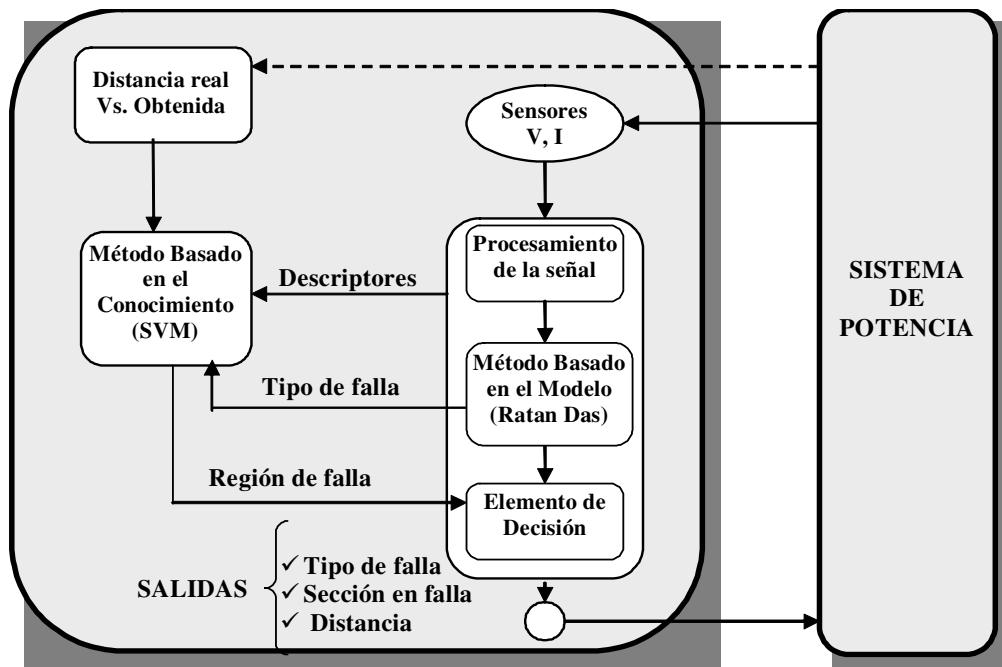


Figura 50. Sistema híbrido basado en MBC y MBM para localización de fallas

El elemento de ejecución está conformado por el método basado en el modelo (MBM). Como MBM se implementó el algoritmo de localización de fallas de Ratan Das, el cual basado en las medidas de tensión y corriente, encuentra el tipo de falla, la distancia aproximada y los puntos probables de ocurrencia del evento. Generalmente existen 2 o más posibilidades distintas del lugar de ocurrencia de la falla.

Las otras partes que conforman el elemento de ejecución son el elemento de decisión y el de procesamiento de la señal. Mediante una estrategia de resolución de conflictos (simple intersección o ajuste de pesos), el elemento de decisión obtiene la salida. De esta forma, el sistema determina el tipo de falla, la distancia y una única sección de ocurrencia del evento.

El elemento generador de problema es el ruido que puede tener la señal introducida por los sensores, o que se desprende del procesamiento de la señal por la pérdida de información significativa.

Dado que no se efectúa ninguna acción sobre el sistema no existe un elemento actuador propiamente dicho⁷. Básicamente los sensores son los transformadores de tensión y de corriente, así como los registradores de eventos existentes en las subestaciones.

⁷ Desarrollos posteriores podrán considerar alguna alternativa de acción al respecto, dado que el trabajo futuro será aplicado al desarrollo de elementos de protección para líneas de distribución

7 PRUEBAS DESARROLLADAS

7.1 INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se presentan las pruebas al modelo híbrido propuesto. Inicialmente se describe el sistema de distribución prototipo utilizado en la construcción e implementación del modelo, para luego presentar los resultados obtenidos.

7.2 DESCRIPCIÓN DEL CIRCUITO PROTOTIPO

El sistema de distribución seleccionado para las pruebas de la metodología propuesta es el modelo de sistema utilizado en [Das98]. Este circuito ha sido utilizado para pruebas de distintos métodos de localización de fallas, como los encontrados en [MG05] y [JLCK02]. El diagrama unifilar de este sistema se muestra en la figura 51. En el apéndice A.2 se presentan las especificaciones del sistema y los parámetros de las líneas y cargas.

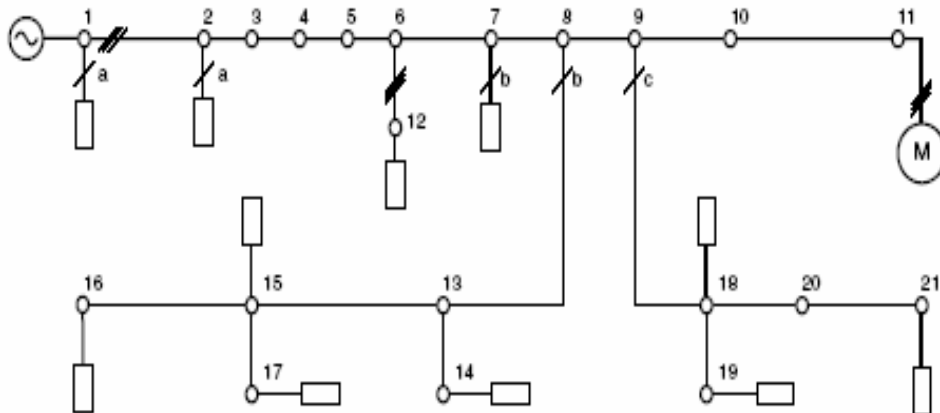


Figura 51. Diagrama unifilar del modelo de sistema de distribución prototipo.

El modelo utilizado es el de un circuito alimentador de distribución típico. Algunas de las características del sistema son:

- Tensión nominal de 25 kV
- 12 Cargas monofásicas y trifásicas distribuidas a lo largo del circuito
- El sistema está compuesto por ramales monofásicos y trifásicos, los cuales presentan diferentes secciones de conductor en varios tramos de las líneas.
- Las medidas de tensión y corriente se realizan en la cabecera del circuito (nodo1)

El sistema fue simulado mediante ATP/EMTP y se presenta en la figura 52. A continuación se describirán brevemente los modelos utilizados para representar cada uno de los componentes de los sistemas de distribución tales como: fuentes de tensión, circuitos alimentadores y cargas.

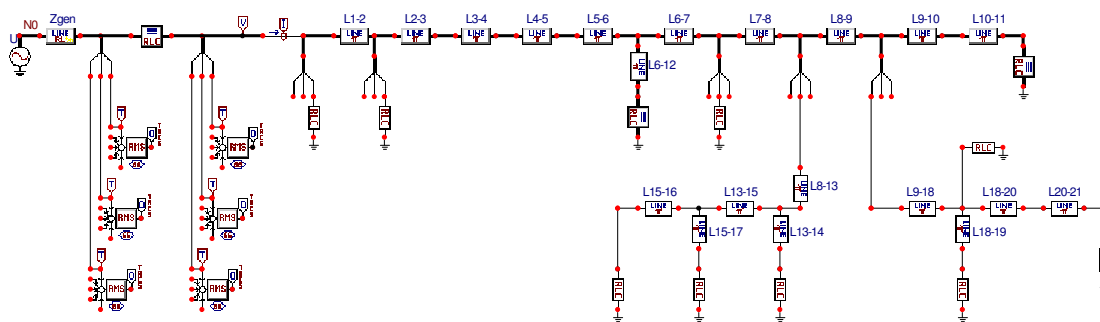


Figura 52. Circuito prototipo implementado en ATP/EMTP.

7.2.1 Modelo de la fuente

Esta componente corresponde a la fuente de alimentación del sistema de distribución, el modelo utilizado para la representación de la fuente de tensión trifásica tiene presente las siguientes consideraciones:

- Las tensiones son sinusoidales de única frecuencia.
- La fuente es trifásica balanceada
- Presenta una conexión "Y" con neutro aterrizado

Las tensiones generadas por el modelo en ATP/EMTP están descritas por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned}
 V_A(t) &= \frac{\sqrt{2}|V_{LL\,rms}|}{\sqrt{3}} \sin(120\pi t) \\
 V_B(t) &= \frac{\sqrt{2}|V_{LL\,rms}|}{\sqrt{3}} \sin(120\pi t + 120^\circ) \\
 V_C(t) &= \frac{\sqrt{2}|V_{LL\,rms}|}{\sqrt{3}} \sin(120\pi t - 120^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{7.1}$$

7.2.2 Modelo de línea Trifásica y monofásica

El modelo utilizado para caracterizar cada una de las secciones del sistema de distribución, es el modelo PI de línea de transmisión con parámetros concentrados. El modelo PI maneja los parámetros RLC matricialmente, adicionalmente maneja n conductores. Contrario a los modelos de parámetros distribuidos donde la resistencia, inductancia y capacitancia están uniformemente distribuidas a lo largo de la línea, en la figura 53 se muestra sólo una fase del modelo de línea con parámetros concentrados.

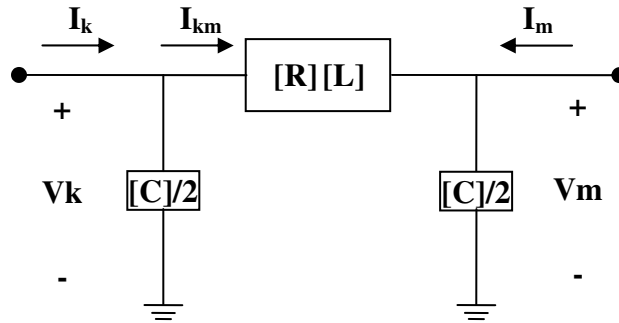


Figura 53. Modelo de la línea de parámetros concentrados

Las expresiones con las cuales se construye el modelo son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 V_k - V_m &= [L] \frac{dI_{km}}{dt} + [R] I_{km} \\
 i_k &= \frac{1}{2} [C] \frac{dV_k}{dt} + I_{km} \\
 i_m &= \frac{1}{2} [C] \frac{dV_m}{dt} - I_{km}
 \end{aligned}
 \tag{7.2}$$

7.2.3 Modelo de carga

Para el modelado de la carga de la figura 54, se tuvieron presente las siguientes observaciones:



Figura 54. Modelo de carga

- La carga es lineal, es decir, el contenido de componentes armónicas en la señal de corriente es el mismo contenido de la señal de tensión. Como la fuente es de naturaleza sinusoidal de única frecuencia, la única componente de frecuencia en la señal de corriente es 60 Hz
- La carga es una combinación en serie de elementos R, L, y C
- El modelo de impedancia es constante
- El modelo es desacoplado y de parámetros concentrados

7.2.4 Simulación

Para la realización de un adecuado proceso de entrenamiento y validación de las herramientas basadas en inteligencia artificial es necesario contar con información suficiente. Debido al tipo y a la cantidad de información requerida, se realizaron una serie de simulaciones del sistema distribución propuesto bajo condiciones de falla en la plataforma ATP/EMTP, con las cuales se logró obtener el banco de registro de señales de tensión y corriente que se necesitaban.

La simulación del circuito se realizó para los diferentes tipos de fallas (monofásicas, bifásicas, bifásicas a tierra, trifásicas y trifásicas a tierra) en todas las barras y con resistencias de falla entre $0,05\Omega$ y 50Ω . De esta manera se obtuvo una base de datos de 1 410 señales de tensión (fase A, B y C) medidas desde la cabecera del circuito. En la Tabla 4 se muestra el número de simulaciones realizadas por cada tipo de falla. Se observa que existe un número menor de simulaciones de fallas bifásicas y trifásicas debido a la aparición de ramales monofásicos en el sistema de distribución.

Tipo de falla	Simulaciones ATP/EMTP	Resistencias de falla [Ω]
Monofásica	450	
Bifásica	360	0.05, 2, 5, 10,15,
Bifásica a tierra	360	20,25,30,35,
Trifásica	120	50
Trifásica a tierra	120	
TOTAL	1410	

Tabla 4. Número de simulaciones realizadas en ATP/EMTP

7.3 PRUEBAS CON EL ALGORITMO DE RATAN DAS

Como se describió en la sección 3.7 el método de Ratan Das determina el tipo y la distancia a la falla. Este algoritmo fue implementado en MATLAB para realizar pruebas con el circuito prototipo. Para un mayor detalle de esta implementación consultar [VQ05].

Los resultados que se presentan a continuación difieren un poco de los presentados por Ratan Das en su tesis doctoral, puesto que las condiciones de simulación son distintas y se incluyeron algunas resistencias de falla adicionales.

7.3.1 Estimación del tipo de falla

La determinación del tipo de falla sigue el diagrama lógico de la figura 30. Se realizaron pruebas con los datos simulados para determinar el tipo de falla, los cuales son presentados en la figura 55.

Los resultados obtenidos verifican que el algoritmo implementado tiene gran precisión para determinar las fases falladas. Los errores cometidos en la falla bifásica a tierra se deben a que el valor de la corriente de secuencia cero es más pequeño a medida que se aleja de la subestación y el algoritmo asume una falla bifásica sin conexión a tierra.

7.3.2 Estimación de la sección en falla

La sección en falla se calcula según lo descrito en la sección 3.7, comparando la impedancia de falla vista desde la subestación con la impedancia propia de la línea. Por esta razón cuando la impedancia es la misma por varios circuitos ramales, el algoritmo determina varias posibles secciones en falla. Esta es la llamada múltiple estimación.

Para el circuito de prueba se encontraron las salidas con única y múltiple estimación. Si bien sólo hay un camino trifásico, existe múltiple estimación para las fallas bifásicas y trifásicas debido a que el algoritmo asume todos los ramales del circuito trifásico. Los resultados obtenidos para el circuito prototipo se presentan en la figura 56.

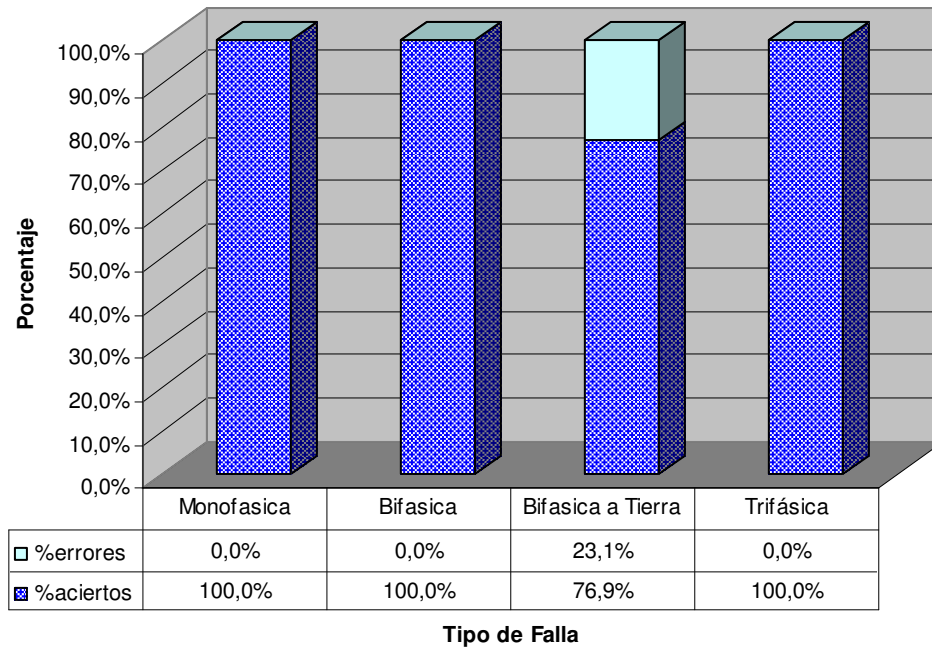


Figura 55. Estimación del tipo de falla del método algorítmico de Ratan Das del circuito prototipo

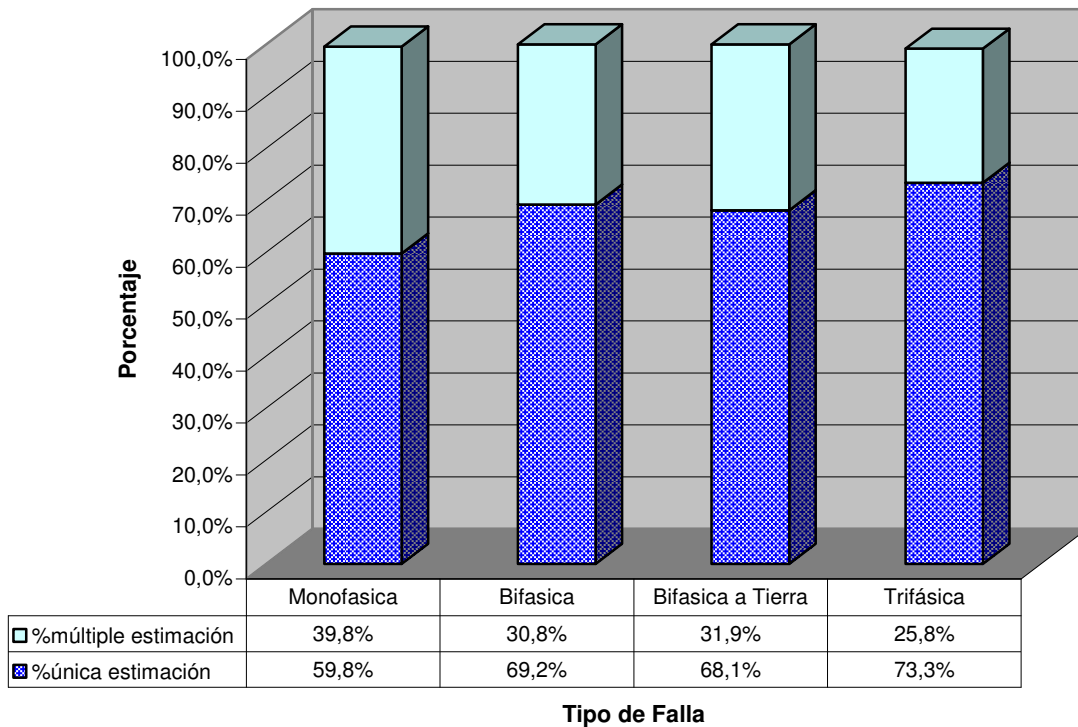


Figura 56. Múltiple estimación del método algorítmico de Ratan Das del circuito prototipo

De la figura 56 se puede concluir que en promedio un 30% de las estimaciones que presenta el algoritmo son múltiples. Este porcentaje depende del número de ramales

que presente el circuito en que se implemente. Este es un porcentaje alto si se tiene en cuenta que sólo existen dos ramificaciones en el circuito. Uno de los objetivos de implementar el sistema híbrido es reducir la múltiple estimación identificando una única sección en falla.

7.3.3 Estimación de la distancia al punto de falla

Las figuras 57 a 66 presentan el porcentaje de error en la estimación de la distancia, para todos los tipos de fallas, de las señales simuladas del circuito. El error se determina con respecto a la distancia real medida desde el nodo alimentador al nodo en falla, como se muestra en la ecuación (7.3).

$$Error_{\%} = \frac{Dis_{real} - Dis_{est}}{Dis_{real}} * 100\% \quad (7.3)$$

Como se puede observar en las gráficas 57 a 59, para las fallas monofásicas el error es menor del 6%, lo cual corrobora la precisión del algoritmo implementado. Por otra parte, la estimación mejora a medida que se aleja de la subestación de distribución. Para resistencia de falla de hasta 25Ω la precisión oscila alrededor del 1%. Un resultado similar se presenta para los demás tipos de fallas (figuras 60 a 66).

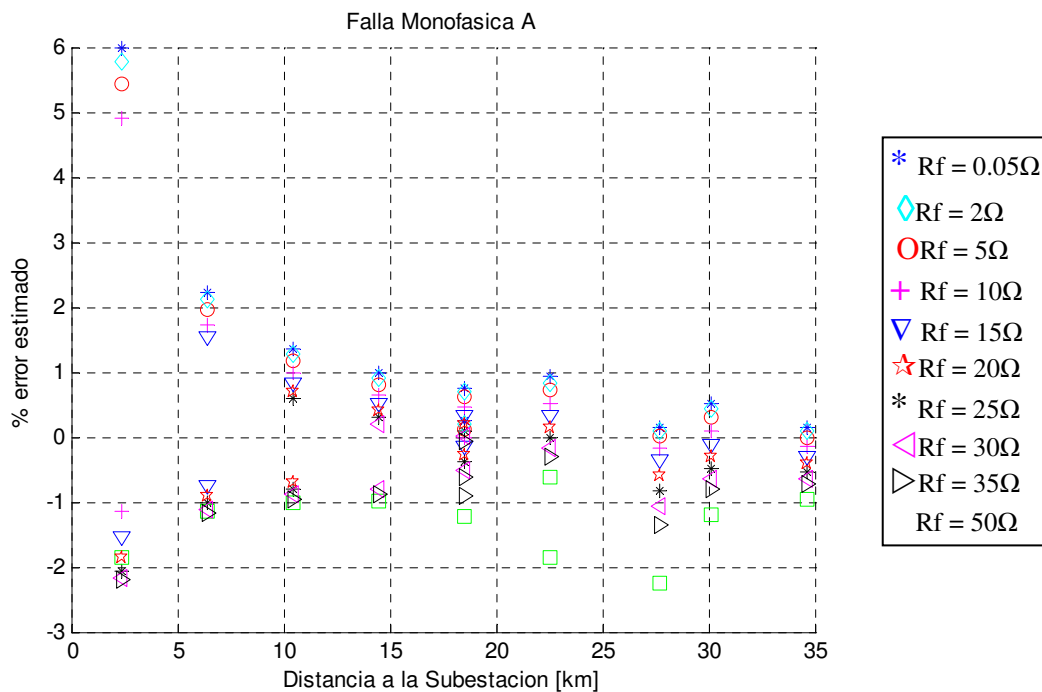


Figura 57. Estimación del error de localización de fallas monofásicas fase A utilizando el algoritmo de Ratan Das

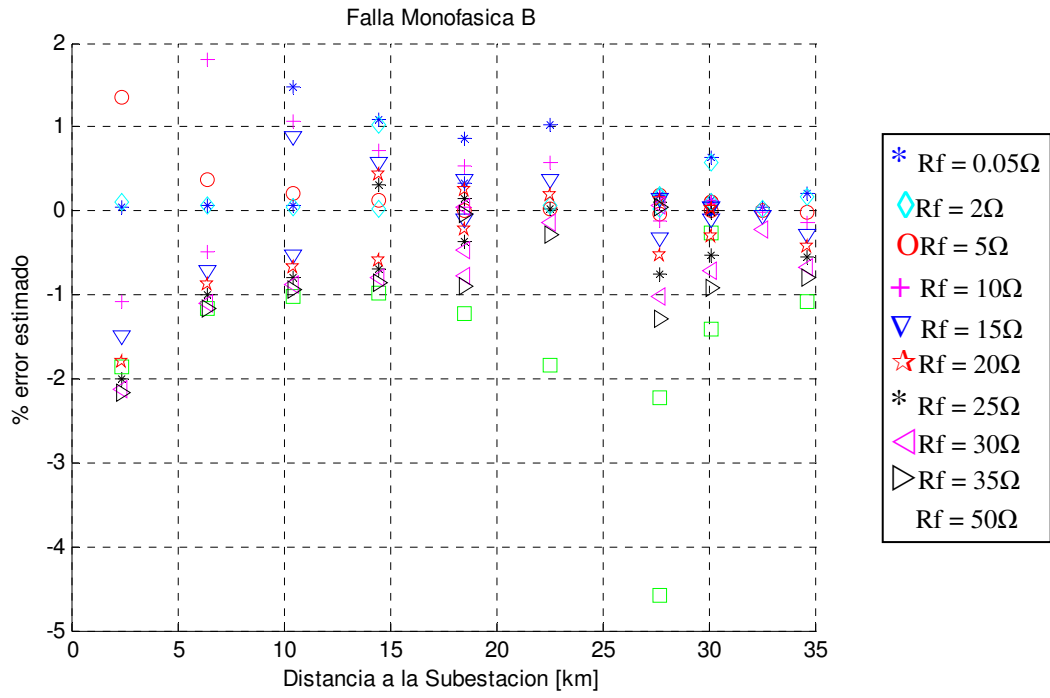


Figura 58. Estimación del error de localización de fallas monofásicas fase B utilizando el algoritmo de Ratan Das

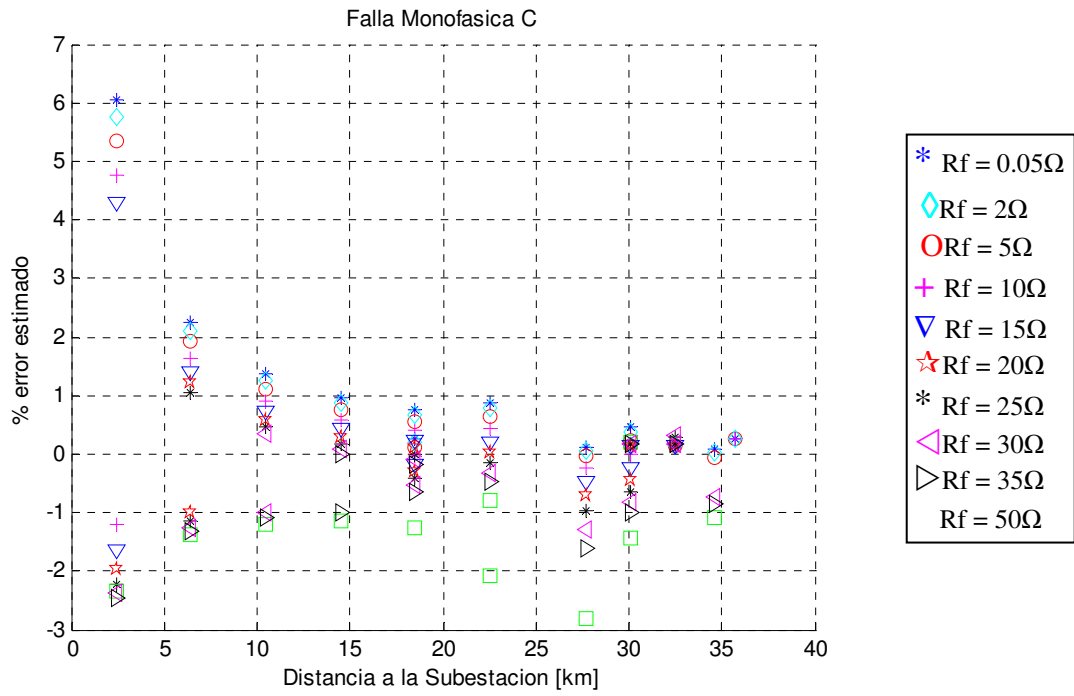


Figura 59. Estimación del error de localización de fallas monofásicas fase C utilizando el algoritmo de Ratan Das

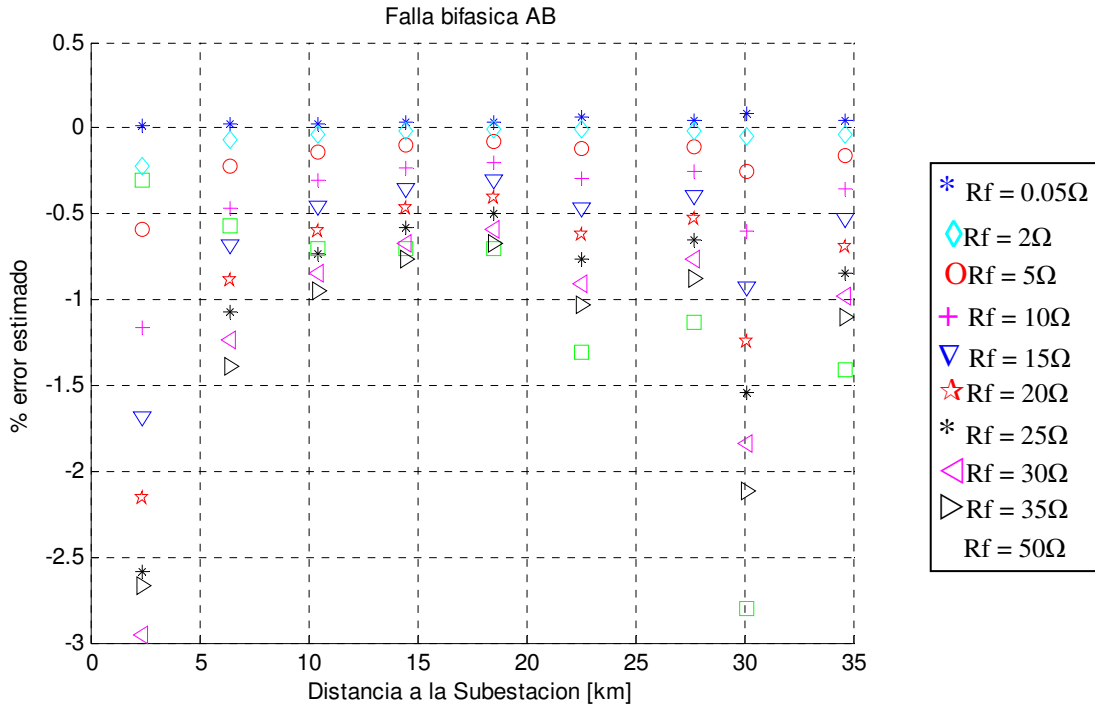


Figura 60. Estimación del error de localización de fallas bifásicas fases AB utilizando el algoritmo de Ratan Das

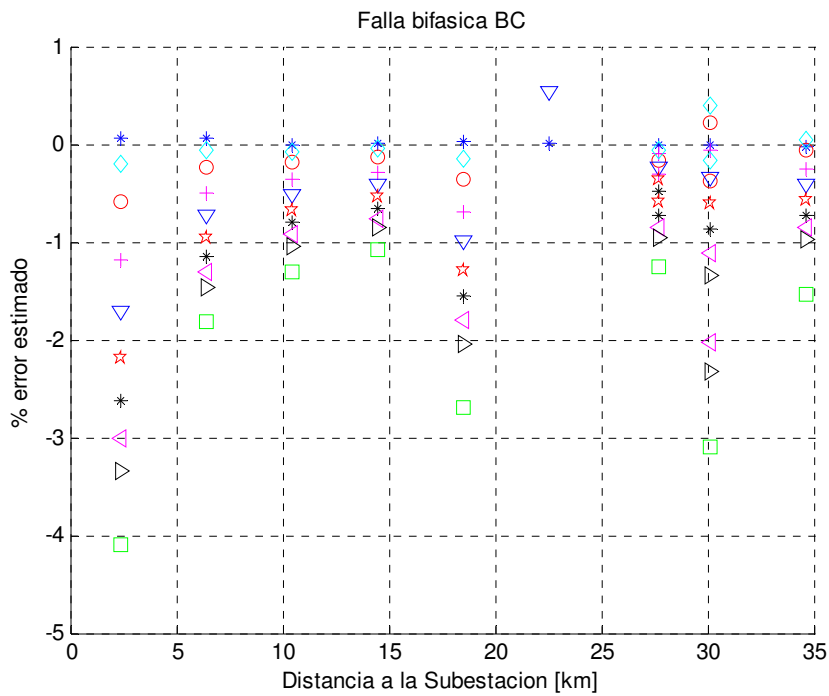


Figura 61. Estimación del error de localización de fallas bifásicas fases BC utilizando el algoritmo de Ratan Das

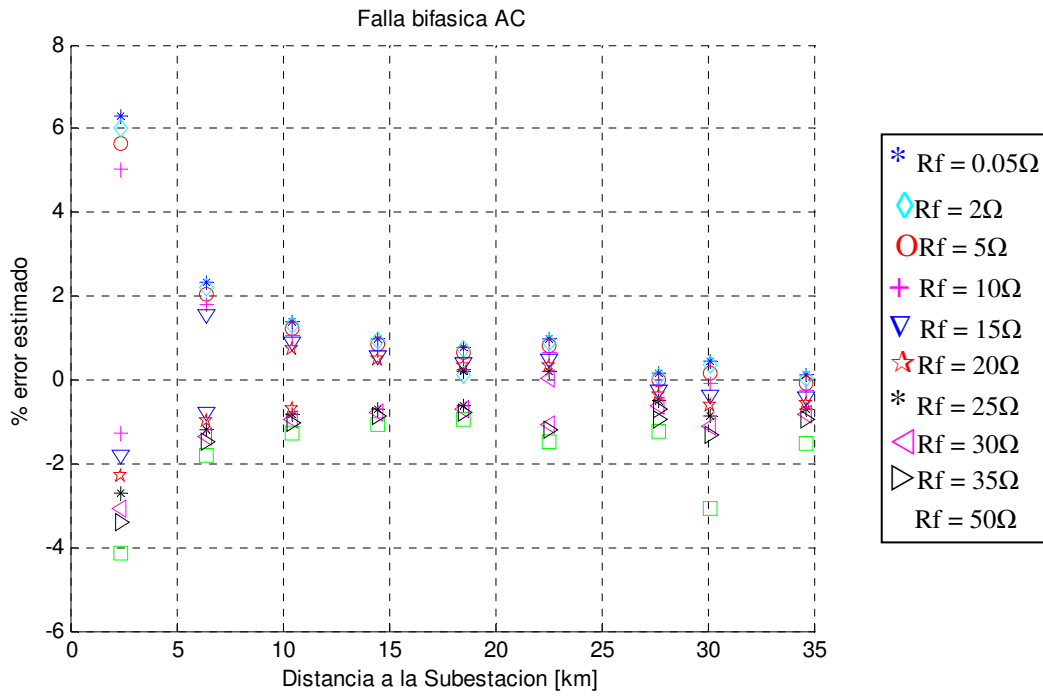


Figura 62. Estimación del error de localización de fallas bifásicas fases AC utilizando el algoritmo de Ratan Das

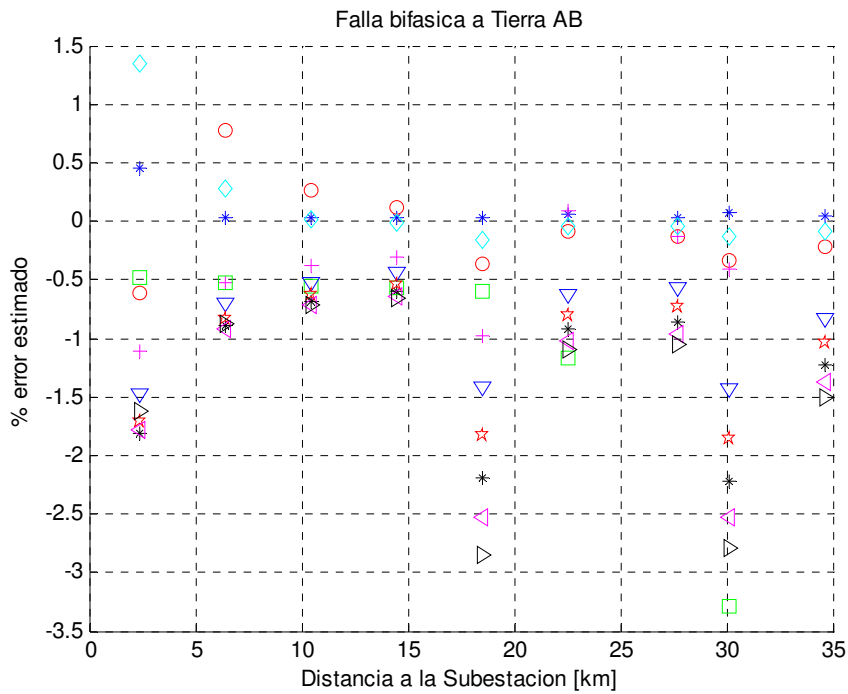


Figura 63. Estimación del error de localización de fallas bifásicas a tierra fases AB utilizando el algoritmo de Ratan Das

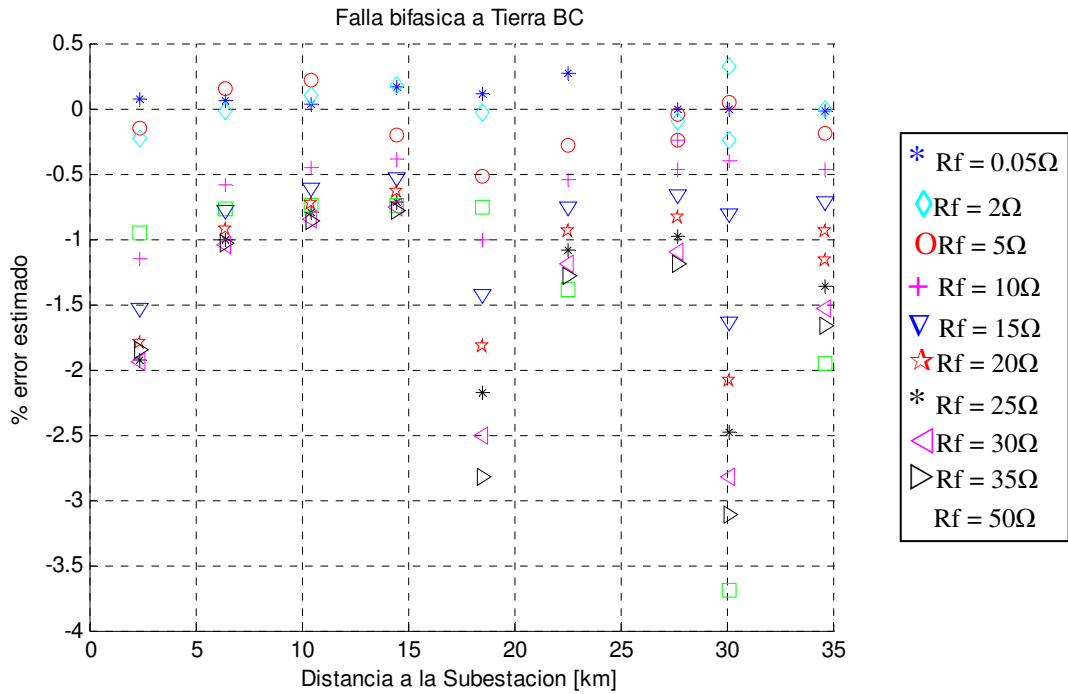


Figura 64. Estimación del error de localización de fallas bifásicas a tierra fases BC utilizando el algoritmo de Ratan Das

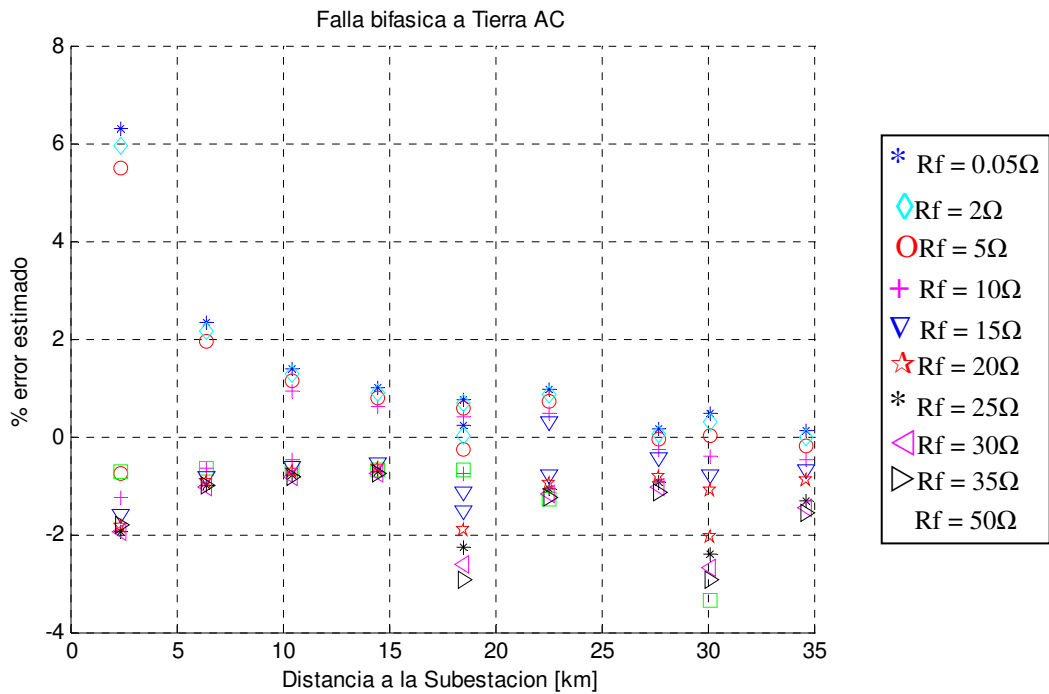


Figura 65. Estimación del error de localización de fallas bifásicas a tierra fases AC utilizando el algoritmo de Ratan Das

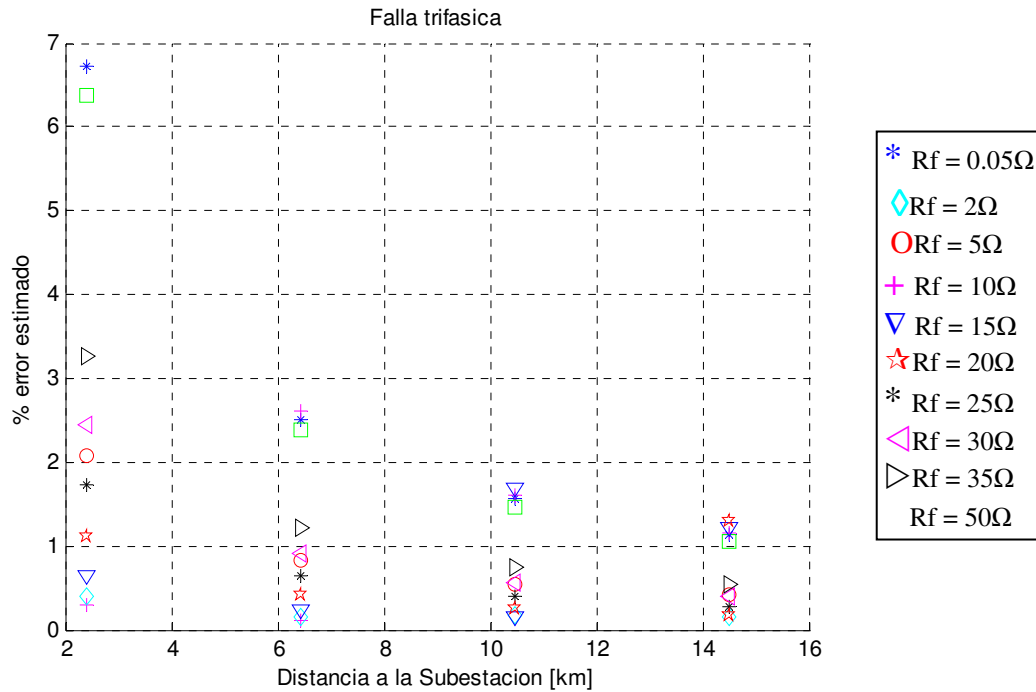


Figura 66. Estimación del error de localización de fallas trifásicas utilizando el algoritmo de Ratan Das

7.4 PRUEBAS CON MÁQUINAS DE SOPORTE VECTORIAL

Como una aplicación de la metodología descrita en la sección 5.3, se realizaron pruebas con la técnica SVM sobre el circuito prototipo, para determinar la zona más probable de falla. Las pruebas se realizaron mediante una toolbox implementada en MATLAB, desarrollada en el proyecto de Morales G. y Gómez A. [MG05].

Los descriptores seleccionados para las pruebas son los descritos en la Tabla 3 de la sección 5.3.1., los cuales corresponden a la profundidad del hueco de tensión y a la pendiente de descenso.

7.4.1 Zonificación del circuito prototipo

El circuito prototipo se dividió en seis zonas, tomando como referencia los circuitos ramales, el tipo de red y la distancia, como se presenta en la figura 67. Los nodos que conforman cada zona, el tipo de red y la distancia máxima dentro de la zona se presentan en la tabla 5.

Zona	Nodos	Tipo de red	Distancia máxima [km]
Zona 1	1, 2, 3 y 4	Trifásica	14.483
Zona 2	5, 6 y 12	Trifásica	10.46
Zona 3	7, 8, 9, 10 y 11	Trifásica	14.484
Zona 4	13 y 14	Monofásica	4.828
Zona 5	15, 16 y 17	Monofásica	4.828
Zona 6	18, 19, 20 y 21	Monofásica	12.875

Tabla 5. Datos de zonificación del circuito prototipo

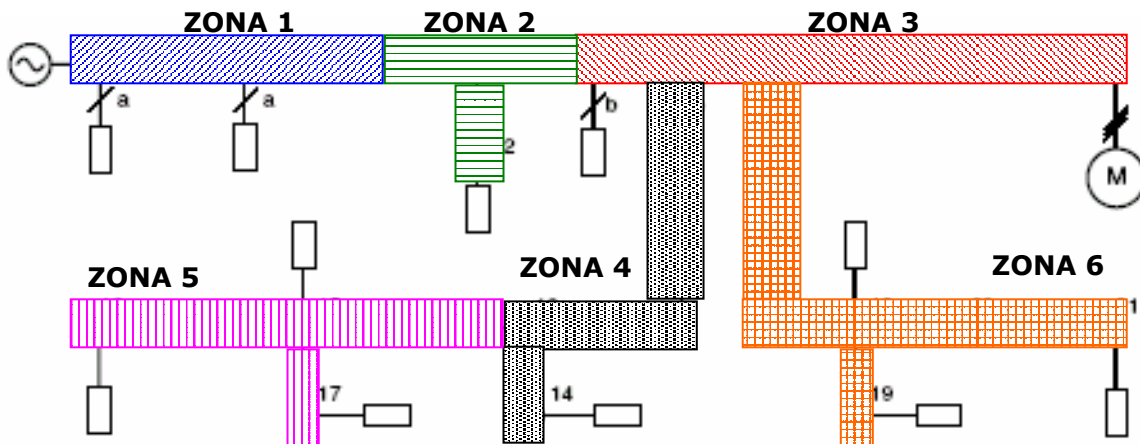


Figura 67. Zonas para la localización de fallas mediante SVM

7.4.2 Resultados esquemas de entrenamiento y validación para localización de fallas

El entrenamiento de la máquina de soporte vectorial se realizó mediante el 70% de los datos registrados durante las simulaciones. La validación se realizó con el resto de los datos (30%). La Tabla 6 presenta los datos de entrenamiento y validación para cada tipo de falla.

Tipo de falla	Número de datos de entrenamiento	Número de datos de validación
Monofásica	315	135
Bifásica	252	108
Bifásica a tierra	252	108
Trifásica	168	72

Tabla 6. Datos de entrenamiento y validación

Las pruebas se realizaron para los dos tipos de esquemas propuestos (ver sección 5.3.5): Localizador independiente del tipo de falla-LIF y Localizador dependiente del tipo de falla-LDF.

El primer resultado mostrado en las figuras 68 y 69, presenta la comparación entre el número total de datos de entrenamiento, validación y los vectores de soporte de la máquina en los esquemas LIF y LDF. Estos vectores son los puntos base para realizar la clasificación. El número depende de la cantidad de clases y de los datos de entrenamiento, pero se puede decir que un alto número de vectores indica una mayor dificultad para clasificar. Por ejemplo, para la etapa de clasificación del tipo de falla, el número es reducido (aprox. 3% de los datos de entrenamiento), lo que nos indica una adecuada caracterización de los datos de entrada a la máquina. Para la clasificación zonal es más alta debido a que aumenta la cantidad de clases y la SVM durante el entrenamiento se forzó para tener un margen bajo de error. Sin embargo en ambos esquemas, siempre están por debajo del 30% de los datos de entrenamiento.

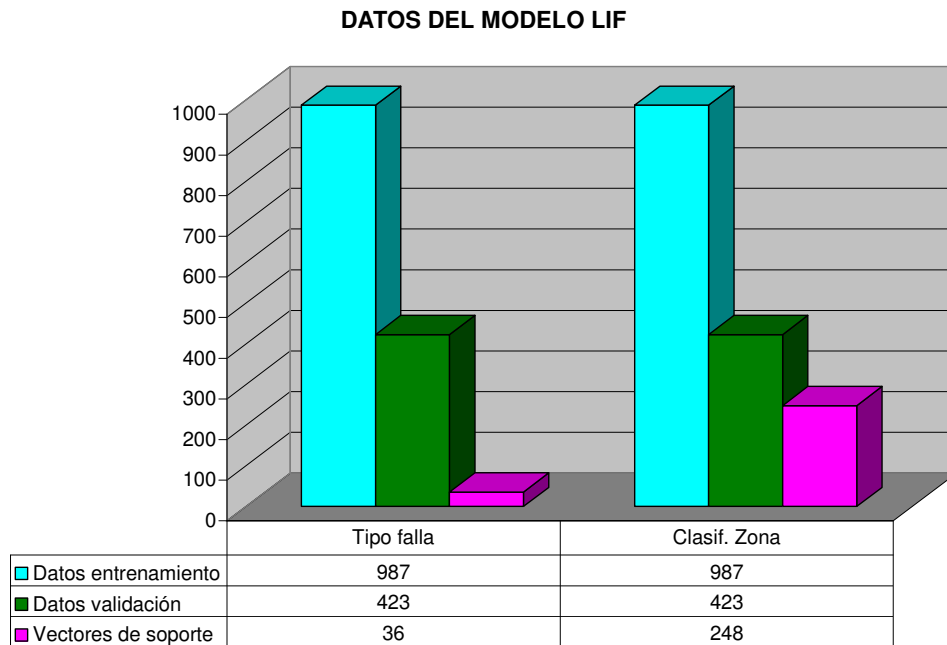


Figura 68. Número de Vectores de soporte esquema LIF

7.4.2.1 Resultados de la estimación del tipo de falla

Tanto para el esquema LIF y LDF la determinación del tipo de falla está estimada por una SVM especializada. Los resultados obtenidos por este esquema de localización de fallas para los datos de validación se presentan gráficamente en la figura 70. Analizando estos resultados, se concluye que el tipo de falla es plenamente clasificado mediante los descriptores de tensión en ambos esquemas propuestos. Esta es una alternativa eficiente para corroborar la estimación del tipo de falla mediante el método algorítmico.

7.4.2.2 Resultados de la estimación de la zona de falla

Los resultados, por tipo falla, obtenidos por este esquema LIF y LDF son presentados en las figura 70. Como se puede observar en los resultados, el esquema LIF estima mejor la zona cuando la falla es bifásica y trifásica y el esquema LDF en el caso de fallas monofásicas y bifásicas a tierra. Esto se debe a que el número de datos de entrenamiento es mayor y la función interna de optimización SVM cambia. La precisión

obtenida es buena y da un índice de confiabilidad en la implementación de la técnica en la localización de fallas.

DATOS DEL MODELO LDF

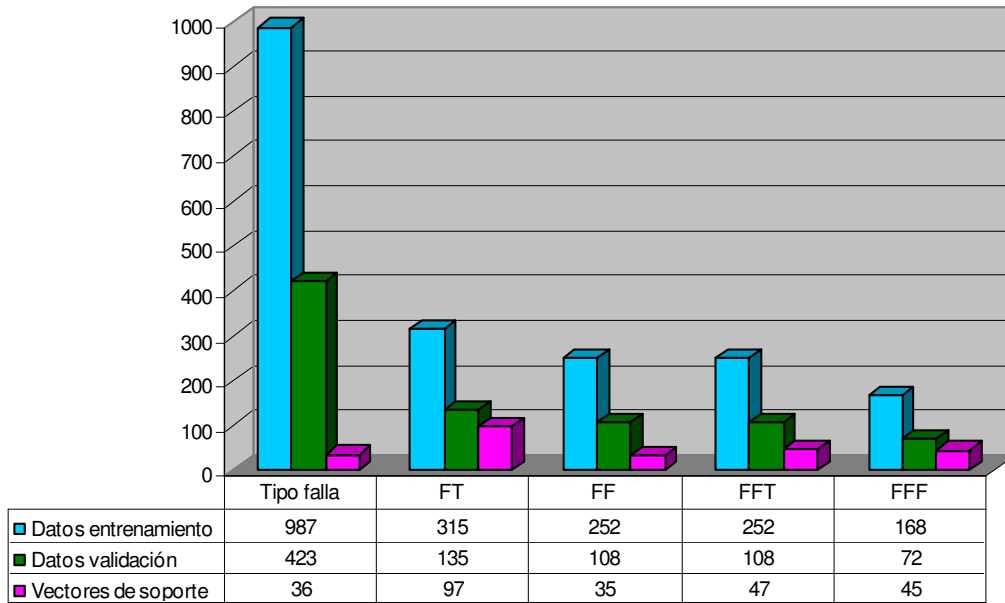


Figura 69. Número de Vectores de soporte esquema LDF

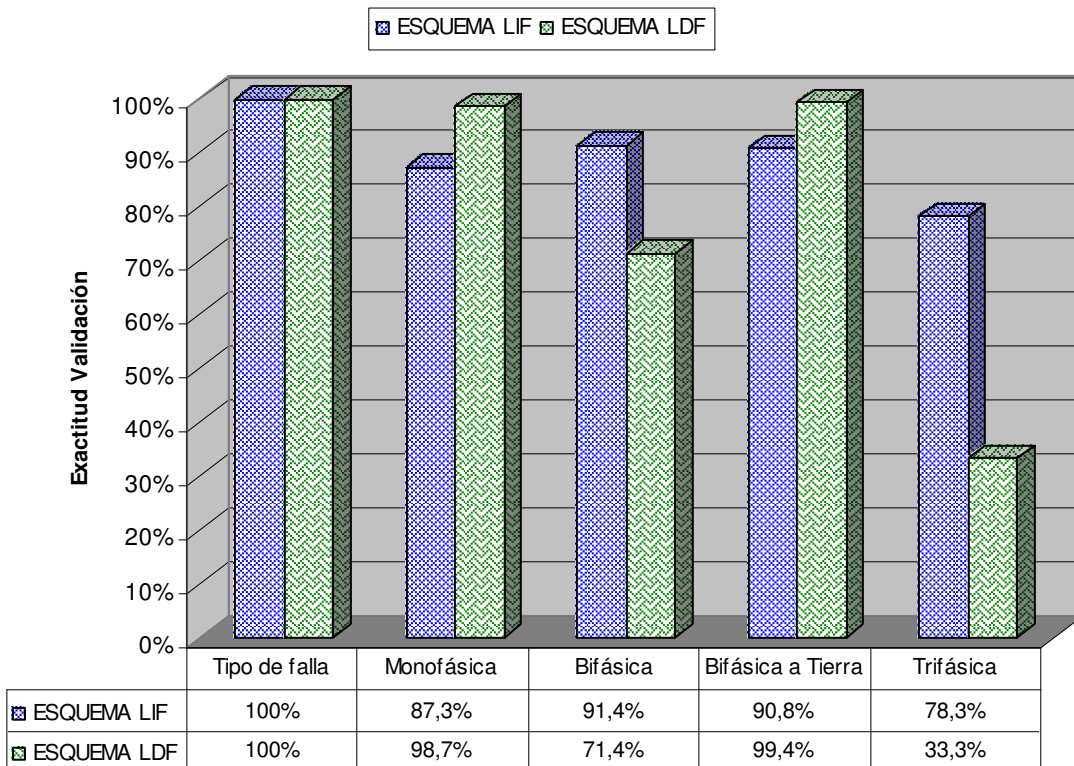


Figura 70. Porcentaje de precisión de localización de fallas para los esquemas LIF y LDF

7.4.3 Análisis de los resultados

Los resultados presentados en la anterior sección muestran que es posible la localización de zonas de falla en un circuito utilizando las SVM, siempre y cuando la información suministrada y los parámetros utilizados caractericen la condición de falla en el sistema. Se puede decir que la "magia" de la técnica computacional realmente depende de estas condiciones y hace más transparente el proceso.

Los descriptores que se utilizaron en estas pruebas (profundidad y pendiente de descenso) proveen una caracterización de las señales que se monitorizan en la subestación, puesto que el conjunto de valores proveen diferencias entre los tipos de fallas. Este aspecto es importante en la optimización que realiza la SVM puesto que reduce tiempo de entrenamiento y aumenta la generalidad del resultado. Los errores que se presentan se deben a casos donde la resistencia de falla es alta y los nodos donde se presenta son lejanos al punto de monitorización de las señales.

Esta metodología a diferencia de algunos métodos algorítmicos, no ve comprometida su precisión con fallas de alta impedancia (alrededor de 40Ω). Además de lo anterior, el resultado más importante obtenido es que se logra una localización satisfactoria de las fallas únicamente utilizando señales de tensión. Esto es importante por dos razones: la primera es que en los sistemas de distribución generalmente se tiene monitorización de tensiones y la segunda es que la tensión (a diferencia de la corriente) varía poco para diferentes condiciones de carga, lo cual le da robustez a la metodología propuesta.

7.5 PRUEBAS CON EL SISTEMA HÍBRIDO

7.5.1 Resultados Obtenidos

El sistema híbrido se desarrolló basado en el modelo de agentes, tal como se explicó en el capítulo 6. Las siguientes son los resultados de las pruebas desarrolladas al integrar el método basado en el modelo MBM (algoritmo de Ratan Das) y el método basado en el conocimiento (Máquinas de Soporte Vectorial). El número de pruebas realizadas es el mismo que se utilizó con el método de Ratan Das y las SVM (ver sección 7.2.4)

Los resultados obtenidos para la estimación de la localización de fallas, son presentados en la figura 71. En ella se muestran los porcentajes de precisión y error en la estimación del punto de falla y adicionalmente, el porcentaje de fallas en las que el sistema híbrido no determinó una única ubicación de la falla (múltiple estimación).

El análisis de la figura 71 muestra que el porcentaje de éxito en la localización del sistema híbrido para cada tipo de falla es alto (alrededor del 90%). Se pueden realizar la siguiente conclusión al respecto:

La múltiple estimación es prácticamente anulada. Sólo en un 2% de las fallas no se determinó una única ubicación de la falla. Esto se debe a dos motivos: la primera, cuando el método algorítmico por razones matemáticas, no converge a ninguna ubicación y por tanto no hay estimación de sección probable y la segunda, cuando no existe coherencia entre las estimaciones de las SVM y el método algorítmico. Para el primer caso, el sistema híbrido determina la zona probable de ocurrencia del evento estimada por las SVM y en el segundo, el sistema muestra los probables puntos de falla estimados por el método de Ratan Das.

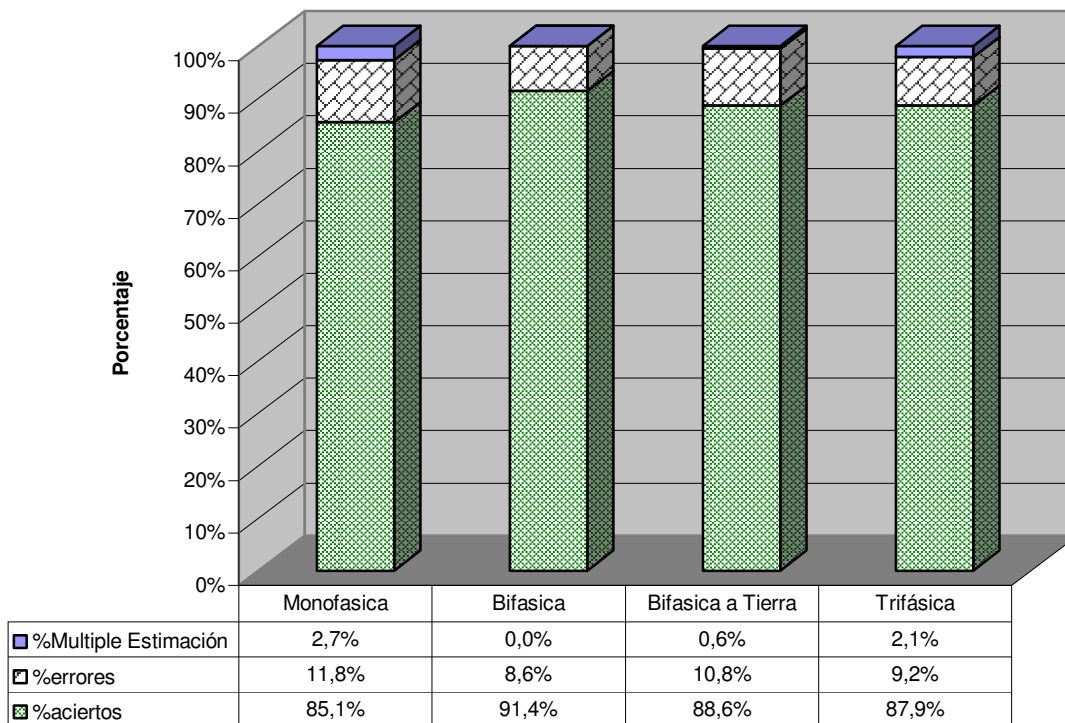


Figura 71. Porcentaje de precisión de localización de fallas para el sistema híbrido

La tabla 7 presenta una comparación de resultados entre el sistema híbrido y el algoritmo de Ratan Das para las pruebas con el sistema prototipo. La figura 72 presenta los resultados de manera gráfica. Como se puede observar, la precisión en la estimación de la sección en falla aumenta y la múltiple estimación es reducida.

Estimación	Método Algorítmico Ratan Das				Sistema Híbrido			
	FT	FF	FFT	FFF	FT	FF	FFT	FFF
Tipo de falla	100%	100%	76.9%	100%	100%	100%	100%	100%
Estimación de sección en falla	52.7%	60.6%	58.9%	64.2%	85.1%	91.4%	88.6%	87.9%
Múltiple Estimación	39.8%	30.8%	31.9%	25.8%	2.7%	0.0%	2.6%	2.1%

Tabla 7. Comparación resultados Algoritmo de Ratan Das y Sistema Híbrido

Comparación Estimación de sección Ratan Das e Hibrido

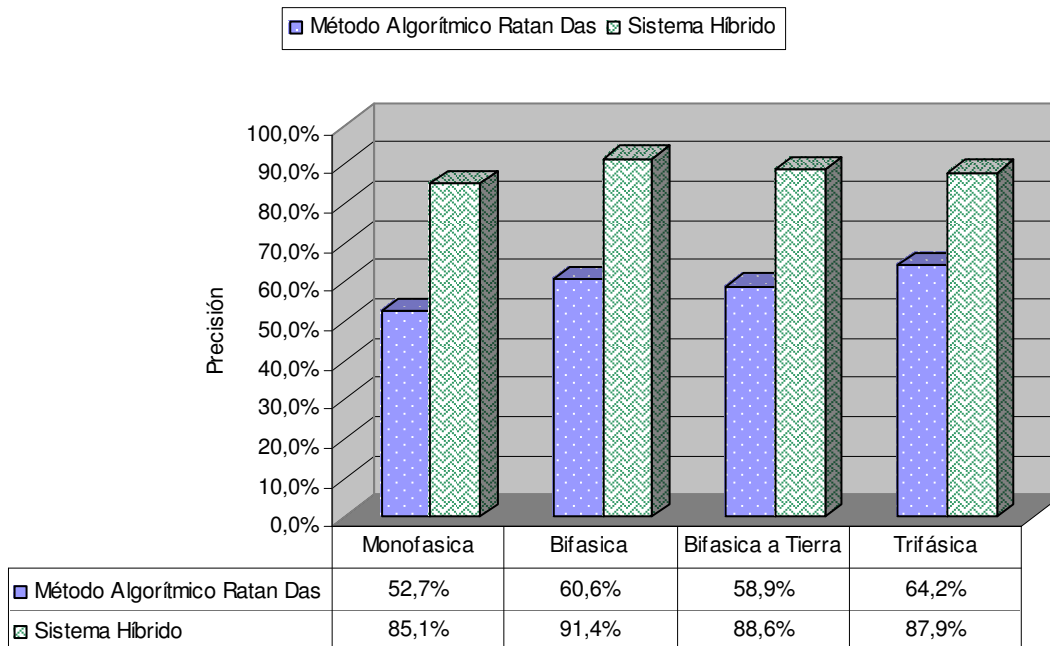


Figura 72. Comparación del Porcentaje de éxito en la estimación de sección del Algoritmo de Ratan Das y el Sistema Híbrido

7.5.2 Análisis de los resultados

Los resultados muestran que el sistema híbrido reduce el conjunto de posibles ubicaciones de los puntos de falla en un circuito. Esto se puede explicar debido a que el sistema complementa las características de cada uno de los métodos implementados: el método algorítmico se basa en un análisis de los elementos y topología del sistema de distribución, del cual resulta un algoritmo iterativo que encuentra la distancia al punto del evento. La técnica computacional trabaja con base en el análisis de información característica de las señales que se monitorean y con la optimización de las funciones internas que realiza, encuentra una posible zona de falla.

El sistema híbrido presenta un margen pequeño de múltiple estimación. Esta depende de la precisión que presente las SVM, puesto que si la clasificación en todos los casos es exitosa, y la zonificación está bien realizada, no se presentarán múltiples resultados. Aunque estos porcentajes son para el circuito prototipo, representan una muestra de lo que el sistema puede realizar para cualquier circuito de distribución.

8 APLICACIÓN A LOS ÍNDICES DE CONTINUIDAD

8.1 TIEMPOS DE INDISPONIBILIDAD

Con el objeto de contabilizar el efecto de la implementación de la metodología en el mejoramiento de los índices, se dividió el tiempo de indisponibilidad en tiempos asociados a las acciones realizadas para restituir el servicio de energía eléctrica [cataluña93].

Los tiempos son nueve (9) y se describen de la siguiente manera:

- T₁: Tiempo que se tarda en tener alguna indicación de que existe una falla permanente. Se detecta que el interruptor de cabecera ha disparado, se observa un defecto en la red.
- T₂: Tiempo en que la empresa distribuidora u operador de red, tarda en reconocer la existencia de la falla. Se reciben llamadas de usuarios, algún operario avisa de la existencia de la interrupción.
- T₃: Tiempo necesario para determinar la parte de la red en la que se interrumpió el suministro. Se revisa el tramo afectado y el elemento de corte que realizó el disparo.
- T₄: Tiempo para acceder a la red con el objeto de comenzar la búsqueda de la falla.
- T₅: Tiempo que se tarda en recorrer la parte afectada de la red para determinar el punto exacto donde se ha producido la falla.
- T₆: Tiempo que se tarda en llegar hasta el punto de corte mas cercano para aislar la parte de la línea en donde se localizó la falla.
- T₇: Tiempo necesario para reparar el componente o elemento averiado. Se arregla el equipo.
- T₈: Tiempo necesario para montar el elemento reparado o sustituido.
- T₉: Tiempo que se tarda en realimentar la parte aislada de la línea, habiendo comprobado las condiciones de seguridad necesarias.

La división anterior no es única y podría desglosarse de otras formas. Los tiempos anteriores no se contabilizan necesariamente en todas las interrupciones, pero sí es posible representar cualquier interrupción con esta división. Así mismo, no tienen porque darse de forma secuencial las acciones que representan cada tiempo. Cada interrupción particular comprenderá distintos valores para los tiempos anteriores. Sin

embargo y como es habitual en la evaluaciones de continuidad del suministro, estos tiempos pueden ser representados mediante la media de los valores registrados

8.2 TIEMPOS DE INCIDENCIA DE LA APLICACIÓN

Los tiempos mencionados en la sección anterior se agrupan convenientemente considerando que se esta estudiando el efecto de la implementación de la metodología sobre los índices de continuidad del suministro de energía eléctrica, así:

Tiempo de detección:	T_1 .
Tiempo de aviso:	T_2+T_3 .
Tiempo de acceso:	T_4.
Tiempo de recorrido:	T_5.
Tiempo de seccionamiento:	T_6 .
Tiempo de reparación y restitución del suministro:	$T_7+T_8+T_9$.

Teniendo presente esta agrupación, es evidente que la aplicación incide directamente en el tiempo de acceso y en el tiempo de recorrido, debido a que permite relacionar la localización de la falla dentro del sistema, con la ubicación geográfica de la misma, en otras palabras, la metodología permite reducir el tiempo (índice DES) invertido en las acciones encaminadas a la búsqueda de la falla dentro de la red de distribución de energía. A su vez, la metodología también permite localizar fallas no permanentes causantes de huecos de tensión, reflejándose esto último en el mejoramiento del índice de continuidad referente a la frecuencia de las interrupciones (índice FES).

9 APORTES, CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

9.1 APORTES

- Conceptualización e implementación de una avanzada técnica computacional (Máquinas de Soporte Vectorial)
- Aplicación de las SVM a un problema de ingeniería eléctrica
- Avance en la solución de cómo disminuir tiempos de restablecimiento del sistema de distribución ante fallas e índices de continuidad
- Propuesta de parámetros para caracterización de fallas en sistemas de distribución.
- Establece un precedente para proyectos futuros sobre esta línea de investigación (mejora de algoritmos, adecuación de IA al problema, etc)

9.2 CONCLUSIONES

El presente trabajo de investigación presenta de una manera sencilla un modelo que permite la localización de fallas en los sistemas de distribución, aunque se puede extender a redes de transmisión. Las principales conclusiones son las siguientes:

Se analizaron las características propias de los sistemas de distribución. La influencia de cargas, la sección de redes y resistencia de fallo son variables que afectan directamente los diferentes algoritmos de localización de fallas. Esto se debe a que generalmente los métodos utilizan la medida de la impedancia de falla vista desde el alimentador y ésta es afectada por los cambios constantes en la red.

Se estudiaron diferentes señales de tensión y corriente monitorizadas en estado de falla del sistema de potencia, tanto en estado transitorio, como en estado estable, para determinar características y patrones que permitieran la ubicación del punto de ocurrencia de una falla. Para el estado transitorio, se realizó un análisis mediante diferentes transformadas, en especial la Transformada Wavelet y la transformada rápida de Fourier. Los descriptores propuestos permiten caracterizar el estado transitorio de una falla y pueden ser utilizados para la localización de fallas, sin embargo, el costo de muestreo es alto para obtener las frecuencias invariantes con la resistencia.

Los descriptores de tensión presentan una buena generalidad y tienen ventajas como la poca variabilidad con los cambios de carga, no necesitan equipos de monitorización complejos y el algoritmo para obtenerlos es sencillo. La caracterización es una de las partes más importantes del sistema, puesto que de la calidad de ésta se obtendrán buenos resultados.

Los métodos algorítmicos se basan en un análisis de los elementos y topología del sistema de distribución, del cual resulta un algoritmo iterativo que encuentra la distancia al punto del evento. Se analizaron varios métodos algorítmicos, estudiando el modelo del sistema, sus algoritmos y características propias. Aunque existen métodos

más sencillos que otros, es necesaria una información básica del sistema para que el algoritmo pueda implementarse. Una comparación entre ellos fue realizada y se escogió el algoritmo de Ratan Das para su implementación en esta investigación. Sus principales ventajas son:

- Considera un modelo de línea adecuado para el sistema de distribución.
- Tiene en cuenta presencia de circuitos laterales, cargas desequilibradas y análisis según el tipo de falla.
- Utiliza las señales de tensión y corriente a frecuencia fundamental.
- Implementación sencilla, precisión y actualidad.
- Disponibilidad de pruebas y gran cantidad de información sobre el algoritmo.

Las máquinas de soporte vectorial (SVM) son el producto de la integración del análisis multidimensional y la optimización. Al igual que los métodos conexionistas como las redes neuronales, de la calidad de sus entradas depende el éxito en su implementación. Se debe realizar una escogencia apropiada de sus parámetros, el tipo de kernel y el método de optimización dependiendo del tipo de aplicación.

Se adaptaron las SVM para la localización de fallas. Los resultados muestran que el tipo de Kernel adecuado es el RBF, la estrategia de entrenamiento más eficiente es el uno contra uno y el método más rápido de optimización es el algoritmo SMO. La metodología se desarrolla con base en la información monitorizada en los alimentadores de los circuitos. Las señales de tensión adquiridas se caracterizan por medio de descriptores, los cuales determinan patrones de zonas de posible ubicación de fallas. Las SVM se perfilan como una buena opción para la reducción de la incertidumbre en la ubicación precisa de fallas en los sistemas de distribución, puesto que los resultados obtenidos hasta ahora reflejan un futuro alentador y su potencial de aplicación propone una forma relativamente sencilla y económica de especificar la ubicación de las fallas en el caso de que éstas ocurran.

La estructura del sistema híbrido de localización de fallas diseñada, se fundamenta en la propuesta de estructura general basada en agentes. Ésta está basada en la interacción de varios módulos con un sistema de realimentación que permite su mejor desempeño interno, así como la medición y adaptación de las acciones de acuerdo con el efecto de ellas sobre el medio. Los módulos implementados bajo este esquema son el método algorítmico de Ratan Das y las máquinas de soporte vectorial. Aunque éstos pueden de manera independiente localizar fallas, su integración permite mejorar y complementar el resultado obtenido de cada uno de los sistemas por separado.

Se implementó un circuito de distribución prototipo donde se desarrollaron las pruebas para los módulos del sistema híbrido y el modelo integrado. Este se realizó en EMTP /ATP con los modelos apropiados para los sistemas de distribución. Se obtuvo una base de datos de un tamaño adecuado para entrenar y validar las SVM.

Los resultados obtenidos para las pruebas desarrolladas en el sistema híbrido presentan un futuro alentador. El sistema mejora la estimación de la sección en falla, el tipo de falla y reduce la estimación múltiple del algoritmo de Ratan Das para el circuito prototipo en un 95% en promedio. Esto se debe principalmente a que se combinan en un solo sistema un algoritmo que trabaja sobre la base del modelo y topología del circuito y otro que utiliza las características extraídas de las señales monitorizadas.

Aunque la metodología híbrida para la localización de fallas dentro del sistema de distribución de prueba presentó buenos resultados, todavía se puede mejorar más su precisión. Quedan como limitantes del sistema que su precisión es baja para fallas trifásicas.

9.3 TRABAJO FUTURO

Para un trabajo futuro se pueden utilizar las SVM en modo regresión para obtener otra estimación de la distancia a la falla. Además se puede integrar información adicional como estado de las protecciones, potencia de cortocircuito, cambios de carga y arranques de motores temperatura, hora, etc para realizar una estimación más completa del punto y causas de fallas.

Afinar los parámetros propios de las máquinas de soporte, obtener información del transitorio de la falla y adicionar descriptores de corriente son algunas de las estrategias que se pueden plantear. También se puede realizar un tratamiento de los descriptores mediante componentes principales y reducir el número de descriptores.

Con base en una acertada estimación sobre el punto de localización de una falla, las empresas prestadoras del servicio pueden implementar mejores y más eficientes estrategias de atención y recuperación de fallas que disminuirían los tiempos de duración de las interrupciones asociados a este tipo de anomalías, y consecuentemente, la reducción del índice de Duración Equivalente de las interrupciones del Servicio a nivel de circuito – *DESC*.

Por último, el desarrollo de este trabajo fortaleció el espíritu de investigativo, el cual se convirtió en una motivación permanente para afrontar el reto de indagar en temáticas actuales de investigación. Se apreció la importancia de la participación de los ingenieros en la generación de procesos que contribuyan al mejoramiento de la calidad de la energía en nuestro país.

10 BIBLIOGRAFÍA

- [AA99] Aguado, Carlos, Aguilar, J. "A mixed qualitative quantitative self learning classification technique applied to situation assessment in industrial control". 1999.
<http://www.qrg.northwestern.edu/papers/Files/qr-workshops/QR99/>
- [AAJ97] R.K Aggarwal, Y. Aslan. and A.T Johns. An interactive approach to fault location on overhead distribution lines with load taps, 1997.
- [AL82] Aguilar J., López N. "The process of classification and learning the meaning of linguistic descriptors of concepts". Approximate Reasoning in Decision Analysis,1982. p. 165-175. N. Holland.
- [Ang01] Cecilo Angulo. Aprendizaje con máquinas núcleo en entornos de multclasificación. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, 2001.
- [BGV92] B. Boser, I. Guyon, and V. Vapnik. A training algorithm for optimal margin classifier. Proc. 5th ACM Workshop on Computational Learning Theory, pages:144_152, 1992.
- [BM92] K. P. Bennett and O. L. Mangasarian. Robust linear programming discrimination of two linearly inseparable set. Optimization Methods and Software, 1:23_34, 1992.
- [Bol00] Bollen M.H.J. Understanding Power Quality Problems: Voltages Sags and Interruptions. IEEE PRESS. 2000
- [Bur98] Christopher Burges. A tutorial on support vector machines for pattern recognition. Data Mining And Knowledge Discovery, 2:121_167, 1998.
- [BVB95] V. Blanz, V. Vapnik, and C. Burges. Multiclass Discrimination with an Extended Support Vector Machine. Talk given at AT&T Bell Labs, 1995.
- [CLLJ04] Myeon Son Choi, Seung-Jae Lee, Duck-su Lee and Bo-Gun Jin. A new fault location algorithm using direct circuit analysis for distribution systems, 2004.
- [CV95] C. Cortes and V. Vapnik. Support vector networks. Machine Learning, 20:273_297, 1995.
- [Das98] Ratan Das. Determining the locations of faults in distribution systems. University of Saskatchewan Saskatoon, Canada, 1998.
- [DB95] T. G. Dietterich and G. Bakiri. Solving multiclass learning problems via error-correcting output codes. Journal of Artificial Intelligence Research, 2:263_286, 1995.
- [DL90] Datta terya and Laveen Kanal, Estimation of Mixing Probabilities in Multiclass Finite Mixtures, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol 20, No 1, 1990.

- [Gia92] Arnaud Giacometti. *Modeles hybrides de l'expertise*. Lifa-grenoble Telecom-Paris, Novembre 92. Docteur Thèse.
- [GNPSF00] J. Grim, J. Novoviicov 'a, P. Pudil, P. Somol, F.J. Ferri, Initializing Normal Mixtures of Densities, Academy of Sciences of the Czech Republic
- [HOOC04] Ricardo Henao, Fabian Ojeda, Mauricio Orozco, and Germán Castellanos. Identificación de estados funcionales en bioseñales empleando SVM. Universidad Nacional de Colombia, 2004.
- [Inv03] Invancic F. "Modeling Análisis of Hybrid Systems". Tesis doctoral. University of Pennsilvania. 2003.
- [Isa04] Isaza N, Claudia V. "Clasificación y diagnostico de procesos empleando metodología LAMDA". Universidad de los Andes. Maestría en Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Facultad de Ingenierías. Bogota, DC, 2004.
- [JS89] Alain St-Jacques and Krishnaswamy Srinivasan. A new fault location algorithm for radial transmission lines with loads, 1989.
- [KT51] H. W. Kuhn and A. W. Tucker. Nonlinear programming. Proc. 2nd Berkeley Symposium on Mathematical Statistics and Probabilistics, pages:481_492, 1951. University of California Press.
- [LCH04] Chih-Jen Lin, Chih-Chung Chang, and Chih-Wei Hsu. A Practical Guide to Support Vector Classification. National Taiwan University, 2004.
- [MG05] Germán Morales, Alvaro Gómez. Estudio e implementación de una herramienta basada en Máquinas de soporte vectorial aplicada a la Localización de fallas en sistemas de distribución. Tesis de pregrado, UIS, 2005
- [MM02] Wendy L. Martínez and Angel R. Martínez. Computational Statistics Handbook with MatLab, Chapman & Hall/CRC, Boca Ratón, Florida, 2002.
- [MMC05] Mora J., Meléndez J., Carrillo G. "Una Arquitectura Genérica para el Desarrollo de Sistemas Híbridos. Propuesta de localizador de fallas para mejorar los índices de calidad". III Internacional Simposium of Power Quality. IEEE Branch - Colombia, Bogotá, Noviembre 2005.
- [MP00] McLachlan Geoffrey and Peel David. Finite Mixture Models. John Wiley & Sons, New York, 2000.
- [NHHM98] Damir Novosel, D. Hart, Y. Hu, and J. Myllymaki. System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads, 1998.
- [Pen02] Peña Daniel. Análisis de Datos Multivariantes, McGraw-Hill/Interamericana de España, Madrid, 2002.

- [San04] Raúl Sanchez. Sistemas de reconocimiento facial. Antena de Telecomunicación, pág. 33-36, marzo 2004.
- [San91] Santos Osorio Fernando. Un Systeme Hybride Neuro-Symbolique pour l'apprentissage Automatique Constructif. L'Institut National Polytechnique de Grenoble - I.N.P.G.Laboratoire LEIBNIZ - IMAG. Docteur Thèse, 1991
- [SR02] Murari Mohan Saha, Eugeniusz Rosolowski. Method and device of fault location for distribution networks, 2002.
- [SS02] Bernhard Schölkopf and Alex Smola. Learning with Kernels Support Vector Machines, Regularization, Optimization and Beyond. The MIT Press, Cambridge, 2002.
- [SV99] Santos Osório Fernando, Vieira Renata. *XIX Congresso da s.b.c. enia'99 - Encontro Nacional de Inteligência Artificial*. Rio de Janeiro, Julho 1999.
- [Tow91] Towell G. Geoffrey. *Symbolic Knowledge and Neural Networks: Insertion, Refinement and Extraction*. Doctoral thesis. University of Wisconsin. 1991
- [Vap95] V. Vapnik. The nature of statistical learning theory. Springer Verlag, New York, 1995.
- [VQ05] Villamizar Libardo, Quiñones Carlos. Implementación Del Método De Ratan Das Para La Localización De Fallas En Sistemas De Distribución De Energía Eléctrica. Tesis de pregrado, UIS, 2005
- [Wai00] WAISSMAN J "Construction d'un modèle comportemental pour la supervision de procedes: Application a une station de traitement des eaux", These de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2000
- [Wes64] Westinghouse Electric Corporation, Electric Utility Engineering Reference Book: distribution systems, Vol 3, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, 1964.
- [WV68] Warrington, A.R. Van C. Protective Relays, Their Theory and Practice. London, 1968.
- [WW99] J.Weston and C.Watkins. Multi-Class Support Vector Machines. In M. Verleysen, editor, Proceedings ESANN, Brussels, 1999.
- [YS98] Lifeng Yang, Coral Springs. One terminal fault location system that corrects for fault resistance effects, 1998.
- [ZLG97] Jun Zhu, David L. Lubkeman and Adly A. Girgis. Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders, 1997.
- [Cataluña93] Universidad Politécnica de Cataluña. "3^{as} Jornadas Hispano-Lusas de Ingeniería Eléctrica", Barcelona, 1993.

APÉNDICES

APÉNDICE A.1: Ecuaciones para los distintos tipos de fallas del método de Ratan Das

Teniendo en cuenta las ecuaciones (3.126) y (3.139) de la sección 2.1, se pueden determinar las tensiones y las corrientes de secuencia en el nodo f y las tensiones de secuencia en el nodo n:

$$V_{0f} = V_{0x} - s B_{0xy} I_{0xf},$$

$$V_{1f} = V_{1x} - s B_{1xy} I_{1xf},$$

$$V_{2f} = V_{2x} - s B_{2xy} I_{2xf},$$

$$\begin{aligned} I_{0f} &= \frac{1}{K_{0v} + sK_{0w}} \{ (K_{0q} + sK_{0r}) V_{0x} + (K_{0v} + sK_{0u}) I_{0xf} \}, \\ I_{1f} &= \frac{1}{K_{1v} + sK_{1w}} \{ (K_{1q} + sK_{1r}) V_{1x} + (K_{1v} + sK_{1u}) I_{1xf} \}, \\ I_{2f} &= \frac{1}{K_{2v} + sK_{2w}} \{ (K_{2q} + sK_{2r}) V_{2x} + (K_{2v} + sK_{2u}) I_{2xf} \} \end{aligned} \quad (A.1)$$

$$\begin{aligned} V_{0n} &= \frac{1}{K_{0v} + sK_{0w}} \{ (K_{0m} + sK_{0n}) V_{0x} + sK_{0p} I_{0xf} \}, \\ V_{1n} &= \frac{1}{K_{1v} + sK_{1w}} \{ (K_{1m} + sK_{1n}) V_{1x} + sK_{1p} I_{1xf} \} \quad \gamma \\ V_{2n} &= \frac{1}{K_{2v} + sK_{2w}} \{ (K_{2m} + sK_{2n}) V_{2x} + sK_{2p} I_{2xf} \} \end{aligned} \quad (A.2)$$

Para determinar la distancia a la falla se sustituye las tensiones y las corrientes de secuencia, obtenidos de las ecuaciones (A.1) y (A.2)) y se obtienen las siguientes ecuaciones, dependiendo del tipo de falla:

i) falla fase-tierra

$$V_f = I_f * R_f \quad (A.3)$$

$$\frac{V_{0f} + V_{1f} + V_{2f}}{I_{0f} + I_{1f} + I_{2f}} = R_f \quad (A.4)$$

Con el fin de considerar únicamente los efectos resistivos de la impedancia de falla, la parte imaginaria de la ecuación (A.4) se iguala a cero como en (A.5).

$$\text{Im} \left(\frac{V_{0f} + V_{1f} + V_{2f}}{I_{0f} + I_{1f} + I_{2f}} \right) = 0 \quad (\text{A.5})$$

Sustituyendo la ecuación (A.1) en (A.5):

$$\text{Im} \left[\frac{(V_{0x} + V_{1x} + V_{2x}) - s(B_{0xy} I_{0xf} + B_{1xy} I_{1xf} + B_{2xy} I_{2xf})}{\frac{1}{K_{0v} + sK_{0w}} \left\{ (K_{0q} + sK_{0r}) V_{0x} + (K_{0v} + sK_{0u}) I_{0xf} \right\} + \frac{1}{K_{1v} + sK_{1w}} \left\{ (K_{1q} + sK_{1r}) V_{1x} + (K_{1v} + sK_{1u}) I_{1xf} \right\} + \frac{1}{K_{2v} + sK_{2w}} \left\{ (K_{2q} + sK_{2r}) V_{2x} + (K_{2v} + sK_{2u}) I_{2xf} \right\}} \right] = 0 \quad (\text{A.6})$$

Racionalizando la ecuación anterior, se obtiene (A.7)

$$\text{Im} \left[\frac{\left\{ (V_{0x} + V_{1x} + V_{2x}) - s(B_{0xy} I_{0xf} + B_{1xy} I_{1xf} + B_{2xy} I_{2xf}) \right\} \left\{ (K_{0v} + sK_{0w})(K_{1v} + sK_{1w})(K_{2v} + sK_{2w}) \right\}}{\left(K_{1v} + sK_{1w} \right) \left(K_{2v} + sK_{2w} \right) \left\{ (K_{0q} + sK_{0r}) V_{0x} + (K_{0v} + sK_{0u}) I_{0xf} \right\} + \left(K_{2v} + sK_{2w} \right) \left(K_{0v} + sK_{0w} \right) \left\{ (K_{1q} + sK_{1r}) V_{1x} + (K_{1v} + sK_{1u}) I_{1xf} \right\} + \left(K_{0v} + sK_{0w} \right) \left(K_{1v} + sK_{1w} \right) \left\{ (K_{2q} + sK_{2r}) V_{2x} + (K_{2v} + sK_{2u}) I_{2xf} \right\}} \right] = 0 \quad (\text{A.7})$$

Despreciando términos de segundo y mayor orden se tiene:

$$\text{Im} \left[\frac{K_A + sK_B}{K_C + sK_D} \right] = 0 \quad (\text{A.8})$$

Donde:

$$\begin{aligned} K_A &= (V_{0x} + V_{1x} + V_{2x}) (K_{0v} K_{1v} K_{2v}), \\ K_B &= [(V_{0x} + V_{1x} + V_{2x}) \{ K_{1v} (K_{2v} K_{0w} + K_{2w} K_{0v}) + (K_{1w} K_{0v} K_{2v}) \}] - \\ &\quad [(B_{0xy} I_{0xf} + B_{1xy} I_{1xf} + B_{2xy} I_{2xf}) (K_{0v} K_{1v} K_{2v})], \\ K_C &= \{ (K_{1v} K_{2v}) (K_{0q} V_{0x} + K_{0v} I_{0xf}) \} + \{ (K_{2v} K_{0v}) (K_{1q} V_{1x} + K_{1v} I_{1xf}) \} + \\ &\quad \{ (K_{0v} K_{1v}) (K_{2q} V_{2x} + K_{2v} I_{2xf}) \} \quad \gamma \\ K_D &= \{ (K_{1v} K_{2v}) (K_{0r} V_{0x} + K_{0u} I_{0xf}) \} + (K_{1v} K_{2w} + K_{1w} K_{2v}) (K_{0q} V_{0x} + K_{0v} I_{0xf}) \} + \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

$$\left\{ (K_{2v} K_{0v}) (K_{1r} V_{1x} + K_{1u} I_{1xf}) + (K_{2v} K_{0w} + K_{2w} K_{0v}) (K_{1q} V_{1x} + K_{1v} I_{1xf}) \right\} + \left\{ (K_{0v} K_{1v}) (K_{2r} V_{2x} + K_{2u} I_{2xf}) + (K_{0v} K_{1w} + K_{0w} K_{1v}) (K_{2q} V_{2x} + K_{2v} I_{2xf}) \right\}.$$

Expresando los parámetros complejos K_A a K_D en términos de sus componentes real e imaginaria y racionalizando (A.9) se tiene:

$$\text{Im} \left[\frac{\{(K_{Ar} + sK_{Br}) + j(K_{Ai} + sK_{Bi})\} \{(K_{Cr} + sK_{Dr}) - j(K_{Ci} + sK_{Di})\}}{\{(K_{Cr} + sK_{Dr}) + j(K_{Ci} + sK_{Di})\} \{(K_{Cr} + sK_{Dr}) - j(K_{Ci} + sK_{Di})\}}} \right] \quad (\text{A.10})$$

$$(K_{Ai} + sK_{Bi})(K_{Cr} + sK_{Dr}) - (K_{Ar} + sK_{Br})(K_{Ci} + sK_{Di}) = 0 \quad (\text{A.11})$$

Despreciando términos de segundo y mayor orden y despejando s se obtiene:

$$s = \frac{K_{Ar} K_{Ci} - K_{Ai} K_{Cr}}{(K_{Cr} K_{Bi} - K_{Ci} K_{Br}) + (K_{Dr} K_{Ai} - K_{Di} K_{Ar})} \quad (\text{A.12})$$

ii) Falla fase-fase y fase-fase a tierra

$$(V_{1f} - V_{2f}) = \frac{R_f}{2} (I_{1f} - I_{2f}) \quad (\text{A.13})$$

$$\text{Im} \left(\frac{V_{1f} - V_{2f}}{I_{1f} - I_{2f}} \right) = 0 \quad (\text{A.14})$$

Sustituyendo las tensiones y las corrientes de la ecuación (A.1) se tiene:

$$\text{Im} \left[\frac{\{(V_{1x} - V_{2x}) - s(B_{1xy} I_{1xf} - B_{2xy} I_{2xf})\} \{(K_{1v} + sK_{1w}) (K_{2v} + sK_{2w})\}}{(K_{2v} + sK_{2w}) \{(K_{1q} + sK_{1r}) V_{1x} + (K_{1v} + sK_{1u}) I_{1xf}\} - (K_{1v} + sK_{1w}) \{(K_{2q} + sK_{2r}) V_{2x} + (K_{2v} + sK_{2u}) I_{2xf}\}} \right] = 0 \quad (\text{A.15})$$

Despreciando términos de segundo y mayor orden se tiene:

$$\text{Im} \left[\frac{K_{A2} + sK_{B2}}{K_{C2} + sK_{D2}} \right] = 0 \quad (\text{A.16})$$

Donde:

$$K_{A2} = (V_{1x} - V_{2x}) (K_{1v} K_{2v}),$$

$$K_{B2} = (V_{1x} - V_{2x}) (K_{1v} K_{2w} + K_{1w} K_{2v}) - (B_{1xy} I_{1xf} - B_{2xy} I_{2xf}) (K_{1v} K_{2v}), \quad (\text{A.17})$$

$$K_{C2} = K_{2v} (K_{1q} V_{1x} + K_{1v} I_{1xf}) - K_{1v} (K_{2q} V_{2x} + K_{2v} I_{2xf})$$

$$K_{D2} = \left\{ K_{2v} (K_{1r} V_{1x} + K_{1u} I_{1xf}) + K_{2w} (K_{1q} V_{1x} + K_{1v} I_{1xf}) \right\} - \left\{ K_{1v} (K_{2r} V_{2x} + K_{2u} I_{2xf}) + K_{1w} (K_{2q} V_{2x} + K_{2v} I_{2xf}) \right\}.$$

Seguendo el procedimiento utilizado para la falla fase-tierra, la distancia s se puede obtener como sigue:

$$s = \frac{K_{A2r} K_{C2i} - K_{A2i} K_{C2r}}{(K_{C2r} K_{B2i} - K_{C2i} K_{B2r}) + (K_{D2r} K_{A2i} - K_{D2i} K_{A2r})} \quad (A.18)$$

iii) Falla trifásica balanceada

$$V_{1F} = I_{1f} R_f \quad (A.19)$$

$$\text{Im} \left(\frac{V_{1f}}{I_{1f}} \right) = 0 \quad (A.20)$$

Sustituyendo (A.1) en (A.20) se obtiene:

$$\text{Im} \left[\frac{(V_{1x} - s B_{1xy} I_{1xf}) (K_{1v} + s K_{1w})}{(K_{1q} + s K_{1r}) V_{1x} + (K_{1v} + s K_{1u}) I_{1xf}} \right] = 0 \quad (A.21)$$

Despreciando términos de segundo y mayor orden se tiene que:

$$\text{Im} \left[\frac{K_{A3} + s K_{B3}}{K_{C3} + s K_{D3}} \right] = 0 \quad (A.22)$$

Donde:

$$K_{A3} = V_{1x} K_{1v}$$

$$K_{B3} = V_{1x} K_{1w} - B_{1xy} I_{1xf} K_{1v} \quad (A.23)$$

$$K_{C3} = K_{1q} V_{1x} + K_{1v} I_{1xf} \quad y$$

$$K_{D3} = K_{1r} V_{1x} + K_{1u} I_{1xf}.$$

Seguendo el procedimiento utilizado para la falla fase-tierra, la distancia s se puede calcular como sigue:

$$s = \frac{K_{A3r} K_{C3i} - K_{A3i} K_{C3r}}{(K_{C3r} K_{B3i} - K_{C3i} K_{B3r}) + (K_{D3r} K_{A3i} - K_{D3i} K_{A3r})} \quad (A.24)$$

APÉNDICE A.2: Especificaciones del sistema de distribución prototipo

El sistema de distribución utilizado para las pruebas de la metodología propuesta se presenta en la figura A.1.

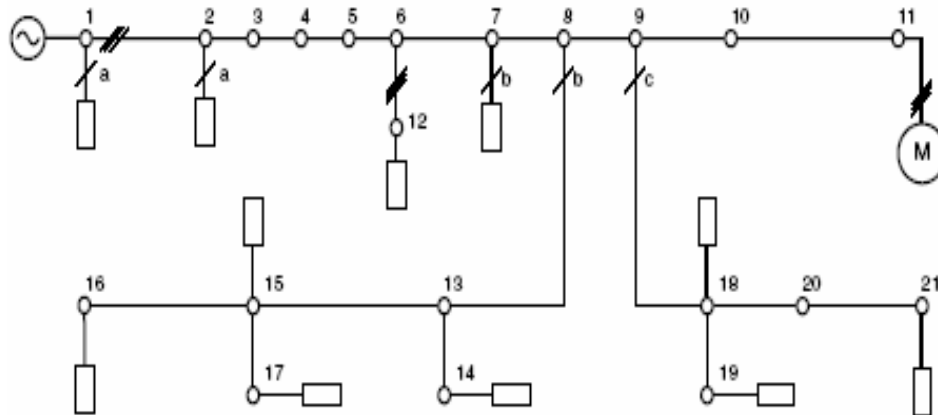


Figura A.1. Diagrama unifilar del modelo de sistema de distribución prototipo.

Los datos de la línea se presentan por secciones. Los nodos a los que esta conectada cada sección, la distancia de cada sección y las impedancias del modelo equivalente π se muestran en la Tabla A.1.

Algunas características del sistema propuesto son:

- Entre los nodos 1 y 11 existen 37km de longitud. Esta línea esta compuesta por diferentes tipos de conductores.
- Se instalaron cargas de diferentes tipos en los nodos del sistema excepto en los nodos 3, 4, 5, 10 y 20.
- Los nodos 3, 4 y 5 forman parte de una sección de 16km.
- El nodo 20 divide en dos secciones la sección entre los nodos 18 y 21.
- El nodo 10 es la unión de dos secciones de diferente tipo de conductor.

Sección		Distancia (km)	Impedancias Serie		Admitancia Paralela	
Nodo Inic.	Nodo Fin.		Pos. y Neg. (Ω/km)	Cero (Ω/km)	Pos. y Neg. (S/km)	Cero (S/km)
1	2	2,414	$0,3480 + i * 0,5166$	$0,5254 + i * 1,704$	$i * 3,74e - 06$	$i * 2,49e - 06$
2	3	4,023	$0,3480 + i * 0,5166$	$0,5254 + i * 1,704$	$i * 3,74e - 06$	$i * 2,49e - 06$
3	4	4,023	$0,3480 + i * 0,5166$	$0,5254 + i * 1,704$	$i * 3,74e - 06$	$i * 2,49e - 06$
4	5	4,023	$0,3480 + i * 0,5166$	$0,5254 + i * 1,704$	$i * 3,74e - 06$	$i * 2,49e - 06$
5	6	4,023	$0,3480 + i * 0,5166$	$0,5254 + i * 1,704$	$i * 3,74e - 06$	$i * 2,49e - 06$
6	7	4,023	$0,3480 + i * 0,5166$	$0,5254 + i * 1,704$	$i * 3,74e - 06$	$i * 2,49e - 06$
7	8	5,150	$0,5519 + i * 0,5390$	$0,7290 + i * 1,727$	$i * 3,59e - 6$	$i * 2,39e - 6$
8	9	2,414	$0,5519 + i * 0,5390$	$0,7290 + i * 1,727$	$i * 3,59e - 6$	$i * 2,39e - 6$
9	10	4,506	$0,5519 + i * 0,5390$	$0,7290 + i * 1,727$	$i * 3,59e - 6$	$i * 2,39e - 6$
10	11	2,414	$0,3480 + i * 0,5166$	$0,5254 + i * 1,704$	$i * 3,74e - 06$	$i * 2,49e - 06$
6	12	2,414	$0,3480 + i * 0,5166$	$0,5254 + i * 1,704$	$i * 3,74e - 06$	$i * 2,49e - 06$
8	13	2,414	$7,3977 + i * 0,8998$	$7,3977 + i * 0,8998$	$i * 2,51e - 6$	$i * 2,51e - 6$
13	14	2,414	$7,3977 + i * 0,8998$	$7,3977 + i * 0,8998$	$i * 2,51e - 6$	$i * 2,51e - 6$
13	15	2,414	$7,3977 + i * 0,8998$	$7,3977 + i * 0,8998$	$i * 2,51e - 6$	$i * 2,51e - 6$
15	16	2,414	$7,3977 + i * 0,8998$	$7,3977 + i * 0,8998$	$i * 2,51e - 6$	$i * 2,51e - 6$
15	17	2,414	$7,3977 + i * 0,8998$	$7,3977 + i * 0,8998$	$i * 2,51e - 6$	$i * 2,51e - 6$
9	18	2,414	$7,3977 + i * 0,8998$	$7,3977 + i * 0,8998$	$i * 2,51e - 6$	$i * 2,51e - 6$
18	19	2,414	$7,3977 + i * 0,8998$	$7,3977 + i * 0,8998$	$i * 2,51e - 6$	$i * 2,51e - 6$
18	20	3,219	$7,3977 + i * 0,8998$	$7,3977 + i * 0,8998$	$i * 2,51e - 6$	$i * 2,51e - 6$
20	21	3,219	$7,3977 + i * 0,8998$	$7,3977 + i * 0,8998$	$i * 2,51e - 6$	$i * 2,51e - 6$

Tabla A.1. Parámetros de línea del sistema de distribución prototipo

La información acerca de los datos de las cargas especifica en la Tabla A.2, se presenta el valor nominal de la carga, el nodo y las fases a la que esta conectada la carga, como es la distribución en por ciento de la carga con respecto a los tres tipos de cargas básicos: motor, iluminación y calentador.

Nodo	Fase	Carga (kVA)	Composición de la carga [%]		
			Calentador	Iluminación	Motor
1	A	15,0	99,8	0,1	0,1
2	A	15,0	99,8	0,1	0,1
7	B	15,0	99,8	0,1	0,1
11	ABC	1000,0	0,1	0,1	99,8
12	ABC	67,5	99,8	0,1	0,1
14	B	15,0	99,8	0,1	0,1
15	B	15,0	99,8	0,1	0,1
16	B	7,5	99,8	0,1	0,1
17	B	15,0	99,8	0,1	0,1
18	C	25,0	99,8	0,1	0,1
19	C	15,0	99,8	0,1	0,1
21	C	15,0	99,8	0,1	0,1

Tabla A.2 Datos de carga del sistema de distribución

Los datos del generador se presentan en por unidad como se muestra en la Tabla A.3 y la base para hacer la respectiva conversión a Ohms.

Tensión Base (MVA)	Potencia Base (kVA)	impedancia de Secuencia Positiva y Negativa (p.u.)	Impedancia de Secuencia Cero (p.u.)
25	1000	$0,68283 + j2,98139$	$0,09496 + j1,39289$

Tabla A.3 Parámetros de la fuente de tensión

El factor de potencia de cada tipo de carga se muestra en la Tabla A.4.

Tipo de carga	Factor de potencia
Calentador	1
Iluminación	0,85 atraso
Motor	0,8 atraso

Tabla A.4 Factor de potencia para cada tipo de carga