



UNIVERSIDAD DE SEVILLA

## Tesis Doctoral

**Sistema para Localización de Faltas en  
Líneas Subterráneas de Distribución  
Eléctrica de Media Tensión, mediante una  
Red Distribuida de Sensores de Corriente**

**Autor:**

Enrique Personal Vázquez

**Directores:**

Dr. D. Carlos León de Mora

Dr. D. Félix Biscarri Triviño

UNIVERSIDAD DE SEVILLA



# Agradecimientos

---

En primer lugar quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos al Dr. D. Carlos León de Mora y al Dr. D. Félix Biscarri Triviño por haber realizado la dirección del presente trabajo de tesis, que con tanto esfuerzo y dedicación han hecho posible la realización del mismo.

Mi agradecimiento a D. Antonio García Delgado por sus sugerencias e ideas, por su apoyo y sobre todo por la amistad y comprensión demostrada en todos estos últimos años. También quisiera dar las gracias a mis compañeros y amigos D. Diego Francisco Larios Marín y D. Javier María Mora Merchán, por todos estos años de trabajo duro, apoyo y buenos ratos. De igual modo, quisiera también hacer extensivos mis agradecimientos a todos los miembros del Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Sevilla, sin los cuales este trabajo no hubiera sido posible.

Gracias a mi pareja, compañera y amiga Nieves, por acompañarme en esta aventura, a lo largo de la cual ha sabido demostrar grandes dosis de apoyo y paciencia, sin las que nunca me hubiera sido posible llegar al final de esta travesía. También agradecerles a mis padres, Juan y María Luisa, sus enormes esfuerzos y el apoyo incondicional que siempre han demostrado y que me han permitido alcanzar este objetivo tan importante en mi vida. En general, gracias a toda mi familia por su apoyo y cariño.

Por último, agradecer al Ministerio de Educación, Cultura y Deporte por la concesión de una de sus Becas FPU, que me ha permitido aventurarme en el presente trabajo de investigación.



## Resumen

---

Uno de los elementos más importantes de una red eléctrica es su sistema de distribución y transporte. Sin embargo, este sistema puede verse afectado por agentes externos o por el propio deterioro de sus elementos. Estos eventos indeseables suelen denominarse “faltas” y se traducen habitualmente en una interrupción del suministro eléctrico. En este sentido, antes de poder emprender las acciones paliativas el operador de la red debe localizar el punto donde ésta se ha originado. A esta tarea se la conoce con el nombre de “localización de faltas”. Tradicionalmente, la localización de faltas ha consistido en distintos métodos de campo que mediante inspección visual recorrían el trazado de la línea en busca del origen de la falta. Con el tiempo, esta disciplina ha ido mejorando mediante el desarrollo de métodos más avanzados, capaces de estimar la distancia existente hasta el punto de falta. No obstante, estos desarrollos estaban más orientados a resolver el problema sobre redes de transporte, más instrumentalizadas y simples que las redes de distribución. Es más, esta problemática se ve agravada por la importante evolución que están sufriendo en los últimos años las redes eléctricas, persiguiendo el paradigma de “red inteligente” o Smart Grid, y donde una de sus características principales es una fuerte presencia de generación distribuida. Esta nueva filosofía de red, donde los flujos energéticos dejan de ser unidireccionales, haciendo inviable la aplicación de soluciones clásicas de localización, y plantea en este sentido, una activa línea de investigación, impulsada en gran medida por las propias compañías distribuidoras, cuyo interés estratégico confluye con su necesidad de mejorar los mecanismos de localización ante estos nuevos escenarios de operación.

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

En este sentido el presente trabajo de tesis se enmarca en esa línea de investigación abordando temas como la definición y causa de las faltas, los procedimientos típicos ante un evento de falta, el marco normativo legal, así como los nuevos retos a los que se enfrentan los sistemas de distribución en una Smart Grids. Así pues, este análisis ha sido completado con un profundo examen de estado del arte en el ámbito de la localización de falta, estudiándose exhaustivamente algunos de los métodos de localización más importantes.

Finalmente, como aportación principal del presente trabajo se proponen dos novedosos métodos de localización de faltas, orientados a resolver este problema en redes de distribución eléctrica subterránea de media tensión, y cuya principal característica es que únicamente requieren medidas de fasores corriente, a diferencia de los métodos tradicionales estudiados en la literatura que requieren medidas tanto de corriente como de tensión (no siendo fácil acceder a esta última en este tipo de redes). Por un lado, el primero de los métodos plantea explotar las características típicas de este tipo de redes, y mediante un análisis de las corrientes de malla, determinar la posición de la falta. Por otro lado, el segundo de los métodos, plantea una filosofía completamente distinta, que implica desplegar sobre el sistema una red distribuida de sensores de corriente, que de forma colaborativa es capaz de estimar los puntos donde se origine una fuga de corriente. En ambos casos, los resultados de ambos métodos han sido respaldados por un estudio comparativo con otros métodos de localización ya aceptados por la comunidad científica, poniendo dichos resultados de manifiesto la bondad de los métodos propuestos y por consiguiente, la calidad del presente trabajo de investigación.

# Abstract

---

One of the most important elements of an electrical network is its distribution and transmission system. However, it can be affected by external agents or by the deterioration of their own elements. These undesirable events are generally called "faults" and usually result in a power outage. In this sense, before the network operator can take some remedial actions, this operator must find where it originated. This task is commonly known by the name of "fault location". Traditionally, fault location has involved some field methods based on visual inspection through the line route looking for the fault origin. Over time, this discipline has improved by developing more advanced methods, which are able to estimate the distance to the fault point. However, these developments were oriented more to solve problems in transmission networks, more instrumented and simpler than distribution networks. Moreover, this problem is exacerbated by the significant development that the electricity networks have been suffering in recent years, pursuing the Smart Grid paradigm, and where one of its main features is a deep presence of distributed generation. This new network philosophy, where energy flows are not unidirectional, makes the application of classical fault localization solutions unavailable. In this sense, this fact presents an active research line, led by the distribution companies, whose strategic interests join their need to improve localization mechanisms in these new operating scenarios.

In this sense, the present thesis contributes to this researches line. This is why it studies issues such as: the definition and causes of faults, the typical procedures before a fault event, the legal regulatory framework, and of course, the new challenges that distribution systems are suffering in the Smart Grids. Thus, this work

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

has been completed with a deep analysis about the state of the art about fault location, thoroughly studied under some of the most important methods of location.

Finally, as the main contribution of this thesis, two novel methods of fault location are proposed. Both methods are oriented to solve this problem in underground primary distribution networks (medium voltage), and whose main characteristics are that they only require current measurements (phasor), the opposite of traditional studied methods in the literature which require measurements of both current and voltage (voltage measurements not being easily accessible in this kind of networks). On the one hand, the first method proposes exploiting the typical characteristics in underground networks. It proposes analyzing the sheath currents to determinate the position of the fault. On the other hand, the second method poses a completely different philosophy, which implies deploying a distributed current sensor network along the distribution line, and which collaboratively will be able to estimate the points where current leakage have originated. In both cases, the results are backed by a comparative study with other location methods already accepted by the scientific community and make those results reveal the favorable nature of the proposed methods and therefore, the quality of this research work.



# Índice de Contenidos

I.	<u>Introducción</u> .....	1
I.1.	Objeto de la tesis .....	3
I.2.	Estructura de la tesis .....	4
II.	<u>Faltas en líneas de distribución eléctrica</u> .....	7
II.1.	Características de una falta .....	8
II.2.	Características de una red de distribución .....	9
II.2.1.	Líneas de distribución aéreas .....	10
II.2.2.	Líneas de distribución subterráneas .....	10
II.2.3.	Líneas de distribución mixtas .....	11
II.2.4.	Diferencias en la gestión de incidencias según el tipo de línea .....	11
II.3.	Procedimiento típico ante una falta en una línea de distribución eléctrica .....	12
II.3.1.	Etapas presentes en la fase de estudio de una falta .....	13
II.3.1.1.	Etapas de detección de la falta .....	13
II.3.1.2.	Etapas de clasificación de la falta .....	14
II.3.1.3.	Etapas de localización de la falta .....	15
II.3.2.	Etapas presentes en la fase de actuación frente a un caso de falta .....	16
II.3.2.1.	Etapas de aislamiento de la falta .....	16
II.3.2.2.	Etapas de reparación de la falta .....	17
II.4.	Aspectos legales de la continuidad de suministros .....	18
II.5.	Análisis de faltas y la modernización de las redes de distribución .....	21
II.5.1.	Tecnologías involucradas en una red tipo <i>Smart Grid</i> .....	22
II.5.2.	Localización de faltas en una <i>Smart Grid</i> .....	25
II.6.	Resumen del capítulo .....	27
III.	<u>Estado del arte; Localización de faltas</u> .....	29
III.1.	Métodos basados en el análisis de componentes fundamentales .....	32
III.1.1.	Técnicas basadas en el cálculo de la impedancia aparente en un terminal .....	32
III.1.1.1.	Revisión de los métodos más destacados basados en esta técnica .....	33
III.1.1.1.1.	Método de la componente reactiva .....	33
III.1.1.1.2.	Método Girgis et al. ....	34
III.1.1.1.3.	Método Das et al. ....	38
III.1.1.1.4.	Método Novosel et al. ....	45
III.1.1.1.5.	Método Choi et al. ....	49
III.1.1.1.6.	Método de Lee et al. ....	51
III.1.1.1.7.	Método de Salim et al. ....	53
III.1.1.1.8.	Método de Filomena et al. ....	56
III.1.1.2.	Problemática típica asociada a esta familia de métodos .....	59
III.1.1.2.1.	Problemas asociados a flujos energéticos bidireccionales .....	60
III.1.1.2.2.	Problema de múltiple estimación de la localización .....	60
III.1.1.2.3.	Problema de falta de calidad en el modelo o en las medidas .....	62

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

III.1.1.3.	Resumen de los métodos basados en esta técnica.....	63
III.1.2.	Técnicas basadas en componentes fundamentales en dos o más terminales .....	64
III.1.2.1.	Revisión de los métodos más destacados basados en esta técnica.....	65
III.1.2.1.1.	Método de Girgis(2) et al.....	65
III.1.2.1.2.	Método de Novosel(2) et al.....	67
III.1.2.1.3.	Método de Liu et al.....	69
III.1.2.1.4.	Método de Pereira et al.....	71
III.1.2.1.5.	Método de Jiang et al.....	76
III.1.2.2.	Problemática típica asociada a esta familia de métodos.....	80
III.1.2.2.1.	Problema de sincronización de las medidas entre los nodos. ....	80
III.1.2.2.2.	Problema de falta de calidad en el modelo o en las medidas.....	81
III.1.2.3.	Resumen de los métodos basados en esta técnica.....	81
III.2.	Métodos basados en el análisis de componentes de alta frecuencia .....	83
III.2.1.	Métodos basados en el análisis temporal de las medidas. ....	83
III.2.2.	Métodos basados en el análisis de las componentes frecuenciales .....	86
III.2.3.	Problemática típica asociada a esta familia de métodos.....	88
III.2.4.	Resumen de los métodos basados en esta técnica .....	88
III.3.	Métodos basados en estudios de onda viajera.....	89
III.3.1.	Revisión de los métodos más destacados de onda viajera .....	91
III.3.2.	Problemática típica asociada a esta familia de métodos.....	93
III.3.3.	Resumen de los métodos basados en esta técnica.....	93
III.4.	Resumen del capítulo.....	93
<u>IV.</u>	<u>Sistema de localización distribuido.....</u>	<u>95</u>
IV.1.	Métodos de localización propuestos .....	96
IV.1.1.	Método de localización basado en el análisis de las corrientes de malla .....	96
IV.1.1.1.	Variantes propuestas sobre el método.....	100
IV.1.1.1.1.	Aplicación del método sobre una sección con bifurcación .....	100
IV.1.1.1.2.	Aplicación del método sobre una sección con distintos modelos de cable.....	102
IV.1.1.2.	Descripción del entorno y necesidades para su aplicación .....	103
IV.1.1.3.	Resumen de las ventajas e inconvenientes del método propuesto .....	106
IV.1.2.	Método de localización basado en el balance neto de corrientes .....	107
IV.1.2.1.	Variantes propuestas sobre el método.....	110
IV.1.2.1.1.	Aplicación del método sobre una sección con bifurcación .....	112
IV.1.2.1.2.	Aplicación del método sobre una sección con distintos modelos de cable.....	113
IV.1.2.2.	Descripción del entorno y necesidades para su aplicación .....	113
IV.1.2.2.1.	Red de sensores de corriente.....	115
IV.1.2.2.1.1.	Introducción a las redes de sensores.....	115
IV.1.2.2.1.2.	Red de sensores propuesta.....	117
IV.1.2.3.	Resumen de las ventajas e inconvenientes del método propuesto .....	126
IV.1.3.	Método combinado .....	127
IV.2.	Resumen del capítulo.....	128

<u>V.</u>	<u>Resultados obtenidos .....</u>	<u>129</u>
V.1.	Descripción del entorno de prueba .....	130
V.1.1.	Características de los casos simulados.....	131
V.2.	Análisis de los resultados obtenidos .....	132
V.2.1.	Análisis general de las capacidades de localización de los distintos métodos.....	132
V.2.2.	Análisis de los métodos ante distintos tipos de falta .....	135
V.2.3.	Análisis de los métodos ante distinta posición de falta .....	137
V.2.3.1.	Análisis de los métodos ante distintas secciones afectadas .....	137
V.2.3.2.	Análisis de los métodos ante distintas posiciones dentro de la sección afectada	140
V.2.4.	Análisis de los métodos ante distintos valores de resistencia de falta.....	143
V.2.4.1.	Análisis de los métodos ante distintos valores de resistencia conductor-malla...143	
V.2.4.2.	Análisis de los métodos ante distintos valores de resistencia malla-tierra.....	145
V.2.5.	Comportamiento de los métodos ante distintos porcentaje de carga .....	148
V.3.	Resumen del capítulo.....	150
<u>VI.</u>	<u>Conclusiones y Líneas futuras .....</u>	<u>151</u>
VI.1.	Conclusiones del trabajo de investigación .....	151
VI.2.	Líneas futuras de trabajo .....	152
VI.3.	Aportaciones científicas relacionadas .....	153
VI.3.1.	Artículos en revistas indexadas según JCR.....	153
VI.3.2.	Patentes .....	153
VI.3.3.	Congresos .....	154
<u>VII.</u>	<u>Referencias.....</u>	<u>155</u>
<u>Anexo A</u>	<u>Listado de abreviaturas .....</u>	<u>169</u>
<u>Anexo B</u>	<u>Implementación de la red IEEE 37 Node Test Feeder .....</u>	<u>173</u>
B.1	Submodelo de segmento de línea .....	175
B.2	Submodelo de subsegmento de línea.....	176
B.3	Caracterización de las tipologías de cable .....	177
B.4	Submodelo de línea bajo falta .....	178
B.5	Submodelo básico de subestación .....	178
B.6	Submodelo de carga .....	179
B.7	Submodelo de arqueta .....	180
<u>Anexo C</u>	<u>Análisis de una falta por componentes simétricas.....</u>	<u>181</u>
C.1	Falta simple línea-tierra: .....	183
C.2	Falta línea-línea:.....	183
C.3	Falta línea-línea-tierra: .....	184
C.4	Falta trifásica: .....	185
C.5	Falta trifásica a tierra: .....	185

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

# Índice de Figuras

Figura II.1: Ejemplo de línea de distribución (IEEE 37 Node Test Feeder).....	9
Figura II.2: Ejemplo de línea aérea.....	10
Figura II.3: Ejemplo de línea subterránea. ....	10
Figura II.4: Ejemplo de cable subterráneo (AL RHZ1-OL, fabricante Prysmian). ....	11
Figura II.5: Representación simplificada de un sistema de distribución bajo falta. ....	13
Figura II.6: Oscilograma real de una falta registrado por un relé de protección. ....	14
Figura II.7: Topologías de una línea de distribución orientada al tratamiento de faltas. ....	17
Figura II.8: Evolución anual del TIEPI y NIEPI zonal entre los años 2003 y 2011. ....	20
Figura II.9: Ejemplo de un sistema de distribución eléctrica tradicional.....	22
Figura II.10: Ejemplo de esquema de distribución en una Smart Grid. ....	22
Figura II.11: Sistemas “Self-Healing” para la gestión de incidencias.....	25
Figura III.1: Clasificación de las técnicas de localización de faltas. ....	31
Figura III.2: Esquema simplificado de una línea de distribución radial en falta. ....	33
Figura III.3: Modelo simplificado de una línea sin ramas laterales. ....	34
Figura III.4: Modelo simplificado de línea con cargas distribuidas (mét. Girgis et al.). ....	37
Figura III.5: Sistema de distribución tipo con líneas laterales (mét. Das et al.).....	38
Figura III.6: Modelo simplificado de línea larga (mét. Das et al.).....	40
Figura III.7: Modelo simplificado de la sección bajo falta (mét. Das et al.). ....	41
Figura III.8: Modelo simplificado de línea en condición de falta (mét. Novosel et al.).....	45
Figura III.9: Modelo simplificado de línea en condición de pre-falta (mét. Novosel et al.). ..	45
Figura III.10: Modelo simplificado de componentes superimpuestas (mét. Novosel et al.). .	46
Figura III.11: Modelo simplificado de línea en condición de falta (mét. Choi et al.).....	49
Figura III.12: Modelo simplificado de línea en condición de falta (mét. Lee et al.). ....	51
Figura III.13: Modelo simplificado de faltas (mét. Salim et al.).....	54
Figura III.14: Modelo simplificado de faltas en líneas subterráneas (mét. Filomena et al.)....	56
Figura III.15: Esquema simplificado de una línea de distribución en falta. ....	64
Figura III.16: Modelo simplificado de línea en condición de falta (mét. Girgis(2) et al.).....	65
Figura III.17: Modelo de línea con bifurcación en cond. de falta (mét. Girgis(2) et al.). ....	66
Figura III.18: Modelo simplificado de línea en condición de falta (mét. Novosel(2) et al.) ...	67
Figura III.19: Modelo simplificado de línea en falta, con varias secciones (mét. Liu et al.)....	70
Figura III.20: Estructura jerárquica de capas y nodos de la IEEE 37 Node Test Feeder. ....	73
Figura III.21: Modelo de sección de línea (mét. de Jiang et al.).....	77
Figura III.22: Modelo simplificado de línea (mét. de Jiang et al.).....	78
Figura III.23: Modelo simplificado de línea, con falta (mét. de Jiang et al.). ....	79
Figura III.24: Modelo de sección línea corta (análisis de la falta en el dominio del tiempo)..	84

Figura III.25: Estructura del banco de filtros en un MRA. ....	86
Figura III.26: Estudio de reflexiones asociadas a una falta en un modelo simple de línea.....	89
Figura IV.1: Esquema básico de una sección de línea subterránea afectada por una falta. ....	97
Figura IV.2: Análisis por fase de las ecuaciones de falta en un cableado subterráneo. ....	98
Figura IV.3: Análisis de un caso de falta en una sección con bifurcación.....	101
Figura IV.4: Análisis de sección con distintos modelos de cable. ....	103
Figura IV.5: Esquema básico del conexionado típico en MT de CT genérico.....	104
Figura IV.6: Ejemplo de localización en una red simple (1 <sup>er</sup> método propuesto). ....	105
Figura IV.7: Balance neto de corriente a lo largo de un cable subterráneo.....	107
Figura IV.8: Análisis del flujo neto de corriente en un fallo de aislamiento interno. ....	109
Figura IV.9: Despliegue de sensores de balance de corriente en una línea subterránea tipo. ....	111
Figura IV.10: Balance neto de corriente en un cable subterráneo con bifurcación. ....	112
Figura IV.11: Ejemplo de localización en una red simple (2 <sup>o</sup> método propuesto). ....	113
Figura IV.12: Oscilogramas asociados a los distintos nodos del 2 <sup>o</sup> método propuesto. ....	114
Figura IV.13: Estructura genérica de un nodo sensor. ....	116
Figura IV.14: Arquitectura de red propuesta. ....	117
Figura IV.15: Ejemplo de subsistema de alimentación de un nodo. ....	119
Figura IV.16: Ejemplo de gestión energética de un nodo.....	119
Figura IV.17: Pruebas de comunicación inalámbricas en arquetas.....	122
Figura IV.18: Bandas CENELEC. ....	123
Figura IV.19: Esquema del circuito de comunicaciones.....	124
Figura IV.20: Prueba sobre el subsistema de comunicaciones. ....	125
Figura IV.21: Diferencia principal entre los dos métodos propuestos. ....	128
Figura V.1: Topología de la red de prueba (IEEE 37 Node Test Feeder). ....	131
Figura V.2: Porcentajes de casos válidos para cada método.....	133
Figura V.3: Errores globales cometidos por los distintos métodos analizados.....	134
Figura V.4: Detalle del error cometido por los métodos con mejores resultados globales..	134
Figura V.5: Porcentaje de datos válidos según el tipo de falta. ....	135
Figura V.6: Porcentaje de datos válidos según la sección afectada.....	138
Figura V.7: Evolución del error medio según la sección afectada. ....	138
Figura V.8: Porcentaje de datos válidos según la posición normalizada. ....	141
Figura V.9: Evolución del error medio según la posición normalizada.....	141
Figura V.10: Porcentaje de datos válidos según la resistencia conductor-malla.....	143
Figura V.11: Evolución del error medio según resistencia conductor-malla.....	144
Figura V.12: Porcentaje de datos válidos según la resistencia malla-tierra. ....	146
Figura V.13: Evolución del error medio según resistencia malla-tierra.....	147
Figura V.14: Porcentaje de datos válidos según el porcentaje de carga. ....	148

Figura V.15: Evolución del error medio según el porcentaje de carga..... 148

Figura A1: Modelo implementado en PSCAD de la IEEE 37 Node Test Feeder. .... 174

Figura A2: Submodelo del tramo 001 de la línea, implementado en PSCAD. .... 176

Figura A3: Submodelo de un subsegmento del tramo 001, implementado en PSCAD. .... 176

Figura A4: Símbolo de la caracterización de cableado. .... 177

Figura A5: Submodelo de subsegmento bajo falta, implementado en PSCAD. .... 178

Figura A6: Submodelo básico de subestación, implementado en PSCAD. .... 178

Figura A7: Submodelo de carga, implementado en PSCAD. .... 179

Figura A8: Submodelo de arqueta, implementado en PSCAD. .... 180

Figura A9: Diagrama en red de secuencia de una falta simple línea-tierra..... 183

Figura A10: Diagrama en red de secuencia de una falta línea-línea..... 184

Figura A11: Diagrama en red de secuencia de una falta línea-línea-tierra..... 184

Figura A12: Diagrama en red de secuencia de una falta trifásica. .... 185

Figura A13: Diagrama en red de secuencia de una falta trifásica a tierra..... 185

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente



# Índice de Tablas

Tabla II.1: Clasificación habitual de los tipos de faltas.....	15
Tabla II.2: Límites establecidos para la calidad zonal. ....	21
Tabla II.3: Límites establecidos para la calidad individual.....	21
Tabla III.1: Extensión para distintos casos de falta (mét. de Girgis et al.).....	36
Tabla III.2: Mejor fase referencia en cada tipo de falta (mét. de Das et al.). ....	40
Tabla III.3: Resistencia de falta según el tipo (mét. de Das et al.). ....	43
Tabla III.4: Extensión para distintos casos de falta (mét. Novosel et al.). ....	48
Tabla III.5: Comparativa entre mét. de impedancia aparente en un terminal. ....	63
Tabla III.6: Comparativa entre mét. de componentes fund. en dos o más terminales. ....	82
Tabla III.7: Clasificador de falta (mét. de Dutta et al.).....	85
Tabla IV.1: Ejemplo de extracción máxima de energía en un nodo, según acoplamiento. ....	119
Tabla IV.2: Bandas CENELEC.....	123
Tabla V.1: Análisis del porcentaje de casos válidos de prueba. ....	133
Tabla V.2: Análisis del error de localización ante una falta simple en la fase a. ....	136
Tabla V.3: Análisis del error de localización ante una falta simple en la fase b.....	136
Tabla V.4: Análisis del error de localización ante una falta simple en la fase c. ....	136
Tabla V.5: Análisis del error de localización ante una falta trifásica. ....	136
Tabla V.6: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 001.....	139
Tabla V.7: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 005.....	139
Tabla V.8: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 012.....	139
Tabla V.9: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 014.....	139
Tabla V.10: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 019.....	139
Tabla V.11: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 021.....	140
Tabla V.12: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 023.....	140
Tabla V.13: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 028.....	140
Tabla V.14: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 034.....	140
Tabla V.15: Análisis del error de localización ante una falta en $m = 0.1$ . ....	142
Tabla V.16: Análisis del error de localización ante una falta en $m = 0.3$ . ....	142
Tabla V.17: Análisis del error de localización ante una falta en $m = 0.5$ . ....	142
Tabla V.18: Análisis del error de localización ante una falta en $m = 0.7$ . ....	142
Tabla V.19: Análisis del error de localización ante una falta en $m = 0.9$ . ....	142
Tabla V.20: Análisis del error de localización ante una falta con $R_f = 0.01\Omega$ .....	144
Tabla V.21: Análisis del error de localización ante una falta con $R_f = 0.1\Omega$ .....	145
Tabla V.22: Análisis del error de localización ante una falta con $R_f = 1\Omega$ .....	145
Tabla V.23: Análisis del error de localización ante una falta con $R_f = 10\Omega$ .....	145

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

Tabla V.24: Análisis del error de localización ante una falta con $R_f = 100\Omega$ .....	145
Tabla V.25: Análisis del error de localización ante una falta con $R_{fg} = 0.01\Omega$ .....	146
Tabla V.26: Análisis del error de localización ante una falta con $R_{fg} = 0.1\Omega$ .....	146
Tabla V.27: Análisis del error de localización ante una falta con $R_{fg} = 1\Omega$ . ....	147
Tabla V.28: Análisis del error de localización ante una falta con $R_{fg} = 10\Omega$ . ....	147
Tabla V.29: Análisis del error de localización ante una falta con $R_{fg} = 100\Omega$ .....	147
Tabla V.30: Análisis del error de localización ante una falta con carga al 0%.....	149
Tabla V.31: Análisis del error de localización ante una falta con carga al 25%.....	149
Tabla V.32: Análisis del error de localización ante una falta con carga al 50%.....	149
Tabla V.33: Análisis del error de localización ante una falta con carga al 75%.....	149
Tabla V.34: Análisis del error de localización ante una falta con carga al 100%.....	150
Tabla A1: Características de los tramos de línea implementados en el modelo. ....	175
Tabla A2: Caracterización de las cuatro tipologías de cable utilizadas. ....	177
Tabla A3: Distribución de cargas en los distintos nodos de la línea.....	180

# I. Introducción

---

A día de hoy, una de las partes más importantes que compone el sistema eléctrico, tal y como lo conocemos, es el sistema de Distribución y Transporte (D&T), que como su nombre indica es el encargado de realizar la tarea de conectar los distintos actores que componen la red (generadores y consumidores). Dentro de este sistema se puede hacer, como ya se verá más adelante, una distinción entre la red de transporte y la red de distribución, atendiendo fundamentalmente a su nivel de tensión de trabajo y a la complejidad de sus topologías (siendo este último tipo el que presenta un menor nivel de tensión y un nivel mayor de ramificación).

Centrándonos en la red de distribución, encontramos el rol de operador del sistema de distribución (o *Distribution System Operator*, DSO). Este nuevo actor es el encargado, a través de sistema de gestión de la distribución (o *Distribution Management System*, DMS), de controlar todos los elementos que componen esta red, adaptando en cada momento, su configuración y condiciones de trabajo a las necesidades puntuales demandadas por el conjunto del sistema eléctrico.

Una de las tareas más importantes que ha de realizar el DMS para garantizar que el suministro de energía sea lo más continuo posible, es llevar a cabo la gestión de incidencias. Esta tarea se lleva a cabo a través de su subsistema de gestión de cortes de energía (*Outage Management Systems*, OMS), que es el encargado de llevar a cabo las acciones que sean necesarias sobre el sistema de distribución para minimizar los efectos de una posible incidencia sobre éste. Sin embargo, para poder realizar dichas acciones, una de las principales tareas que se ha de hacer es conocer la posición exacta donde se ha originado dicha incidencia.

En este sentido, en las últimas décadas, se han desarrollado gran cantidad de técnicas orientadas a estimar, cada vez con mayor precisión, la posición donde se ha originado dicha incidencia. Todo esto bajo el paraguas de una activa línea de investigación denominada “localización de falta” (o en su término inglés, “*fault location*”). Prueba de la importancia de esta línea se pone de manifiesto en el documento IEEE C37.114[1], donde en su versión más reciente de 2014, se establecen una serie de recomendaciones a la hora de abordar este problema.

Así pues, actualmente, la localización de faltas en líneas de distribución es una necesidad esencial para las compañías eléctricas, traducándose los siguientes beneficios:

- Mejora la disponibilidad y rendimiento del sistema.
- Una restauración más rápida del servicio en caso de avería.
- Reduce los costes de operación, así como de las sanciones asociadas al incumplimiento de los términos legales de continuidad de suministro.

Sin embargo, la mayoría de los esfuerzos en el ámbito de la localización de faltas se han centrado siempre en líneas de transporte (más simples y de mayor importancia), y es en los últimos años cuando esta disciplina ha empezado a extenderse a la redes de distribución. Así pues, en la actualidad, todavía es fácil encontrar sistemas de distribución en los que la localización se basa en inspección visual directa (requiriendo recorrer su trazado para encontrar la causa del fallo), o en métodos dicotómicos, en el que se va acotando progresivamente la zona afectada. Esta filosofía se aleja considerablemente de las filosofías automáticas de detección y aislamiento de faltas, (*Fault Detection and Isolation*, FDI), para las cuales un sistema de localización de faltas, automático y fiable es esencial.

Por otro lado, otro importante hándicap para la localización de faltas, es el prominente cambio que están sufriendo las redes eléctricas en la actualidad. La cada vez mayor presencia de la generación distribuida, está cambiando la filosofía de las redes de distribución, ya que ahora los flujos de energía no son unidireccionales, inhabilitando los principios en los que se basaban algunos métodos clásicos de localización, y haciendo inviable la aplicación. Esto se traduce en la necesidad directa del desarrollo de nuevos métodos adaptados a esta nueva filosofía.

Obviamente, esta nueva metodología deseada requiere una instrumentación y una infraestructura muchas veces no disponible, y cuyos elevados costes puedan hacer inviables su despliegue en redes tan ramificadas (con tantos puntos de medida) como son las redes de distribución. Esto implica que enfoques o soluciones

propuestas para redes más simples y menos numerosas (como son las de transporte) no sean extensibles a redes de distribución.

Concretamente, en base a un estudio de las soluciones propuestas en el ámbito de la localización de falta en redes de distribución eléctrica de Media Tensión (MT), es fácil identificar que este problema está aún sin resolver, planteando una línea de investigación con un amplio recorrido, y donde trabajos que busquen explotar la información disponible (utilizando las características específicas de este tipo de redes), o nuevos sistemas que doten a éstas de información nueva que permitan realizar la localización de la posición de la falta, son de vital importancia.

En este sentido, y a grandes rasgos, el presente trabajo tesis persigue el completar la investigación actual en el ámbito de la localización de faltas en líneas de distribución eléctrica de MT, centrando su aplicación en redes subterráneas. Concretamente, este trabajo presenta la aportación de dos nuevos métodos de localización complementarios, que explotando las características constructivas propias del cableado subterráneo de MT, permiten implementar un mecanismo de localización de falta en este tipo de redes.

Sendos métodos, como se analizan a lo largo del presente trabajo de tesis, presentan importantes ventajas sobre la metodología actual, pudiendo ser considerados una relevante aportación en el ámbito de la localización de faltas en redes de distribución eléctrica.

## **I.1. Objeto de la tesis**

El trabajo planteado en la presente tesis persigue los siguientes objetivos:

- Análisis del panorama actual en el ámbito de la localización de faltas, así como su nuevo rol dentro de la nueva filosofía de redes eléctricas inteligentes (o *Smart Grids*).
- Análisis de la metodología presentada hasta la fecha orientada a la localización de falta en sistemas de distribución eléctrica.
- Desarrollo de uno o varios métodos de localización de faltas en redes de distribución subterráneas, basados únicamente en medidas de corriente, y que sean compatibles con las nuevas tipologías de redes eléctricas con cargas heterogéneas y generación distribuida.
- Descripción y especificación de las características de los sistemas necesarios para la aplicación de la metodología propuesta en el presente trabajo.
- Estudio de las capacidades y precisión de la metodología propuesta, comparándola con los métodos previos de localización.

## **I.2. Estructura de la tesis**

El presente documento de tesis está estructurado en siete capítulos y tres anexos, cada uno de los cuales tiene un objetivo concreto, y cuyo orden pretende servir de hilo conductor para facilitar el entendimiento de la misma por parte del lector.

Estos siete capítulos son:

- **Capítulo I: Introducción;** donde se realiza una breve descripción del presente trabajo, destacando sus objetivos y estructura.
  - **Capítulo II: Faltas en líneas de distribución eléctrica;** este capítulo describe el entorno en el que se enmarca el presente documento de tesis, realizando un repaso del problema (faltas eléctricas), procedimientos típicos de las compañías de distribución eléctrica ante una falta, marco normativo legal en español asociado y finalmente, los nuevos retos a los que se enfrentan los futuros (o ya presentes) sistemas de distribución y concretamente el OMS, dentro del nuevo escenario de las *Smart Grids*. Todo esto para poner de manifiesto la necesidad de nuevos sistemas de localización de faltas, y dentro del que se enmarcaría el presente trabajo de tesis.
  - **Capítulo III: Estado del arte; Localización de faltas;** como su nombre indica, en este apartado se realiza una revisión detallada de la bibliografía, donde se analiza el estado actual de desarrollo de las técnicas y métodos de la localización de faltas, propuestos en distintos trabajos hasta la fecha. Este estudio ha sido organizado agrupando los distintos métodos por la técnica de funcionamiento en la que están basados.
  - **Capítulo IV: Sistema de localización distribuido;** este capítulo representa el núcleo de la tesis, poniendo de manifiesto la aportación central de la tesis, describiéndose detalladamente los dos nuevos métodos de localización de faltas propuestos, ambos orientados a resolver este problema en redes de distribución eléctrica subterránea.
- Capítulo V: Resultados obtenidos;** este capítulo está formado por los distintos estudios y análisis que permiten verificar la bondad de los dos métodos de localización propuestos en el Capítulo IV. Estos estudios analizan la sensibilidad de ambos métodos ante distintas condiciones de falta, siempre comprobando sus resultados con algunos de los métodos clásicos propuestos en el estado del arte (Capítulo III).

- **Capítulo VI: Conclusiones;** este punto presenta las conclusiones derivadas del desarrollo de esta tesis. También se resaltan las aportaciones científicas del autor, asociadas a este trabajo, así como se exponen las líneas futuras de trabajo que se plantean tras finalizar su doctorado.
- **Capítulo VII: Referencias;** listado de las referencias utilizadas a lo largo del presente trabajo.

Los tres anexos se dividen en:

- **Anexo A: Listado de abreviaturas;** listado de siglas de los conceptos que han aparecido a lo largo del presente trabajo.
- **Anexo B: Implementación de la red IEEE 37 Node Test Feeder;** descripción del modelo implementado para las pruebas y simulaciones realizadas en el presente trabajo.
- **Anexo C: Análisis de una falta por componentes simétricas;** resumen de la formulación de los distintos tipos de falta, aplicando un análisis por componentes de redes de secuencia.

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente



## II. Faltas en líneas de distribución eléctrica

---

Para entender la importancia que tiene poder realizar un tratamiento adecuado de una falta o defecto dentro de un sistema de distribución eléctrica, es esencial describir previamente que se entiende por una situación de falta.

Así pues, dentro de un sistema de distribución eléctrica se define como “falta” (también conocido por su anglicismo “*fault*”, por el término “defecto” o por las denominaciones menos utilizadas como “fallo” o “falla”) cualquier evento que provoque algún tipo de anomalía sobre la corriente eléctrica que circula por las líneas o conductores de dicho sistema.

En la mayoría de los casos, la aparición de una falta suele desembocar en un deterioro o desperfecto derivado de ésta, mucho mayor que la propia causa que la originó. Este carácter destructivo asociado a este tipo de eventos, hace imprescindible la desconexión de dicho sistema (interrumpiendo el flujo de energía) ante una falta, con el fin de minimizar los daños. Posteriormente, se requerirá reparar dicha avería antes de poder restablecer el servicio de la línea.

Obviamente, una falta es una situación indeseada, que no suele ser habitual, y que en caso de darse estará asociada a varias causas[2]: fallos en los elementos de las instalaciones (ej.: caída de líneas aéreas, degradación del aislamiento en cables subterráneos, etc.), condiciones climatológicas adversas (ej.: tormentas, rayos, nieve, etc.) o acciones externas (ej.: errores humanos, contacto de aves u otros animales con los conductores, caída de árboles sobre las líneas, etc.).

## II.1. Características de una falta

Obviamente, cualquier situación de falta sobre un sistema de distribución eléctrica es una situación indeseable ya que ésta impide que pueda desempeñar su objetivo principal, transportar la energía eléctrica entre dos puntos (generación y consumo). Sin embargo, existen distintas tipologías de falta, cada una de ellas asociadas a distintas características, condicionadas fuertemente por las causas que la originaron. Estas características permiten realizar las siguientes clasificaciones:

- **Duración de la falta;** en un sistema de distribución se pueden producir faltas permanentes y faltas transitorias. Generalmente, las faltas transitorias producen menores desperfectos, pero son más difíciles de identificar, ya que desaparecen al desconectar la línea (no siendo visibles tras esto). Por el contrario las faltas permanentes, además de causar mayores desperfectos, no desaparecen, requiriéndose una acción directa para solucionarla.
- **Impedancia de la falta;** esta característica representa el nivel de “oposición” al paso de la corriente que presenta el punto donde se produce la falta. Estas pueden ser de baja impedancia, asociadas habitualmente a fenómenos de cortocircuito o derivación (o *shunt fault*), en donde la corriente puede alcanzar valores muy elevados, causando importantes desperfectos sobre la línea. También pueden ser de alta impedancia, típicamente asociadas a fenómenos de arco eléctrico (o *arcing fault*[3]), con efectos menos destructivos que el cortocircuito, al producirse corrientes mucho menores, pero con alto riesgo de incendio.
- **Contacto con tierra;** esta característica representa cuando alguno de los conductores muestra una resistencia reducida entre el punto de falta y el potencial de tierra, de tal forma que el retorno total o parcial de corriente de falta se realiza por este camino.
- **Número de líneas involucradas;** esta característica representa el número de líneas del sistema de distribución que están implicadas en la falta. También se podría entender como el número de líneas por las que circula la corriente asociada al evento de falta.
- **Interrupción de la línea;** esta característica está asociada al hecho de que alguno de los conductores de la línea se seccione o se corte, no llegando energía a las cargas conectadas después de dicho punto de falta.

No obstante, debido a su interés práctico, la forma más habitual de calificación es la basada en el criterio de número de líneas involucradas y si existe un contacto a tierra.

## II.2. Características de una red de distribución

Otro factor importante para entender las consecuencias de una falta, es conocer cómo funciona un sistema de distribución y cuáles son sus características. Como se ha contado anteriormente, el objetivo de un sistema de distribución es transportar la energía desde uno o varios puntos de generación, hasta los distintos puntos donde ésta se consume. En la Figura II.1 se puede observar un ejemplo de sistema de distribución donde la energía se inyecta desde un único punto (nodo 799) y es repartida entre las distintas cargas (conectadas en el resto de nodos) a través de los distintos segmentos o secciones de línea que conforman el sistema de distribución.

Es importante en este punto hacer una distinción entre los sistemas de distribución (típicos en media tensión) y los sistemas de transporte (típicos en alta tensión, y jerárquicamente superior). Concretamente, las líneas de transporte presentan una topología más simple (menos ramificada) que las líneas de distribución (con la presencia de cargas y líneas laterales). Desde el punto de vista de los sistemas de protección, debido a su mayor importancia (mayor dependencia de clientes) y menor número, las líneas de transporte habitualmente disponen de un mayor grado de instrumentación, así como de unos sistemas de protección más precisos.

Un sistema de distribución típico, presenta un sistema de protección basado en un relé, ubicado en la cabecera de la línea (subestación) y que será el responsable de la desconexión de la línea en caso de la aparición de una falta. Es interesante destacar que con el objetivo de minimizar la corriente de falta en sistemas de distribución, es muy frecuente conectar el neutro del secundario del transformador de la subestación a tierra, normalmente a través de una resistencia (*Resistance earthed systems*). Sin embargo, también existen otras topologías de conexión; sin conexión (*Unearthed neutral*), conexión directa (*Solid-earthed neutral*) o neutro resonante (*Resonant earthed system*), condicionando fuertemente el tipo de protección a utilizar.

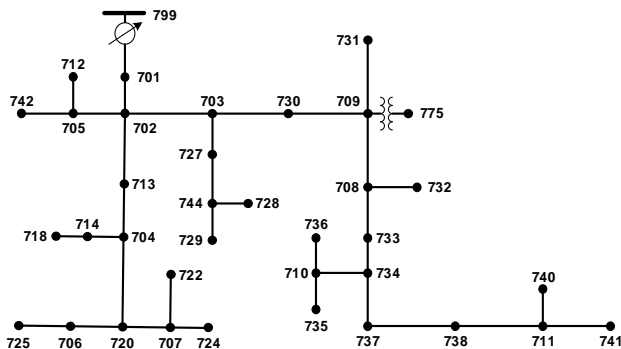
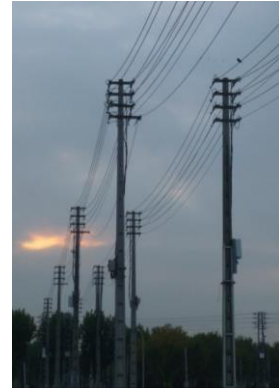


Figura II.1: Ejemplo de línea de distribución (IEEE 37 Node Test Feeder).

Atendiendo a los elementos encargados de realizar el transporte de energía a lo largo de su trazado de línea, es habitual encontrar distintos tramos o secciones, pudiendo tener cada una de éstas una características (sección, tipología, etc.) distintas. Estas secciones no tienen que corresponder directamente al trazado entre dos centros de transformación (CTs) o cargas, pudiendo encontrar algún caso en el que exista más de una sección entre éstos. Concretamente, en una línea de distribución es posible distinguir dos tipos de secciones:

### **II.2.1. Líneas de distribución aéreas**

Las líneas de distribución aérea (ver ejemplo en la Figura II.2) consisten en un cableado, cuyo trazado se realiza, suspendiendo en el aire los distintos conductores que componen la línea. Dichos trazados, se sostienen sobre postes, formados por apoyo (parte inferior) y armado (parte superior, con distintos tipos; bóveda, cruceta, etc.) que están unidos al cableado mediante aisladores. Normalmente, el tipo de cable empleado carece de aislamiento, y su sección dependerá de la carga máxima para la que se ha planificado la línea. El modelo y tipología del cableado y del poste utilizado está regulado por la legislación vigente de cada país, sin embargo también depende directamente de cada DSO (ej.: la empresa española Endesa Distribución regula este tipo de instalaciones a través de sus normativa específicas en este ámbito[4][5]).



*Figura II.2: Ejemplo de línea aérea.*

### **II.2.2. Líneas de distribución subterráneas**



*Figura II.3: Ejemplo de línea subterránea.*

Como su nombre indica, en este tipo de redes su trazado se realiza por debajo del suelo, a través de canalizaciones o tubos enterrados (ver Figura II.3). La principal característica que distingue este tipo de líneas es que utilizan un cableado con conductores aislados, recubiertos por una vaina protectora o malla metálica, todo a su vez recubierto por una funda exterior (ver detalle Figura II.4), conectada al potencial de masa. Al igual que sucedía con las líneas aéreas el tipo de cableado, así como las características propias de la instalación, estarán sujetas a la legislación vigente de cada país, pero también depende de cada DSO.



Figura II.4: Ejemplo de cable subterráneo (AL RHZ1-OL, fabricante Prysmian).  
 (1) Conductor de Aluminio, (2) Semiconductora interna, (3) Aislamiento (polietileno reticulado, XLPE),  
 (4) Semiconductora externa, (5) Protección longitudinal contra el agua, (6) Pantalla de cobre,  
 (7) Separador, (8) Cubierta exterior de poliolefina termoplástica

Un ejemplo de esto puede verse con la normativa[4][6] que regula este tipo de instalaciones, suministrada por la empresa Endesa Distribución, y donde se establece que en una línea de distribución subterránea deberá colocarse una arqueta de registro máximo cada 40 metros o en cada cambio de dirección.

Uno de los principales problemas de este tipo de líneas es, que debido al tipo de cableado que utilizan (que presenta una mayor capacidad en derivación), aparece una diferencia de potencia entre el conductor y la malla (habitualmente conectada en sus dos extremos a tierra). Dicha tensión en trazados cortos no suele ser importante, pero en líneas de larga distancia, ésta sí ha de tenerse en cuenta, debiendo ser reducidas con técnicas como el cruzamiento de mallas (o *cross bonding*), una técnica parecida a la transposición de las fases (utilizada para compensar la asimetría de las líneas), pero realizando en este caso la permutación únicamente de las mallas, permitiendo así ir compensando esta tensión a lo largo de la línea.

### II.2.3. Líneas de distribución mixtas

En realidad es difícil encontrar sistemas de distribución que sean completamente aéreos o subterráneos. Generalmente, en cualquier sistema de distribución real coexisten secciones de líneas aéreas con secciones de cableados subterráneos, con una gran fiabilidad y rendimiento. Únicamente, en casos concretos, como los cableados metropolitanos, es donde esta instalación es prominentemente subterránea, por razones estéticas y de seguridad.

### II.2.4. Diferencias en la gestión de incidencias según el tipo de línea

Desde el punto de la gestión de faltas o incidencias, es muy importante conocer qué tipos de líneas conforman el sistema de distribución, ya que condicionará fuertemente el modelo[7] que se aplicará en los algoritmos para la gestión de incidencias, en especial en lo que se refiere a los métodos de localización de faltas basados en modelos (ver Capítulo III), y los cuales dependerán directamente de

dicha caracterización. Concretamente, las líneas subterráneas presentan una menor inductancia distribuida que las líneas aéreas, pero debido a sus características constructivas[8], presenta una mayor componente capacitiva en derivación, que debe ser tenida en cuenta a la hora de implementar dicho modelo.

Además, atendiendo a la topología de cada tipo de red se pueden identificar causas y tipologías potenciales de falta. Por un lado, los sistemas de distribución aéreos están más expuestos a fallos transitorios. Así pues, en este tipo de redes, las causas principales de una falta permanente son derivadas de factores meteorológicos (ej.: relámpagos, viento y niebla), caída de árboles, pudiendo ser fácilmente identificados sus efectos de forma visual. Por otro lado, los sistemas de distribución subterránea se caracterizan por una alta fiabilidad, estando menos expuestos a faltas transitorias. En el caso de falta permanente, éstas suelen estar originadas por la degradación del aislamiento o fenómenos de arborescencias acuosas[9][10] (*water-treeing*), que al no poder identificarse visualmente, requiere la aplicación de técnicas y equipos específicos para su localización. Además, la presencia de la malla, hace que el sistema sea más propenso a faltas simples con derivación a tierra o faltas trifásicas, centrándose los estudios en este tipo de fallos. Obviamente, en sistemas de distribución mixtos, no se podrán hacer ningún tipo de simplificación o suposición de este tipo, teniendo que analizar el sistema sección a sección, aplicando distintos modelos o consideraciones en función de la tipología de cada una de éstas. No obstante, la experiencia ha demostrado que entre el 70 y el 80 por ciento de todas las faltas son simple con derivación a tierra (o *single-phase-to-ground faults*)[11].

### **II.3. Procedimiento típico ante una falta en una línea de distribución eléctrica**

Una vez estudiados tanto la naturaleza de las faltas eléctricas, así como el funcionamiento básico de un sistema de distribución, el siguiente paso es entender las distintas tareas a realizar ante un evento de dicha naturaleza.

En este sentido, cuando un fenómeno indeseable como una falta se origina dentro de un sistema de distribución eléctrica, el objetivo de cualquier DSO es el de minimizar su impacto sobre ésta. Estas tareas son llevadas a cabo por el OMS, que de forma supervisada (o automática), irán realizando una serie de acciones para tratar la falta. Estas acciones o etapas, se pueden clasificar en dos fases; una primera fase de estudio para extraer las características y posición de la falta, y una segunda fase de realización de acciones con el objetivo de minimizar el área afectada. Con el objetivo de un mejor entendimiento de este proceso, ambas fases serán detalladas en los siguientes apartados:

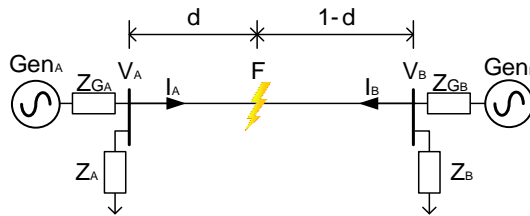


Figura II.5: Representación simplificada de un sistema de distribución bajo falta.

### II.3.1. Etapas presentes en la fase de estudio de una falta

Como se ha comentado previamente, cuando se origina una falta en un sistema de distribución eléctrica su tratamiento o atención, se divide en varias etapas. Dentro de este análisis es fácil distinguir tres etapas; detección, clasificación y localización de la falta. Atendiendo a la Figura II.5, es posible observar una representación simplificada de una sección de línea bajo una falta, y en la que es posible asociar cada etapa del análisis a las cuestiones ¿Cuándo?, ¿Cómo? y ¿Dónde?, y cuyos detalles se analizarán en los siguientes apartados:

#### II.3.1.1. Etapas de detección de la falta

La fase de detección es la etapa inicial dentro del tratamiento y análisis de una falta. Como se ha contado anteriormente, esta etapa responde a la pregunta de “¿cuándo ha ocurrido la falta?”. Obviamente, debido a los efectos destructivos que suelen ir asociados a una falta, interesa que la detección sea lo más rápida posible, con el fin de poder “desenergizar” o desconectar la línea en el menor tiempo posible, con el fin de proteger su integridad.

La detección de una falta se realiza habitualmente mediante los relés digitales de protección (o *Digital Protective Relay*, DPR), ubicados frecuentemente en la cabecera (u origen de la línea), y que analizan las corrientes y tensiones, activando el elemento disyuntor en caso de detectar una falta.

Estos análisis para la detección de faltas se pueden hacer directamente sobre estas magnitudes, de tensión y corriente, a través de las componentes complejas de su impedancia resultante[12]. Sin embargo los métodos más habituales consisten en el análisis de sus componentes simétricas (ver detalles en Anexo C), donde las componentes de secuencia negativas y de cero son características en una situación de falta[13]. Otros métodos plantean el uso de las componentes superpuestas[14], o el análisis de las componentes frecuencias, aplicando técnicas como la transformada rápida de Fourier[15] (*Fast Fourier Transform*, FFT) o transformada discreta de Wavelet[16][17] (*Discrete Wavelet Transform*, DWT).

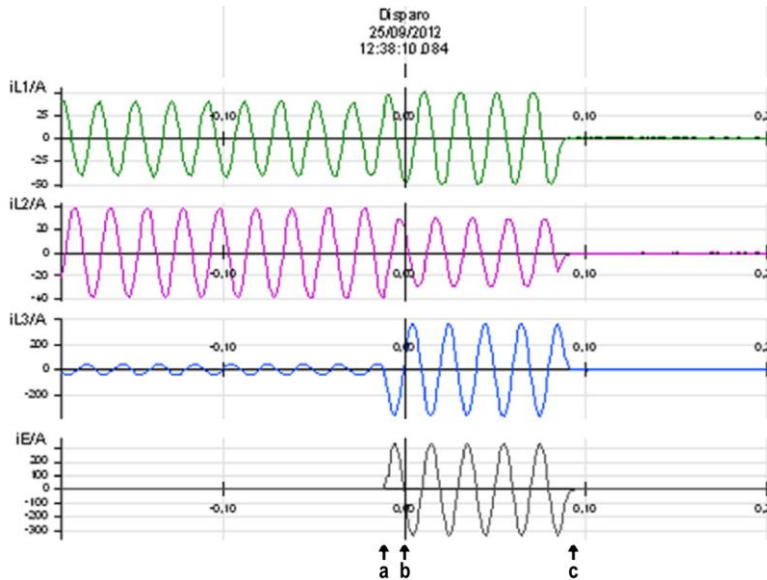


Figura II.6: Oscilograma real de una falta registrado por un relé de protección.

Un ejemplo del comportamiento de un relé de protección, puede observarse en la Figura II.6. Esta figura responde a la representación gráfica de la corriente asociada a cada línea ( $iL1$ ,  $iL2$ ,  $iL3$ ) y de la corriente homopolar ( $iE$ ) registradas por éste, ubicado en la cabecera de una línea de distribución real, ante una situación de falta. En esta figura podemos observar el instante “a” en el que se produce la falta, el tiempo que tarda el distintivo en detectarla (entre “a” y “b”, 10ms aprox.) y finalmente el tiempo que tarda en desconectar completamente la línea (entre “b” y “c”, 90ms aprox.). Estos registros de datos u oscilogramas son habitualmente almacenados por los relés de protección, utilizando el formato estándar CONTRADE[18], definido según su norma para el intercambio de información asociada a faltas, pruebas y simulaciones de sistemas eléctricos, y que podrá ser utilizado en las fases posteriores como la clasificación o la localización de la falta.

### II.3.1.2. Etapa de clasificación de la falta

Una vez realizada la detección de la falta, la siguiente etapa será analizar “¿Cómo ha sido la falta?”, o lo que es lo mismo, de que tipo ha sido ésta. Anteriormente ya fueron analizadas las características asociadas a una falta (ver apartado II.1), y que podrán ser utilizadas para hacer una clasificación de la misma. Sin embargo, esta etapa, se centra sobre todo en identificar el tipo de falta, centrándose en qué número de fases y cuál de éstas estarían involucradas en la falta (ver Tabla II.1). Dicha información será de gran utilidad en la etapa posterior de localización, cuyos métodos o procedimiento pueden venir condicionados por ésta.



Nº Líneas Implicadas \ Derivación a Tierra	Sin derivación a tierra	Con derivación a tierra
1 (línea a)		"I-g" Falta simple o monofásica con derivación a tierra en línea a
1 (línea b)		"I-g" Falta simple o monofásica con derivación a tierra en línea b
1 (línea c)		"I-g" Falta simple o monofásica con derivación a tierra en línea c
2 (líneas ab)	"I-I" Falta entre dos líneas a y b	"I-I-g" Falta entre dos líneas a y b con derivación a tierra
2 (líneas bc)	"I-I" Falta entre dos líneas b y c	"I-I-g" Falta entre dos líneas b y c con derivación a tierra
2 (líneas ca)	"I-I" Falta entre dos líneas c y a	"I-I-g" Falta entre dos líneas c y a con derivación a tierra
3	Falta trifásica "I-I-I"	

Tabla II.1: Clasificación habitual de los tipos de faltas.

Con el objetivo de realizar la clasificación del tipo de falta, es posible encontrar varias técnicas o trabajos científicos que utilizan como datos los registros de falta almacenados por el propio relé de protección (DPR) o procedentes de otros equipos de registro típicos en una subestación, como los registradores digitales de falta (o *Digital Fault Recorder*, DFR). No obstante, al igual que sucedía en la etapa de detección, una técnica habitual es utilizar el análisis directo sobre las componentes simétricas, donde las componentes negativas y de cero de tensión y corriente, son características en los distintos tipos de falta[19]. Otros trabajos realizan la clasificación utilizando como datos de entrada, información derivada de análisis en el dominio de la frecuencia, utilizando técnicas como la FFT[15] o DWT[20][21], ambos casos más orientados a la clasificación de faltas de alta impedancia. En este sentido, en base a las características extraídas de todas estas técnicas, cada vez son más los trabajos que aplican técnicas de inteligencia computacional para clasificar el tipo de falta, utilizando; redes neuronales[22][20] (*Artificial Neural Networks*, ANNs), lógica difusa[23][24] (*Fuzzy Logic*, FL), árboles de decisión[25] (*Decision Trees*, DTs) o máquina de soporte de vectores[26][27] (*Support Vector Machines*, SVMs).

### II.3.1.3. Etapa de localización de la falta

Finalmente, una vez detectada la falta e identificado el tipo, la última pregunta a responder es ¿En qué punto se ha originado ésta?. Concretamente, el objetivo de esta etapa es conocer la posición real de la falta. Obviamente, desde el punto de vista del DSO, interesa que esta localización sea lo más rápida y precisa posible, con el fin de poder acotar el área de afección y poder reconfigurar la red para minimizar sus efectos.

Concretamente, dentro de la fase de análisis, esta etapa es la que habitualmente requiere más tiempo, ya que tradicionalmente la localización era realizada “*in situ*”, requiriendo movilizar a personal especializado, que mediante impresión visual de la línea y de los indicadores de circuito de falta (o *Faulted-Circuit Indicators*, FCIs), o aplicando métodos de ensayo y error (métodos dicotómicos basado en la conexión y desconexión de distintos tramos de línea), conseguían identificar la sección bajo falta. Con el paso del tiempo nuevos sistemas remotos de localización de faltas han sido planteados (ver detalles en Capítulo III), pero su aplicabilidad está fuertemente condicionada a la cantidad y calidad de la información disponibles, asociada a los sistemas de medida y registro habituales en nuevas instalaciones, pero no desplegados en instalaciones menos recientes.

En este sentido el presente trabajo de tesis aborda el problema de localización de faltas, planteando un nuevo sistema basado en una red de sensores distribuidos (ver detalles en Capítulo IV), con el objetivo de acelerar al máximo esta tarea, y siendo ésta a su vez compatible con los nuevos escenarios en los que se enmarcan las redes eléctricas del futuro.

### **II.3.2. Etapas presentes en la fase de actuación frente a un caso de falta**

Una vez realizada la detección, extinción y posterior análisis de la falta, desde el OMS se inician una serie de maniobras con el objetivo de minimizar los efectos sobre el suministro. Como ocurría con la fase anterior, dentro de esta fase es posible distinguir fácilmente dos etapas, ambas con horizontes temporales distintos, persiguiendo en primera instancia reducir el área afectada por la falta, para posteriormente poder solucionar definitivamente el problema, restableciendo el funcionamiento normal del sistema de distribución.

#### **II.3.2.1. Etapa de aislamiento de la falta**

Una vez conocido el punto donde se ha originado la falta, el siguiente paso es reconfigurar lo antes posible la topología de la red de distribución, de forma que se minimice el área afectada, restableciendo el suministro eléctrico al mayor número posible de clientes.

Con este fin, los sistemas de distribución cuentan habitualmente con la posibilidad de utilizar disyuntores repartidos a lo largo de su trazado, en lo que se conoce comúnmente como puntos de maniobra (PMs), y permiten aislar la zona afectada por una falta del resto de la red. Además, persiguiendo el mismo objetivo de reestablecer el servicio al mayor número de clientes posible, este tipo de redes suelen disponer de una o varias líneas (de la misma u otra subestación) de conexión

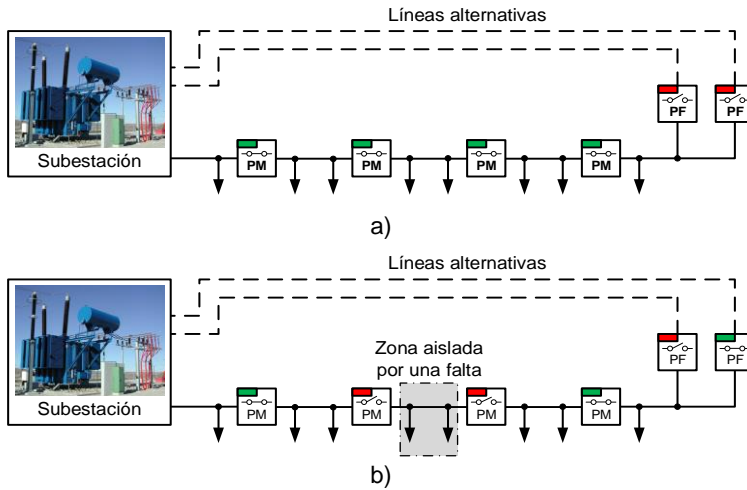


Figura II.7: Topologías de una línea de distribución orientada al tratamiento de faltas.  
 a) conexión normal sin fallo, b) reconfiguración temporal para aislar la zona afectada.

auxiliar, y a las que pueden conectarse cerrando los disyuntros que se encuentran ubicados en lo que se conoce comúnmente como puntos frontera (PFs).

En caso de un funcionamiento normal dicha línea secundaria no está conectada, y la distribución de la energía se realizará a través de la línea principal (ver Figura II.7a), repartiendo la energía a los elementos que están conectados a lo largo de su trazado. Por el contrario, en caso de una falta sobre la línea, la conexión auxiliar se cerrará a través de un PF, abriéndose previamente también los disyuntros de algunos PMs, confinando el tramo bajo falta y reduciendo zona de afección (ver Figura II.7b), minimizándose así el impacto sobre el suministro.

### II.3.2.2. Etapa de reparación de la falta

Ésta es la última acción a realizar sobre la línea antes del restablecimiento y funcionamiento normal de la misma. Esta etapa representa la propia acción de reparación, cuya duración dependerá de diversos factores como; complejidad de la reparación, disponibilidad de los materiales, etc.

Debido a esta dependencia de factores externos, es difícil reducir su duración. No obstante, en la literatura se proponen algunos trabajos en los que se plantea un mantenimiento predictivo, anticipándose al origen de la misma. Un ejemplo de esto lo podemos encontrar en la bibliografía[28], donde los autores analizan el riesgo de fallos por incendio en la arquetas de una red de distribución urbana, aplicando técnicas de minería de datos sobre los históricos de fallos de la compañía propietaria de dicho sistema de distribución.

## II.4. Aspectos legales de la continuidad de suministros

El interés por parte de las compañías eléctricas de minimizar los efectos de una falta sobre los suministros, no se reduce únicamente a su interés de prestar un mejor servicio a sus clientes. Adicionalmente la empresa de distribución eléctrica es sancionada por los organismos reguladores. La calidad de servicio se define según el capítulo II del Real Decreto 1955/2000[29] como *“El conjunto de características, técnicas y comerciales, inherentes al suministro eléctrico exigibles por los sujetos, consumidores y por los órganos competentes de la Administración”*. La calidad de servicio eléctrico se puede dividir en tres factores exigibles a las compañías suministradoras:

- **Continuidad de suministro:** hace referencia al número y duración de las interrupciones máximas permitidas en el suministro de energía eléctrica que abastece a una zona o a un individuo.
- **Calidad del producto o de onda:** hace referencia a la calidad del producto según el cumplimiento de los márgenes máximos y mínimos establecidos para parámetros asociados a la forma de onda de tensión (ej.: valor eficaz, frecuencia, etc.). La normativa asociada a estos parámetros viene dada por la norma EN50160[30] (en el ámbito europeo) o IEEE 1159[31] (en el ámbito americano).
- **Calidad de atención y relación con el cliente:** hace referencia al conjunto de actuaciones de información, asesoramiento, contratación, comunicación y reclamación que son puestas a disposición de los clientes por la empresa suministradora.

Dentro de estos tres factores, es en el primero, continuidad de suministro, donde se enmarca el objeto de la presente tesis. Obviamente, una disminución en el tiempo de localización de una falta, se traduciría directamente en una reducción del periodo de corte o desconexión, mejorándose por tanto dicha calidad de suministro y facilitándose el cumplimiento de los límites legales exigidos a las compañías eléctricas.

En este sentido, la necesidad de regular este concepto surge con la liberación del mercado eléctrico (establecida por la Ley 54/1997[32]) donde en el artículo 48 (*“Calidad del suministro eléctrico”*) se establece que la Administración General del Estado determinará unos índices objetivos de calidad del servicio, estando las empresas eléctricas obligadas a facilitar dichos índices a la Administración. Sin embargo no es hasta el Real Decreto 1955/2000[29] donde se establecen en el Título VI (*“Suministro”*), Capítulo II (*“Calidad del servicio”*), los mecanismos, índices y límites asociados a estos, para valorar la calidad del suministro eléctrico. Dicho procedimiento de medida y control es definido en la Orden ECO/797/2002[33], de

forma que sea homogéneo y auditable para todas las empresas del sector. Finalmente es en la reforma operada por el Real Decreto 1634/2006[34] donde se establece la tarifa eléctrica y se reducen los límites admisibles de estos índices de calidad, quedando definido el marco actual de cumplimiento en esta materia.

Para la aplicación de estos coeficientes es importante tener en cuenta que solo se contabilizarán las interrupciones de larga duración, que según la legislación vigente[29], se producen cuando la tensión eficaz disminuye por debajo del 10% de su valor establecido (condición para interrupción) y dure más de tres minutos (condición para larga duración). Además se distingue entre la interrupción imprevista o programada, requiriéndose un reconocimiento expreso de la Administración, para ser considerada como programada. Las interrupciones programadas afectarán en el cómputo total de los indicadores, sin embargo no darán lugar a ningún tipo de retribución asociada a ésta.

En este sentido según lo definido en legislación vigente[29][33], se establecen dos índices de calidad, el Tiempo de Interrupción Equivalente de la Potencia Instalada (TIEPI), definida por la expresión (II.1), y el Número de Interrupciones Equivalente de la Potencia Instalada (NIEPI), definida por la expresión (II.2). Ambos índices son evaluados de con carácter anual. Sin embargo, fuera del ámbito español, es más común encontrar otros indicadores o índices de calidad[35], como son el SAIFI (*System Average Interruption Frequency Index*) y el CAIDI (*Customer Average Interruption Duration Index*) cuya expresión y utilidad es similar al TIEPI y el NIEPI.

**TIEPI**  
Tiempo de Interrupción Equivalente  
de la Potencia Instalada  
en media tensión (1kV<V≤36kV)

**NIEPI**  
Número de Interrupciones Equivalente  
de la Potencia Instalada  
en media tensión (1kV<V≤36kV)

$$TIEPI = \frac{\sum_{i=1}^k (PI_i \cdot H_i)}{\sum PI} \quad (II.1)$$

$$NIEPI = \frac{\sum_{i=1}^k PI_i}{\sum PI} \quad (II.2)$$

Donde:

- $\sum PI$  : Suma de la potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT (en kVA).
- $PI_i$  : Potencia instalada de los centros de transformación MT/BT del distribuidor más la potencia contratada en MT, afectada por la interrupción "i" de duración  $H_i$  (en kVA).
- $H_i$  : Tiempo de interrupción del suministro que afecta a la potencia  $PI_i$  (en horas).
- $k$  : Número total de interrupciones durante el período considerado.  
(Considerándose únicamente las interrupciones con un tiempo superior a tres minutos)

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

A efecto de la evaluación del TIEPI y NIEPI hay que distinguir según la tipología y zona de estudio[29]:

- **Zona Urbana (U):** conjunto de municipios de una provincia con más de 20000 suministros, incluyendo capitales de provincia, aunque no lleguen a la cifra anterior.
- **Zona Semiurbana (S):** conjunto de municipios de una provincia con un número de suministros comprendido entre 20000 y 2000, excluyendo capitales de provincia.
- **Zona Rural Concentrada (RC):** conjunto de municipios de una provincia con un número de suministros comprendido entre 2000 y 200.
- **Zona Rural Dispersa (RD):** conjunto de municipios de una provincia con menos de 200 suministros, así como los suministros ubicados fuera de los núcleos de población que no sean polígonos industriales o residenciales.

Adicionalmente el estudio se realiza en dos ámbitos:

- **Calidad Individual:** es aquella de naturaleza contractual, que se refiere específicamente a cada uno de los consumidores.
- **Calidad Zonal:** es la referida a una determinada zona geográfica, atendida por un único distribuidor.

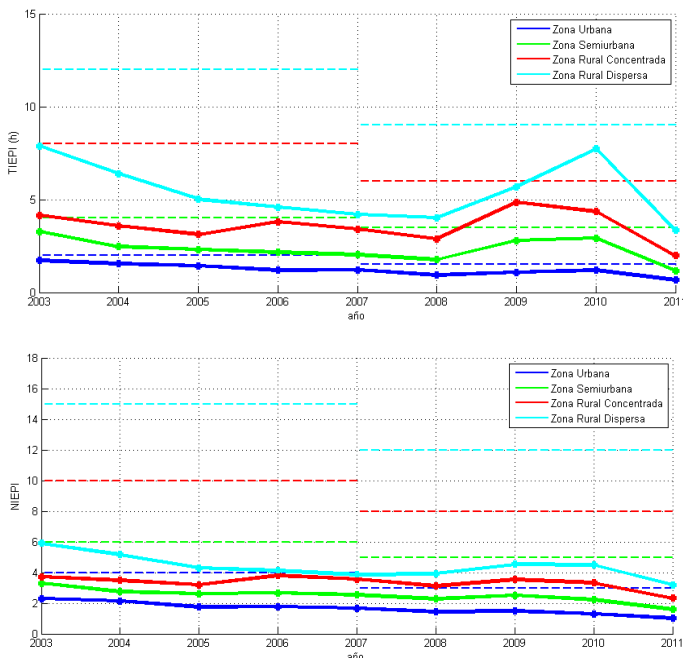


Figura II.8: Evolución anual del TIEPI y NIEPI zonal entre los años 2003 y 2011.

	TIEPI (h)		Percentil 80 del TIEPI (h)		NIEPI	
	[6] Ant. a 2007	[11] Desde 2007	[6] Ant. a 2007	[11] Desde 2007	[6] Ant. a 2007	[11] Desde 2007
<b>Zona Urbana</b>	2	1.5	3	2.5	4	3
<b>Zona Semiurbana</b>	4	3.5	6	5	6	5
<b>Zona Rural Concentrada</b>	8	6	12	10	10	8
<b>Zona Rural Dispersa</b>	12	9	18	15	15	12

Tabla II.2: Límites establecidos para la calidad zonal.

	Media Tensión (1kV<V≤36kV)				Baja Tensión (V≤1kV)			
	Número de Horas		Número de Interrupciones		Número de Horas		Número de Interrupciones	
	[6] Ant. a 2007	[11] Desde 2007	[6] Ant. a 2007	[11] Desde 2007	[6] Ant. a 2007	[11] Desde 2007	[6] Ant. a 2007	[11] Desde 2007
<b>Zona Urbana</b>	4	3.5	8	7	6	5	12	10
<b>Zona Semiurbana</b>	8	7	12	11	10	9	15	13
<b>Zona Rural Concentrada</b>	12	11	15	14	15	14	18	16
<b>Zona Rural Dispersa</b>	16	15	20	19	20	19	24	22

Tabla II.3: Límites establecidos para la calidad individual.

En la Figura II.8 es posible apreciar la evolución sufrida por estos indicadores de calidad zonal (evaluada a nivel nacional), entre los años 2003 y 2011[36], así como sus límites legales establecidos para dicho periodo. Estos límites máximos fueron fijados en la legislación vigente[29][34], en lo referente a la calidad zonal (ver Tabla II.2) e individual (ver Tabla II.3). Destaca de la calidad zonal que se añade como indicador no solo el TIEPI y el NIEPI, también se establece el Percentil 80 de TIEPI, con la intención de identificar, dentro de cada tipología, las zonas que se separan más del funcionamiento habitual medio del conjunto.

## II.5. Análisis de faltas y la modernización de las redes de distribución

En la actualidad, dentro de un análisis de falta de un sistema de distribución, es cada vez más común encontrarnos con el concepto de *Smart Grid*[37][38]. Este paradigma representa una nueva filosofía de red eléctrica, ya que en las últimas décadas se está llevando a cabo en los sistemas de distribución eléctrica una importante transición[39], desde los sistemas tradicionales (ver Figura II.9), caracterizados por un esquema de distribución radial y un flujo de energía unidireccional, hasta unas topologías de redes de distribución más complejas, donde los flujos de energía

**Tesis Doctoral:**

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

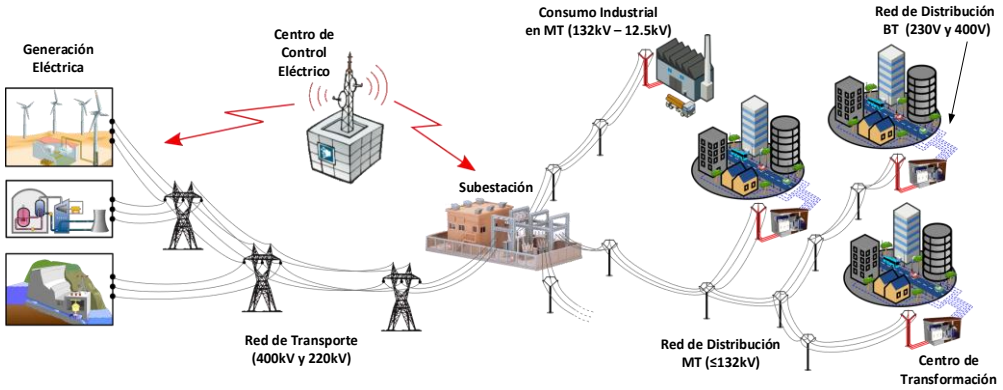


Figura II.9: Ejemplo de un sistema de distribución eléctrica tradicional.

pueden ser bidireccionales, brindando mejores características de eficiencia, fiabilidad y respeto del medioambiente. Concretamente, una *Smart Grid* persigue mejorar la interacción entre los diferentes actores presentes en el sistema de distribución eléctrica (consumidores, distribuidores, productores, etc.) facilitando la interconexión entre sus elementos (ver Figura II.10), siempre persiguiendo el concepto conocido como “el internet de la energía”[40] (o “*the energy internet*”).

### II.5.1. Tecnologías involucradas en una red tipo *Smart Grid*

Como se ha contado anteriormente, una *Smart Grid* persigue buscar una red con una mayor eficiencia y nivel de servicios. Con este fin, en éstas se plantea la integración de un gran número de tecnologías[41][42], entre las que destacan:



Figura II.10: Ejemplo de esquema de distribución en una *Smart Grid*.  
(fuente Electric Power Research Institute, [www.epri.com](http://www.epri.com))



- **Generación distribuida (o *Distributed Generation, DG*):** esta tecnología permite que la generación de energía eléctrica[43] se realice en diferentes puntos repartidos a lo largo de la red eléctrica. Concretamente la DG tiene como principal objetivo “acercar” la generación al consumo, reduciendo las pérdidas técnicas asociadas al sistemas T&D. Otra ventaja de la DG es que permite aumentar la fiabilidad del sistema. Al no depender de una única fuente de energía principal, el sistema de distribución presenta mayor capacidad de reconfiguración, pudiendo tener incluso la posibilidad de llegar a trabajar como *Microgrid*[44] en lo que se conoce como modo “*Islanding*” (o modo isla), donde una porción de la red se autoabastece sin estar directamente conectada con la red principal.
- **Generación mediante fuentes de energía renovable (o *Renewable energy resources*):** uno de los principales objetivos de una *Smart Grid* es reducir la dependencia energética de los combustibles fósiles, con el fin de preservar el medio ambiente y reducir las emisiones de gases contaminantes. Persiguiendo este objetivo y aprovechando el carácter distribuido de la generación, este tipo de redes busca aumentar la presencia de este tipo de energías, entre las que destacan la fuerte penetración solar y eólica.
- **Almacenamiento de energía (o *Energy Storage Systems, ESS*):** el objetivo de esta tecnología es desarrollar un sistema que permita almacenar el excedente de producción energética, de forma que se pueda aprovechar cuando ésta sea demandada por los consumidores (no desperdiándose dichos excedentes). En los últimos años se han estado desarrollando y evaluando multitud de tecnologías[45], poniendo de manifiesto las ventajas e inconvenientes de cada una de éstas, y demostrando la viabilidad de este tipo de tecnologías (a distintos niveles) dentro de una red de distribución.
- **Vehículo eléctrico (o *Electric Vehicle, EV*):** esta tecnología es otra pieza clave dentro de una *Smart Grid* y la cual ha experimentado un gran desarrollo en los últimos años[46][47]. Obviamente, esta tecnología permitiría reducir enormemente las emisiones contaminantes (típicamente asociadas a vehículos de combustión). Sin embargo, esta tecnología desde el punto de vista del sistema de distribución presenta un gran impacto, ya que supone el aumento del consumo debido a sus necesidades de recarga. Así pues, si este nuevo recurso es gestionado de forma correcta (a través de políticas de recarga inteligentes, adaptada en cada momento al estado de la red), este sistema podría utilizarse como un sistema de almacenamiento móvil, devolviendo la energía a la red cuando ésta fuese necesaria (*Vehicle-to-Grid, V2G*)[48].

- **Control activo de la demanda (o *Demand-Side Management, DMS*):** esta tecnología consiste en aplicar distintas políticas de gestión inteligente del consumo, adaptándolo en cada momento a las capacidades energéticas disponibles[49]. En este sentido, el DSM persigue modificar el perfil de consumo, trasladando en la medida de lo posible, el consumo a los intervalos de mayor producción (ej.: las horas centrales del día con energía solar). Otra característica útil de esta tecnología, es su capacidad de reducir el consumo ante un posible fallo en el suministro, maximizando la autonomía o permitiendo reducir el impacto en caso de utilizar sistemas auxiliares.
- **Sistema avanzado para la supervisión, control y adquisición de datos (*Advanced Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA*):** la tecnología SCADA no es una novedad dentro del sector eléctrico. Un ejemplo de esto es el propio OMS, que se encarga de monitorizar y gestionar la incidencia de las redes de distribución y transporte, o el sistema de gestión energética (*Energy Management System, EMS*) encargado de la gestión y control de la producción, y que tradicionalmente ya contaban con sistemas SCADA. Sin embargo, debido al despliegue masivo de las distintas tecnologías *Smart Grid*, se hace imprescindible el desarrollo de nuevos sistemas SCADA[50], con mayor capacidad y complejidad, permitiendo el control de un número de mayor de elementos y la ejecución de nuevas tareas basadas en algoritmos de control más costosos computacionalmente.
- **Tecnología avanzada de información y comunicaciones (o *Advanced Information and Communications Technology, AICT*):** la inclusión de todas las nuevas tecnologías asociadas a un *Smart Grid*, plantea la necesidad de disponer de una nueva infraestructura avanzada de comunicaciones[51][52] que soporte la interconexión y el intercambio de un importante volumen de información. Adicionalmente, desde un punto de vista de la gestión de esa información, la multidisciplinaridad y complejidad presente en una *Smart Grid*, hace necesarias nuevas técnicas de tratamiento de información que permitan facilitar la integración y el análisis de los grandes volúmenes de datos asociados a este tipo de redes. Un ejemplo de esto lo podemos ver en la bibliografía[53], donde aplicando un enfoque típico en inteligencia empresarial (o *Business Intelligence, BI*) se presentan un conjunto de 21 indicadores clave de desempeño (o *Key Performance Indicators, KPIs*) para valorar fácilmente, y a distintos niveles, los efectos de la implantación de una *Smart Grid*, sin que el usuario se pierda en la complejidad inherente a cada una de las tecnologías que la componen.

## II.5.2. Localización de faltas en una *Smart Grid*

Como se ha comentado en los apartados anteriores, el objetivo de una *Smart Grid* es mejorar la calidad de los servicios ofrecidos a los usuarios, siempre persiguiendo la eficiencia, la fiabilidad y el respeto del medioambiente. Dentro del objetivo de fiabilidad, como no podía ser de otra forma, se encuentra como una prioridad esencial, la continuidad del suministro. Prueba de este hecho lo encontramos en la bibliografía[54], donde el departamento de energía de los EEUU, plantea como uno de sus principales objetivos dentro de la modernización de la red del siglo XXI, la mejora de los índices de continuidad de suministros, planteando como vía prioritaria para esto, el desarrollo y mejora de los procedimientos de localización de faltas.

En este sentido, siguiendo la filosofía de una *Smart Grid*, este tipo de redes da un paso más adelante en el concepto de FDI, típicamente asociado al OMS. Concretamente, plantea añadir la propia reconfiguración del sistema como una tarea automática más dentro de éste, implantando metodologías de detección, aislamiento y reconfiguración ante faltas[55] (*Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration, FDIR*), típica en control automático y que permiten garantizar un funcionamiento continuo, seguro o aceptable, de un sistema cuando éste se ve afectado por un fallo. Aplicando este concepto al OMS, el objetivo es disponer de sistemas que permitan que la red sea lo que se conoce como “autocicatrizante” [56] (o *Self-Healing*), es decir que el OMS responda automáticamente ante un evento de falta, reconfigurando la red y aislando la falta (ver Figura II.11), de forma rápida y óptima.

No obstante, hay que tener en cuenta que una *Smart Grid* no se centra únicamente en la mejora del OMS. En una red de este tipo se mezclan un gran número de tecnologías que interaccionan entre sí, para mejorar la calidad global del funcionamiento del sistema eléctrico. Sin embargo dicha integración no es trivial, ya que mejoras concretas en un aspecto de la red pueden perjudicar a otros.



Figura II.11: Sistemas “Self-Healing” para la gestión de incidencias.

Un ejemplo de esta interacción puede verse en la propia localización de faltas. Factores como la inclusión de DG[57] o los sistemas de almacenamiento, hacen aumentar la complejidad en las topologías de las redes de distribución, donde los flujos de potencia que circulan a través de ésta dejan de ser unidireccionales, pudiendo ahora fluir corriente en ambas sentidos. Este hecho, como podrá verse más adelante (Capítulo III: Estado del arte), es un inconveniente, ya que muchos de los métodos de localización planteados hasta la fecha son válidos únicamente para sistemas radiales (donde la energía fluye siempre en la misma dirección), no siendo aplicables ante este nuevo escenario, requiriéndose a su vez el desarrollo de nuevos métodos que sí sean válidos[58][59].

Este problema hace necesario que se desarrollen por un lado, nuevas tecnologías de información y comunicaciones (o *Information and Communications Technologies*, ICTs) que permitan valorar los efectos entre dicha interacción (ej.: KPIs donde uno de sus indicadores permite valorar la continuidad de suministro, poniendo de manifiesto los efectos que las distintas tecnologías de una *Smart Grid* tienen sobre éste[53]), y por otro lado, nuevos sistemas adaptados al nuevo escenarios y que permitan solucionar dichos efectos negativos.

En este sentido, algunos trabajos propone el uso de un sistema integrado[60], que centralice y almacene la información asociada a los distintos elementos de registro presente en una red (*Digital Protection Relays*, DPRs y *Digital Fault Recorders*, DFRs, etc.) y que permita suministrar dicha información a los sistemas que lo requieran. Obviamente, la información ha de ser coherente e interoperable, estando sincronizada (ej.: aplicado *Global Positioning System*, GPS) y almacenada en formato CIM (*Common Information Model*), típicos en los sistemas y bases de datos de una compañía eléctrica. Este enfoque no solo permitirá la gestión directa de faltas (con una información más completa), también permite la detección de anomalías en el funcionamiento de los distintos equipos, facilitando las tareas de gestión de activos en subestación o a nivel global de sistema.

Otro ejemplo claro de esta necesidad se pone de manifiesto en enfoques donde se plantea la aplicación de una automatización distribuida (*Distribution Automation*, DA) como piedra angular sobre la que se ha de articular la gestión de este tipo de redes[61]. Sin embargo, esta automatización distribuida no se aborda analizando sistemas de forma aislada. Por el contrario, en este trabajo[61] se propone abordar la automatización todos los sistemas desde una perspectiva holónica, en la que coexistan tanto factores técnicos o tecnológicos (propios de cada sistema) con aspectos empresariales, donde sus características coste/beneficio (necesidades, recurso, marco regulatorio, etc.) también son tenidas en cuenta.

## II.6. Resumen del capítulo

A lo largo del presente capítulo se ha realizado una justificación del interés que plantea la localización faltas dentro de un sistema de distribución. Por un lado se ha realizado una breve introducción del fenómeno de falta y de las características básicas de un sistema de distribución. Posteriormente, se han repasado las distintas etapas en las que se puede dividir la atención de una falta, quedando de manifiesto que es la etapa de localización una de las más críticas, ya que una localización temprana permitiría un rápido aislamiento de la falta, minimizando el impacto sobre los clientes, ya que el tiempo de reparación queda desvinculado del tiempo de fallo de suministro. Esto pone de manifiesto que, una mejora en el proceso de localización se traducirá directamente en una mejora del servicio y en una reducción de las posibles penalizaciones derivadas de los fallos en la continuidad del suministro, recogida en el marco legal vigente también revisado en este capítulo. Para finalizar, las nuevas tendencias de redes inteligentes o *Smart Grids* han sido introducidas, poniendo de manifiesto los nuevos retos y problemas que éstas plantean, y destacando la necesidad de una importante modernización en los métodos de localización de faltas, para adaptarlos a este nuevo escenario.

Por todas estas razones, se puede decir que la localización de faltas es un problema complejo que aún no ha sido resuelto en su totalidad. Debido a esto, en la última década el estudio de la localización de faltas se ha convertido en una importante línea de investigación, dentro del ámbito de la ingeniería eléctrica y de las ICT. Prueba de ello es el elevado número de trabajos científicos presentados en ese periodo, y en los que se enmarca el presente trabajo de tesis.

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

## III. Estado del arte; Localización de faltas

---

Como se ha comentado en capítulos anteriores la localización de faltas en líneas de distribución es una importante necesidad para las compañías eléctricas, traduciéndose directamente en una mejora del servicio al usuario, aumentando (la disponibilidad y rendimiento del sistema) y una reducción de los costes de operación, así como de las penalizaciones derivadas del incumplimiento de los términos legales de continuidad de suministro.

Sin embargo, los métodos tradicionales no favorecían éste hecho. Concretamente, desde el punto de vista de la detección de las faltas, ésta se realizaba directamente a través de la realimentación con los usuarios, analizando las llamadas telefónicas derivadas de las interrupciones en el suministro[62][63]. Por otro lado, la localización de la posición de la falta se realizaba, principalmente, empleando métodos visuales, recorriendo físicamente línea en busca del defecto[64]. Sin embargo, este método únicamente era válido para faltas donde los daños asociados a ésta fuesen evidentes, quedando totalmente descartados en líneas subterráneas. Otros métodos como el análisis del estado de los FCIs, o la aplicación de métodos dicotómicos de ensayo y error (desconectados distintas zonas de la línea y analizando la persistencia de la falta), permitían identificar la sección bajo falta. Sin embargo no permitían identificar el punto exacto de la falta.

En este sentido, tradicionalmente la localización de faltas sobre líneas subterránea se ha realizado mediante dos conjuntos de técnicas[65]; métodos sobre terminales (o *terminal methods*) y métodos sobre el trazado (o *tracer methods*). Por un lado, los

métodos sobre terminales suelen ser habituales en una primera fase de “prelocalización” y consisten en analizar las magnitudes eléctricas en uno o ambos extremos del cable, pudiendo destacar entre estos métodos las técnicas de “puente” (ej.: *Murray loop*) y los métodos de pulsos de radar. Por otro lado, los métodos sobre el trazado son más comunes para localizaciones del punto exacto (o *pinpointing*) y requieren “andar” por encima del circuito. Los métodos más comunes de este tipo son métodos basados en técnicas acústicas (o *thumper*) y métodos de gradiente de tierra (que analiza las corrientes de retorno derivadas de someter al cable a una excitación). Sin embargo, todos estos métodos tradicionales son considerados métodos “in situ”, orientados a una aplicación cuando la línea esté fuera de servicio, ya que requieren la manipulación directa de sus conductores. Debido a esto, este tipo de métodos son considerados de baja eficiencia o rendimiento. Adicionalmente, con el objetivo de mejorar la localización de faltas, encontramos en la literatura multitud de enfoques, como el uso de fibra óptica[66] para detectar los incrementos de temperatura en los puntos cercanos a la falta, pero que obviamente requiere disponer de un cableado dotado con esta tecnología, más costosos y no disponible en los sistemas ya instalados.

En este sentido, la inclusión de los dispositivos electrónicos inteligentes (o *Intelligent Electronic Devices*, IEDs) dentro del sistema de T&D, ha propiciado unas enormes mejoras en las técnicas de localización (como ejemplo clásico, uno de los primeros IEDs aplicados en este ámbito[67], fue presentado 1982 y ha estado en funcionamiento con éxito hasta en 80 países de todo el mundo). Así pues, los IEDs no solo permiten una detección más rápida de la falta (entre 10 y 50 ms), también permiten registrar las señales asociadas al evento de falta, aumentando la información disponible para su análisis. Gracias a esta nueva información disponible, la localización de faltas se ha convertido en una importante disciplina de estudio por parte de la comunidad científica, convirtiéndose, en los últimos años, en una importante línea de investigación. Bajo el nombre de “*fault location*”, en una revisión bibliográfica, es fácil encontrar bastantes trabajos enmarcados en este ámbito. Sin embargo, a la hora de analizar estos métodos hay que tener en cuenta varios factores:

- **Tipo de instrumentación disponible:** El tipo, número de puntos y la calidad de las medidas condicionan enormemente el tipo de técnica que se puede aplicar, así como los resultados de localización obtenidos de éstas.
- **Jerarquía de líneas a las que están orientadas:** Las líneas de transporte presentan una topología más simple (menos ramificadas) que las líneas de distribución (con la presencia de cargas y líneas laterales). Además, debido a su importancia, habitualmente disponen de un mayor grado de instrumentación.



- **Topología de la red:** Realizando una distinción entre redes aéreas, subterráneas o mixtas, donde características básicas de cada una de éstas se describieron en el apartado II.2.

Sin embargo, atendiendo a una revisión bibliográfica, es fácil identificar que tradicionalmente, la mayoría de trabajos en el ámbito de la localización, están orientados a líneas de transporte, encontrándose en las últimas décadas un acercamiento hacia las líneas de distribución. Algo similar ha sucedido más a corto plazo con las líneas subterráneas y aéreas. Como es posible observar a lo largo de este capítulo, la mayoría de los métodos han abordado la localización sin diferenciar el tipo línea (salvo en la aplicación del propio modelo de cada sección, distinto para cada tipo). Sin embargo se puede identificar en los últimos años, una tendencia que plantea explotar las diferencias entre ambos sistemas, llegando a plantear estrategias diferentes en función del tipo de sección (ej.: [68][69]).

Analizando los distintos métodos propuestos en la literatura, es posible calificar los métodos en tres grandes categorías (ver Figura III.1), según las técnicas aplicadas para realizar la localización. Aunque cada uno de estos métodos será explicado en detalle a lo largo del presente capítulo, a grandes rasgos los métodos basados en el análisis de componentes fundamentales son los más utilizados, ya que son los más simples y requieren una instrumentación más económica. Estos métodos se caracterizan por utilizar la información fasorial de tensiones y corrientes en terminales de una línea, calculando la impedancia vista desde ese punto y utilizar dicha información para calcular (en base a un modelo de la línea) la distancia o impedancia equivalente hasta la falta. Los métodos de esta categoría pueden ser subdivididos en métodos de un terminal (o *one-terminal*), basados en la medida en único punto, o métodos en dos terminales (o *two-terminal*), basados en la medida en dos o más puntos. La segunda categoría son los métodos basados en el análisis de distintas componentes frecuenciales o armónicas, que consisten en no utilizar únicamente los fasores de las corrientes y tensiones, sino también la información

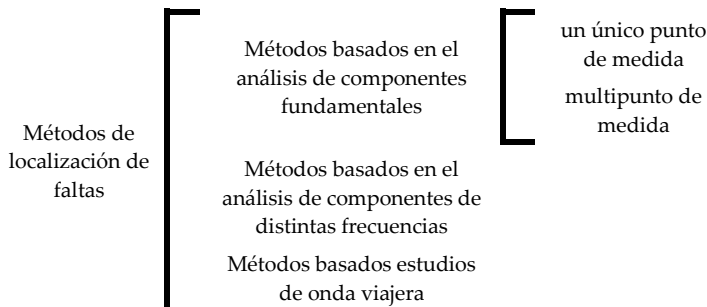


Figura III.1: Clasificación de las técnicas de localización de faltas.

contenida en las componentes de frecuencia más elevada, derivadas de la aparición de las faltas. Finalmente, los métodos de ondas viajera (o *traveling waves*) se basan en el estudio de la propagación de la onda a lo largo de las líneas. Estos métodos son muy exactos, pero requieren una instrumentación muy precisa y con un elevado ancho de banda, lo que suele encarecer bastante su aplicación.

Esta variedad de métodos, cada uno de ellos con unas características y resultados muy diferentes, puede dificultar su elección, no obstante algunos trabajos tienen como objetivo resolver esta tarea. Concretamente en la bibliografía se plantea un procedimiento[70] que permite escoger el mejor método, según el caso (tipo línea de distribución, topología, cantidad y calidad de las medidas, etc.). Esta valoración consta de dos pasos. Una primera aproximación cualitativa consiste en reducir el conjunto de posibles métodos de localización aplicables, comparando la información disponible con las necesidades propias de cada método. Una vez sesgado el conjunto a métodos directamente aplicables, se propone realizar un análisis estadístico, para evaluar que método cometería menos error (en base a la calidad información disponible), planteándose éste como la mejor solución.

Así pues, para un mejor entendimiento y comprensión de estas familias de métodos de localización de falta, en los siguientes apartados se realizará una descripción detallada de cada uno de ellos, resaltando los métodos más relevantes en cada caso.

### **III.1. Métodos basados en el análisis de componentes fundamentales**

Este conjunto de métodos, como su nombre indica, consiste en utilizar la información (amplitud y fase) que contienen las componentes fundamentales o fasores de las tensiones y corrientes. Estos métodos a su vez se pueden clasificar en dos grupos, según el número de puntos de medida:

#### **III.1.1. Técnicas basadas en el cálculo de la impedancia aparente en un terminal**

Este conjunto de técnicas (también conocidas por el término *one-end impedance-based measurement techniques*) consisten en realizar la localización de la falta utilizando el cálculo de la impedancia aparente que presenta la línea afectada, vista desde un único punto de medida (habitualmente ubicado en la cabecera de la línea). Para estos métodos es necesario utilizar un modelo de la línea, por lo que también se les denomina métodos basados en modelos. Gracias a este modelo, es posible ir analizando las líneas de distribución, segmento a segmento, modelando cada

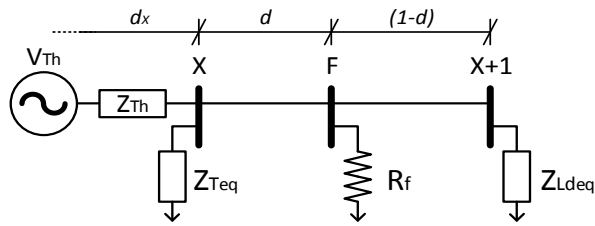


Figura III.2: Esquema simplificado de una línea de distribución radial en falta.  
(en F, entre los nodos X y X+1.)

análisis según el esquema de la Figura III.2. Esto permite evaluar si la falta se encuentra en ese segmento, y en caso afirmativo, en que porción de éste se encuentra. Concretamente, en la Figura III.2 es posible identificar;  $Z_{Th}$  y  $V_{Th}$ , que representan el modelo equivalente Thevenin de todos los elementos de la línea (subestación, tramos de la línea, y cargas) conectados antes del nodo X,  $Z_{Teq}$  modela las ramas laterales (típicas en un red de distribución) conectados al nodo X,  $Z_{Ldeq}$  modela las líneas y cargas conectadas después del nodo X+1,  $d_x$  representa la distancia desde la cabecera hasta el nodo X. Finalmente,  $d$  representa la distancia desde el nodo X hasta el punto de falta F, quedando la falta localizada a través de este parámetro. Dentro de esta técnica los trabajos que se han creído más relevantes y significativos han sido descritos en el siguiente apartado.

### III.1.1.1. Revisión de los métodos más destacados basados en esta técnica

Dentro de los métodos de localización de faltas basados en el cálculo de la impedancia aparente en un único terminal, se pueden destacar:

#### **III.1.1.1.1. Método de la componente reactiva**

Este método es una de las técnicas clásicas de localización y es uno de los más simples que se presentan en la literatura[71]. Este método se basa en suponer que la corriente de falta es mucho mayor que la corriente que circula por las cargas conectadas a la línea de distribución. Esto permite reducir el circuito equivalente, eliminando las impedancias de las ramas laterales ( $Z_{Teq}$ ), pudiendo tratar la línea como un único modelo de línea completa (ver Figura III.3).

En base a esta simplificación, el método de la componente reactiva consiste en analizar la ecuación (III.1), que define la malla formada por la falta (ver Figura III.3) y donde “ $d$ ” representa la distancia que existe entre el punto inicial de la línea (X<sub>0</sub>) y el punto de falta (F), normalizada por la distancia total de la misma.

$$V_0 = d \cdot Z_L \cdot I_{0,f} + R_f \cdot I_f \quad (III.1)$$

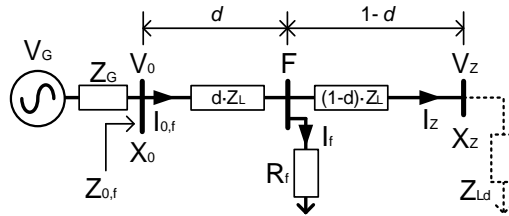


Figura III.3: Modelo simplificado de una línea sin ramas laterales.

Asumiendo la condición antes mencionada, donde la corriente de falta ( $I_f$ ) es mucho mayor que la corriente que circula por la carga ( $I_Z$ ), es posible también asumir que la corriente medida en el punto inicial es prácticamente la corriente de falta. Por tanto, la impedancia vista desde este punto ( $Z_{0,f}$ ) quedaría según la siguiente ecuación:

$$Z_{0,f} \approx \frac{V_0}{I_{0,f}} = m \cdot Z_L + R_f \quad (\text{III.2})$$

Resolviendo la ecuación compleja (III.2), en su componente imaginaria, es posible determinar la distancia “ $d$ ”, como la relación entre la componente imaginaria de la impedancia aparente calculada a través de los registros de tensión y corriente en el punto inicial de la línea y la impedancia con la que se ha modelado la propia línea.

$$d = \frac{\text{Im}(Z_{0,f})}{\text{Im}(Z_L)} = \frac{\text{Im}(V_0 / I_{0,f})}{\text{Im}(Z_L)} \quad (\text{III.3})$$

Este método como se ha comentado anteriormente presenta la ventaja de ser bastante simple y fácil de calcular. Sin embargo, la suposición de considerar una corriente de carga mucho menor que la corriente de falta, permite despreciar el efecto de las cargas directas y laterales, pero esto no siempre es aplicable (ej.:  $R_f$  elevada), pudiendo cometerse un importante error en la estimación de la posición.

Otro problema que presenta este método está asociado directamente a su principio de funcionamiento, que se basa en calcular la posición de la falta a través de la impedancia aparente vista desde un punto. Sin embargo esta impedancia puede corresponder a varias soluciones o “camino” a lo largo de la misma. Este problema se conoce como múltiple estimación y es común a todos los métodos de esta familia.

### III.1.1.1.2. Método Girgis et al.

Este trabajo fue presentado por Girgis *et al.*[72] y describe un método de localización de faltas válido para cualquier tipo de falta en redes de distribución con cargas balanceadas (identificando su tipo a través de los incrementos de corrientes sufridos en cada fase) y únicamente para faltas simples (línea-tierra) en sistemas con laterales monofásicas o bifásicas (sistemas con cargas desbalanceadas).

Concretamente, en este trabajo se ejemplifica el procedimiento de cálculo para una falta línea-tierra sobre la fase “a”, en donde se analizan las tensiones de secuencia ( $V_{(1)f}$ ,  $V_{(2)f}$  y  $V_{(0)f}$ ) en el punto de falta F, según (III.4):

$$\begin{aligned} V_{(1)f} &= V_{(1)} - I_{(1)} \cdot Z_{(1)} \quad ; \quad V_{(2)f} = V_{(2)} - I_{(2)} \cdot Z_{(2)} \\ V_{(0)f} &= V_{(0)} - I_{(0)} \cdot Z_{(0)} \end{aligned} \quad \text{(III.4)}$$

Donde  $V_{(1)}$ ,  $V_{(2)}$  y  $V_{(0)}$ , representan las tensiones de secuencia positiva, negativa y de cero en el bus X.  $I_{(1)}$ ,  $I_{(2)}$  y  $I_{(0)}$ , representan las corriente de secuencia que circulan por la línea desde el bus X. Finalmente,  $Z_{(1)}$ ,  $Z_{(2)}$  y  $Z_{(0)}$ , representan las impedancias de secuencia del segmento de la línea antes de la falta. Además, asumiendo que en una falta “l-g” (según se justifica en el Anexo C del presente documento), la tensión en el punto de falta viene definida por (III.5):

$$V_{a,f} = V_{(1)f} + V_{(2)f} + V_{(0)f} = 3 \cdot I_{(0)f} \cdot R_f \quad \text{(III.5)}$$

Asumiendo que  $Z_{(1)}$  y  $Z_{(2)}$  son iguales, sustituyendo en (III.5) las expresiones definidas en (III.4), se obtiene (III.6), donde  $V_a$  y  $I_a$ , representan las medidas de tensión y corriente medias en esta fase:

$$V_{a,f} = V_a - \left[ (I_{(1)} + I_{(2)}) \cdot Z_{(1)} + I_{(0)} \cdot Z_{(0)} \right] \quad \text{(III.6)}$$

Reescribiendo (III.6), se puede obtener:

$$\begin{aligned} V_a &= (I_a + k \cdot I_{(0)}) \cdot Z_{(1)} + 3 \cdot I_{(0)} \cdot R_f \\ \text{Donde: } k &= \frac{Z_{(0)} - Z_{(1)}}{Z_{(1)}} \end{aligned} \quad \text{(III.7)}$$

Teniendo en cuenta que se trata de un método de impedancia aparente, ésta vendrá definida según (III.8):

$$Z_{app} = \frac{V_{select}}{I_{select}} = R_{app} + j \cdot X_{app} \quad \text{(III.8)}$$

Por tanto para una falta simple en la fase “a”, se expresaría según:

$$\begin{aligned} V_{select} &= V_a \\ I_{select} &= (I_a + k \cdot I_{(0)}) \end{aligned} \quad \text{(III.9)}$$

Que sustituyéndose en (III.8), quedaría como:

$$Z_{app} = Z_{(1)} + \frac{3 \cdot I_{(0)} \cdot R_f}{(I_a + k \cdot I_{(0)})} \quad \text{(III.10)}$$

Para compensar el desconocimiento de la resistencia de falta, se añade  $I_{comp}$ , con el objetivo de modelar esta corriente dentro de la expresión. Además, también será añadida la incógnita  $D$  que representará la distancia hasta la falta y  $Z_{l(1)}$  como la impedancia por unidad de distancia de la línea bajo análisis.

$$Z_{app} = D \cdot Z_{l(1)} + \frac{I_{comp} \cdot R_f}{(I_a + k \cdot I_{(0)})} \quad (III.11)$$

Analizando la expresión, y dividiendo la expresión compleja en parte real e imaginaria, es posible reescribir el sistema de ecuaciones según:

$$\begin{bmatrix} R_{app} \\ X_{app} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{l(1)} \frac{\text{Re}[I_{comp}] \cdot \text{Re}[I_{select}] + \text{Im}[I_{comp}] \cdot \text{Im}[I_{select}]}{(\text{Re}[I_{select}])^2 + (\text{Im}[I_{select}])^2} \\ X_{l(1)} \frac{-\text{Re}[I_{comp}] \cdot \text{Im}[I_{select}] + \text{Im}[I_{comp}] \cdot \text{Re}[I_{select}]}{(\text{Re}[I_{select}])^2 + (\text{Im}[I_{select}])^2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} D \\ R_f \end{bmatrix} \quad (III.12)$$

Expresando  $D$  de forma independiente, se expresa como:

$$D = \frac{R_{app} \cdot M - X_{app} \cdot L}{R_{(1)} \cdot M - X_{(1)} \cdot L} \quad (III.13)$$

Donde:

$$M = \frac{\text{Re}[I_{comp}] \cdot \text{Re}[I_{select}] + \text{Im}[I_{comp}] \cdot \text{Im}[I_{select}]}{(\text{Re}[I_{select}])^2 + (\text{Im}[I_{select}])^2} ; \quad L = \frac{-\text{Re}[I_{comp}] \cdot \text{Im}[I_{select}] + \text{Im}[I_{comp}] \cdot \text{Re}[I_{select}]}{(\text{Re}[I_{select}])^2 + (\text{Im}[I_{select}])^2}$$

Como se ha comentado anteriormente, este método permite realizar la localización ante distintos tipo de falta. Para esto los autores extienden la formulación aplicando la Tabla III.1 (esta extensión se justifica según el estudio del Anexo C del presente documento). No obstante, como se ha comentado anteriormente, si las fases están desequilibradas (ej.: sistemas con laterales monofásicas) este método no sería

Tipo de Falta	$V_{selec}$	$I_{selec}$	$I_{comp}$
<b>Faltas Monofásica, línea-tierra</b> fase "x"	$V_x$	$I_x + k \cdot I_{(0)}$	$3 \cdot I_{(0)}$
<b>Faltas Bifásicas</b> Línea-línea o línea-línea-tierra fases "x" e "y"	$V_x - V_y$	$I_x - I_y$	$\Delta I_x - \Delta I_y$
<b>Faltas Trifásica,</b> fases "a", "b" y "c"	Igual que en el caso línea-línea o línea-línea-tierra		

Tabla III.1: Extensión para distintos casos de falta (mét. de Girgis et al.).

extensible, siendo únicamente válido para faltas monofásicas (en la fase “k”). Quedando la expresión como:

$$Z_{app} = \frac{V_k}{I_k} = D \cdot Z_{lk} + \frac{I_{k,f} \cdot R_f}{I_k} \quad (III.14)$$

Por otro lado en el caso de líneas con ramas laterales equilibradas (cargas o secciones laterales) conectadas a lo largo de la misma (ver Figura III.4). La tensión y corriente de cada bus se pueden calcular aplicando (III.15) y (III.16):

$$[V_x] = [V_1] - \sum_{j=1}^{x-1} \left( [Z_{abc j}] \cdot [I_{abc j}] \right) \quad (III.15)$$

$$[I_{abc x}] = [I_{abc 1}] - \sum_{j=1}^{x-1} \left( [I_{ld j}] \right) \quad (III.16)$$

Tanto en (III.15) como en (III.16), las cargas están modeladas mediante una matriz de admitancias (III.17). Los valores que componen esta matriz de admitancia modelan las cargas totales conectadas en cada nodo. Esta admitancia está formada por la carga conectada directamente a un bus, en paralelo con la admitancia equivalente asociada al resto de líneas laterales conectadas a dicho nodo.

$$[I_{ld x}] = \begin{bmatrix} Y_a & 0 & 0 \\ 0 & Y_b & 0 \\ 0 & 0 & Y_c \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

Como sucedía con el método anterior, la distancia obtenida está asociada a la medida de impedancia vista desde un punto. Debido a esto, su aplicación sobre sistemas con tipologías ramificadas, presentará problemas de la múltiple estimación de la posición de la falta.

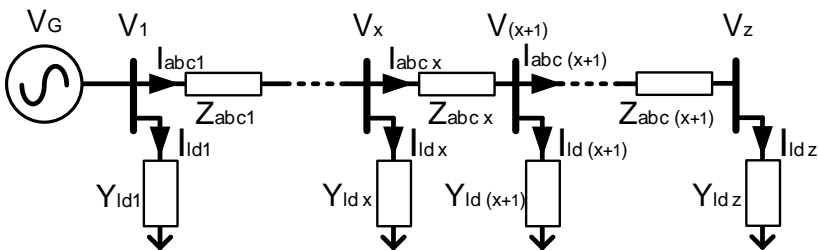


Figura III.4: Modelo simplificado de línea con cargas distribuidas (mét. Girgis et al.).

### III.1.1.1.3. Método Das et al.

Este método fue presentado por Das *et al.*[73] y es explicado en detalle en la tesis doctoral[74] del autor principal. Este trabajo presenta un método de localización de faltas, basado en los registros (antes y durante la falta) de tensión y corriente en un único punto, típicamente en el comienzo de la línea. Este método permite su aplicación sobre líneas de distribución radiales, ante distintos tipos de falta, e incluso si la línea no es homogénea, con cargas y líneas laterales conectadas a lo largo de ésta (ver ejemplo en Figura III.5). Este método se implementa en varios pasos, que son:

**Paso 1. Adquisición de datos, detección y clasificación de la falta;** Es el primer paso necesario, para aplicar este método de localización. Como se ha contado anteriormente este método requiere los registros de tensión y corriente en el punto M. No obstante, lo que realmente se utiliza son sus componentes fundamentales (o fasores), extrayéndose mediante un algoritmo de mínimos cuadrados (*Least Error Squares*, LES). Posteriormente, para la detección este trabajo presenta un método simple que consiste en la comparación directa de cada corriente de fase ( $I_{MRa}$ ,  $I_{MRb}$  y  $I_{MRc}$ ) con un valor umbral ( $I_t$ ) o de la componente homopolar (III.18), asociada directamente con derivaciones a tierra, con otro valor umbral ( $I_{tg}$ ).

$$I_{MR(0)} = (I_{MRa} + I_{MRb} + I_{MRc}) / 3 \quad \text{(III.18)}$$

Una vez confirmada la presencia de una falta se almacena la información fasorial tanto de la falta como del instante antes de la falta (pre-falta). Finalmente, para la clasificación de la falta también se aplicará un algoritmo básico de comparación con ambos umbrales, en función de las combinaciones de cumplimiento se determina el tipo de falta, y las fases implicadas.

**Paso 2. Estimación de la sección en falta;** para esto utilizaremos el cálculo de la reactancia aparente ( $X_M$ ), vista desde cabecera (punto M). Este cálculo se basa en las medidas de tensión ( $V_{M(1)}$ ,  $V_{M(2)}$  y  $V_{M(0)}$ ) y corriente ( $I_{MR(1)}$ ,  $I_{MR(2)}$  y  $I_{MR(0)}$ ) de secuencia:

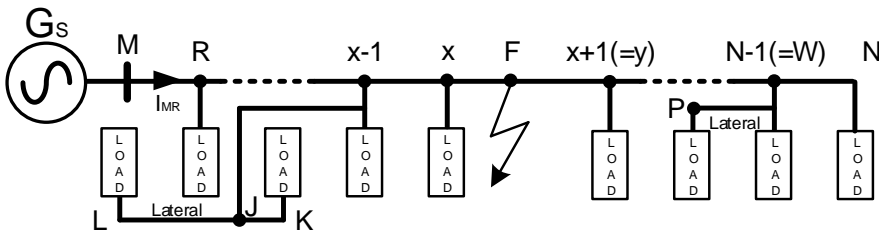


Figura III.5: Sistema de distribución tipo con líneas laterales (mét. Das et al.).



Faltas simples "l-g", en fase "k"	Faltas "l-l" o "l-l-g", ente fases "j" y "k"	Faltas trifásicas balanceada "l-l-l"
$X_M = \text{Im} \left( \frac{V_{Mk}}{I_{MRk}} \right)$ (III.19)	$X_M = \text{Im} \left( \frac{V_{Mj} - V_{Mk}}{I_{MRj} - I_{MRk}} \right)$ (III.20)	$X_M = X_{MR(1)} = \text{Im} \left( \frac{V_{M(1)}}{I_{MR(1)}} \right)$ (III.21)

Una vez calculada la reactancia  $X_M$ , calcularemos la reactancia equivalente ( $X'_{My}$ ) entre los nodos M e y ( $y=x+1$ ), según el tipo de falta:

Faltas simples "l-g"	Faltas "l-l", "l-l-g" y faltas trifásicas balanceadas "l-l-l"
$X'_{My} = X'_{(x-1)x} + X'_{xy} =$ $= X'_{(x-1)x} + X_{xy(1)} + \frac{X_{xy(0)} - X_{xy(1)}}{3}$ (III.22)	$X'_{My} = X'_{(x-1)x} + X'_{xy} =$ $= X'_{(x-1)x} + X_{xy(1)}$ (III.23)

A través de (III.22) o (III.23), iremos calculando la reactancia equivalente ( $X'_{My}$ ), desde el inicio de la línea M, hasta que ésta sea mayor que la reactancia  $X_M$ . Una vez que dicha condición se cumpla, se tomará el tramo anterior a y, como los tramos donde se ha originado la falta.

**Paso 3. Construcción de sistema radial equivalente;** una vez hecha la estimación de la sección bajo falta, y determinado el tramo de línea entre los nodos x e y, se transformará éste (ver Figura III.5) en un sistema equivalente sin laterales (ver Figura III.2). Esto es posible al agrupar estas cargas y líneas laterales junto con las cargas conectadas al mismo nodo. Esta agrupación, es posible mediante el procedimiento de modelado de las cargas explicado en los pasos siguientes.

**Paso 4. Modelado de cargas;** este método asume que la carga conectada a un nodo genérico x es estática, modelada como una admitancia ( $Y_x$ ) función de la tensión aplicada a ésta ( $V_x$ ), y definida según (III.24).  $G_x$  y  $B_x$  son las constantes proporcionales que modelan la conductancia y susceptancia de la carga,  $n_p$  y  $n_q$  definen el tipo de modelo ( $n_p=n_q=0 \rightarrow$  modelo a potencia constante,  $n_p=n_q=1 \rightarrow$  modelo a corriente constante y  $n_p=n_q=0 \rightarrow$  modelo a impedancia constante):

$$Y_x = G_x \cdot |V_x|^{n_p-2} + j \cdot B_x \cdot |V_x|^{n_q-2} \quad (III.24)$$

Cada carga se asemeja al modelo de una falta donde su impedancia de falta es la propia impedancia de la carga, distinguiéndose tres tipos; carga monofásica (según el esquema "l-g"), carga bifásica (según el esquema "l-l") o carga trifásica (según el esquema "l-l-l"). La estimación de las constantes  $G_x$  y  $B_x$  se realizará a partir de los datos de tensión y corriente pre-falta, para cuyos valores dichas cargas se asumen conocidas. Para ir calculando cada tensión y corriente en cada nodo, se aplica una simplificación del modelo de línea larga (ver Figura III.6), definido según (III.25). (III.26) y (III.27).

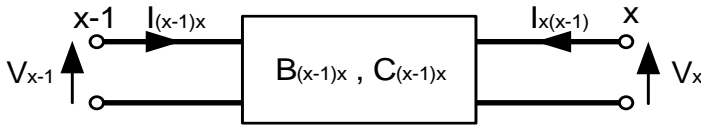


Figura III.6: Modelo simplificado de línea larga (mét. Das et al.).

$$\begin{bmatrix} V_x \\ I_{x(x-1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -B_{(x-1)x} \\ C_{(x-1)x} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{x-1} \\ I_{(x-1)x} \end{bmatrix} \quad (III.25)$$

$$B_{(x-1)x} = z_{(x-1)x}^c \cdot \gamma_{(x-1)x} \cdot L_{(x-1)x} \quad (III.26) \quad C_{(x-1)x} = \frac{\gamma_{(x-1)x} \cdot L_{(x-1)x}}{z_{(x-1)x}^c} \quad (III.27)$$

Donde:

$\gamma_{(x-1)x}$ ; constante de propagación por unidad de longitud.

$z_{(x-1)x}^c$ ; impedancia característica del tramo de línea entre x-1 y x.

$L_{(x-1)x}$ ; longitud del tramo de línea entre x-1 y x.

**Paso 5. Estimación de las tensiones y corrientes en el punto de falta y en terminal final;** este paso describe el procedimiento para estimar las componentes de secuencia de falta y las tensiones en el nodo de falta (F) y en el extremo final (N).

Previamente han de calcularse las corrientes y tensiones de secuencia en el nodo anterior a la falta (x), utilizando los registros medidos en el nodo inicial (M), y aplicándolos como entrada al modelo simplificado de línea (III.25), utilizando en cada nodo las admitancias de carga ya definidas según (III.24), para estimar la corriente que circula por el tramo siguiente.

Las tensiones y corrientes de secuencia al nodo x son estimadas utilizando la fase A como referencia. Sin embargo, dependiendo del tipo de falta es mejor cambiar dicha referencia. La mejor referencia en cada caso está definida en la Tabla III.2.

Fase A de referencia	Fase B de referencia	Fase C de referencia
Falta simple A-g Falta B-C Falta B-C-g Falta trifásica A-B-C	Falta simple B-g Falta C-A Falta C-A-g	Falta simple C-g Falta A-B Falta A-B-g

Tabla III.2: Mejor fase referencia en cada tipo de falta (mét. de Das et al.).

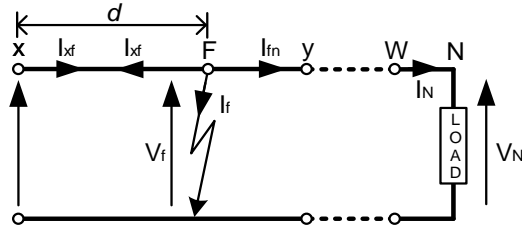


Figura III.7: Modelo simplificado de la sección bajo falta (mét. Das et al.).

Las tensiones y corrientes de secuencia en el nodo de falta se calculan considerando que todas las cargas posteriores al nodo  $x$ , son agrupadas en una carga en el nodo  $N$  (ver Figura III.7). Por tanto, la sección entre el nodo  $x$  y  $F$ , es definida por (III.28) donde  $d$  representa la distancia normalizada ( $l_{xf} = d \cdot L_{xy}$ ) entre el nodo  $x$  y la falta.

$$\begin{bmatrix} V_f \\ I_{fx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -d \cdot B_{xy} \\ d \cdot C_{xy} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_x \\ I_{xf} \end{bmatrix} \quad (\text{III.28})$$

Por tanto la sección entre  $F$  y  $N$ , quedaría definida por:

$$\begin{bmatrix} V_N \\ -I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_e & -B_e \\ C_e & -A_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -(1-d) \cdot B_{xy} \\ -(1-d) \cdot C_{xy} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_f \\ I_{fn} \end{bmatrix} \quad (\text{III.29})$$

Aplicando (III.28) y (III.29), realizando una serie de transformaciones y despreciando los términos de segundo o superior orden, se puede expresar las tensiones en el punto de falta (III.30), las corrientes de falta (III.31) y las tensiones de secuencia (III.32) en el nodo final  $N$ , de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} V_{(0)f} &= V_{(0)x} - d \cdot B_{(0)xy} \cdot I_{(0)xf} \\ V_{(1)f} &= V_{(1)x} - d \cdot B_{(1)xy} \cdot I_{(1)xf} \\ V_{(2)f} &= V_{(2)x} - d \cdot B_{(2)xy} \cdot I_{(2)xf} \end{aligned} \quad (\text{III.30})$$

$$\begin{aligned} I_{(0)f} &= \frac{1}{K_{(0)v} + d \cdot K_{(0)w}} \left[ \left( K_{(0)q} + d \cdot K_{(0)r} \right) \cdot V_{(0)x} + \left( K_{(0)v} + d \cdot K_{(0)u} \right) \cdot I_{(0)xf} \right] \\ I_{(1)f} &= \frac{1}{K_{(1)v} + d \cdot K_{(1)w}} \left[ \left( K_{(1)q} + d \cdot K_{(1)r} \right) \cdot V_{(1)x} + \left( K_{(1)v} + d \cdot K_{(1)u} \right) \cdot I_{(1)xf} \right] \end{aligned} \quad (\text{III.31})$$

$$I_{(2)f} = \frac{1}{K_{(2)v} + d \cdot K_{(2)w}} \left[ \left( K_{(2)q} + d \cdot K_{(2)r} \right) \cdot V_{(2)x} + \left( K_{(2)v} + d \cdot K_{(2)u} \right) \cdot I_{(2)xf} \right]$$

$$\begin{aligned}
 V_{(0)n} &= \frac{1}{K_{(0)v} + d \cdot K_{(0)w}} \left[ \left( K_{(0)m} + d \cdot K_{(0)n} \right) \cdot V_{(0)x} + d \cdot K_{(0)p} \cdot I_{(0)xf} \right] \\
 V_{(1)n} &= \frac{1}{K_{(1)v} + d \cdot K_{(1)w}} \left[ \left( K_{(1)m} + d \cdot K_{(1)n} \right) \cdot V_{(1)x} + d \cdot K_{(1)p} \cdot I_{(1)xf} \right] \\
 V_{(2)n} &= \frac{1}{K_{(2)v} + d \cdot K_{(2)w}} \left[ \left( K_{(2)m} + d \cdot K_{(2)n} \right) \cdot V_{(2)x} + d \cdot K_{(2)p} \cdot I_{(2)xf} \right]
 \end{aligned} \tag{III.32}$$

Donde

$$\begin{aligned}
 K_m &= (-A_e - C_e \cdot B_{xy}) \cdot (D_e + B_e \cdot C_{xy}) - (-B_e - D_e \cdot B_{xy}) \cdot (C_e + A_e \cdot C_{xy}) \\
 K_n &= (C_e \cdot B_{xy}) \cdot (D_e + B_e \cdot C_{xy}) + (-A_e - C_e \cdot B_{xy}) \cdot \left[ (-B_e \cdot C_{xy}) - (-B_e - D_e \cdot B_{xy}) \cdot C_{xy} \right] - \\
 &\quad - (D_e \cdot B_{xy}) \cdot (C_e + A_e \cdot C_{xy}) - (-B_e - D_e \cdot B_{xy}) \cdot \left[ (-A_e \cdot C_{xy}) - (-A_e - C_e \cdot B_{xy}) \cdot C_{xy} \right] \\
 K_p &= (C_e \cdot B_{xy}) \cdot (-B_e - D_e \cdot B_{xy}) + (-A_e - C_e \cdot B_{xy}) \cdot \left[ (D_e \cdot B_{xy}) - (D_e + B_e \cdot C_{xy}) \cdot B_{xy} \right] - \\
 &\quad - (D_e \cdot B_{xy}) \cdot (-A_e - C_e \cdot B_{xy}) - (-B_e - D_e \cdot B_{xy}) \cdot \left[ (C_e \cdot B_{xy}) - (C_e + A_e \cdot C_{xy}) \cdot B_{xy} \right]
 \end{aligned} \tag{III.33}$$

$$\begin{aligned}
 K_q &= Y_N \cdot (D_e + B_e \cdot C_{xy}) + (C_e + A_e \cdot C_{xy}) \\
 K_r &= Y_N \cdot \left[ (-B_e \cdot C_{xy}) - (-B_e - D_e \cdot B_{xy}) \cdot C_{xy} \right] + \left[ (-A_e \cdot C_{xy}) - (-A_e - C_e \cdot B_{xy}) \cdot C_{xy} \right] \\
 K_u &= Y_N \cdot \left[ (D_e \cdot B_{xy}) - (D_e + B_e \cdot C_{xy}) \cdot B_{xy} \right] + \left[ (C_e \cdot B_{xy}) - (C_e + A_e \cdot C_{xy}) \cdot B_{xy} \right] \\
 K_v &= Y_N \cdot (-B_e - D_e \cdot B_{xy}) + (-A_e - C_e \cdot B_{xy}) \\
 K_w &= Y_N \cdot (D_e \cdot B_{xy}) + (C_e \cdot B_{xy})
 \end{aligned} \tag{III.34}$$

**Paso 6. Localización de la falta;** este es el último paso de método y consiste en realizar la localización, asumiendo que la resistencia de falta, es un resistencia pura. Expresando esto de forma genérica

$$\text{Im} \left( \frac{K_A + d \cdot K_B}{K_C + d \cdot K_D} \right) = 0 \tag{III.35}$$

Resolviendo (III.35) podemos expresar:

$$d = \frac{\text{Re}[K_A] \cdot \text{Im}[K_C] - \text{Re}[K_C] \cdot \text{Im}[K_A]}{(\text{Re}[K_C] \cdot \text{Im}[K_B] - \text{Re}[K_B] \cdot \text{Im}[K_C]) + (\text{Re}[K_D] \cdot \text{Im}[K_A] - \text{Re}[K_A] \cdot \text{Im}[K_D])} \tag{III.36}$$

Faltas simple "l-g"	Faltas "l-l-g"	Faltas "l-l"	Faltas trifásica "l-l-l" o "l-l-l-g"
$R_f = \frac{V_{(0)f} + V_{(1)f} + V_{(2)f}}{I_{(0)f} + I_{(1)f} + I_{(2)f}}$	$R_f = \frac{V_{(1)f} - V_{(2)f}}{I_{(1)f} - I_{(2)f}}$	$\frac{R_f}{2} = \frac{V_{(1)f} - V_{(2)f}}{I_{(1)f} - I_{(2)f}}$	$R_f = \frac{V_{(1)f}}{I_{(1)f}}$

Tabla III.3: Resistencia de falta según el tipo (mét. de Das et al.).

Sin embargo, la resistencia de falta  $R_f$  depende del tipo de falta (ver Tabla III.3), con lo que igualando la parte imaginaria a cero, se obtiene:

$$\text{Im} \left( \frac{V_{(0)f} + V_{(1)f} + V_{(2)f}}{I_{(0)f} + I_{(1)f} + I_{(2)f}} \right) = 0 \quad \left\| \quad \text{Im} \left( \frac{V_{(1)f} - V_{(2)f}}{I_{(1)f} - I_{(2)f}} \right) = 0 \quad \left\| \quad \text{Im} \left( \frac{V_{(1)f}}{I_{(1)f}} \right) = 0$$

Estas expresiones tienen la misma estructura de (III.35), por lo que se puede aplicar (III.36) de forma genérica, variando únicamente sus coeficientes según:

- Faltas simple "l-g":

$$\begin{aligned} K_A &= (V_{(0)x} + V_{(1)x} + V_{(2)x}) (K_{(0)v} \cdot K_{(1)v} \cdot K_{(2)v}) \\ K_B &= (V_{(0)x} + V_{(1)x} + V_{(2)x}) \left[ K_{(1)v} (K_{(2)v} \cdot K_{(0)w} + K_{(2)w} \cdot K_{(0)v}) + (K_{(1)w} \cdot K_{(0)v} \cdot K_{(2)v}) \right] - \\ &\quad - \left[ (B_{(0)xy} \cdot I_{(0)xf} + B_{(1)xy} \cdot I_{(1)xf} + B_{(2)xy} \cdot I_{(2)xf}) (K_{(0)v} \cdot K_{(1)v} \cdot K_{(2)v}) \right] \\ K_C &= \left[ (K_{(1)v} \cdot K_{(2)v}) (K_{(0)q} \cdot V_{(0)x} + K_{(0)v} \cdot I_{(0)xf}) \right] + \left[ (K_{(2)v} \cdot K_{(0)v}) (K_{(1)q} \cdot V_{(1)x} + K_{(1)v} \cdot I_{(1)xf}) \right] + \\ &\quad + \left[ (K_{(0)v} \cdot K_{(1)v}) (K_{(2)q} \cdot V_{(2)x} + K_{(2)v} \cdot I_{(2)xf}) \right] \\ K_D &= \left[ (K_{(1)v} \cdot K_{(2)v}) (K_{(0)r} \cdot V_{(0)x} + K_{(0)v} \cdot I_{(0)xf}) + (K_{(1)v} \cdot K_{(2)w} + K_{(1)w} \cdot K_{(2)v}) (K_{(0)q} \cdot V_{(0)x} + K_{(0)v} \cdot I_{(0)xf}) \right] + \\ &\quad + \left[ (K_{(2)v} \cdot K_{(0)v}) (K_{(1)r} \cdot V_{(1)x} + K_{(1)v} \cdot I_{(1)xf}) + (K_{(2)v} \cdot K_{(0)w} + K_{(2)w} \cdot K_{(0)v}) (K_{(1)q} \cdot V_{(1)x} + K_{(1)v} \cdot I_{(1)xf}) \right] + \\ &\quad + \left[ (K_{(0)v} \cdot K_{(1)v}) (K_{(2)r} \cdot V_{(2)x} + K_{(2)v} \cdot I_{(2)xf}) + (K_{(0)v} \cdot K_{(1)w} + K_{(0)w} \cdot K_{(1)v}) (K_{(2)q} \cdot V_{(2)x} + K_{(2)v} \cdot I_{(2)xf}) \right] \end{aligned} \quad (III.37)$$

- Faltas "l-l-g" o "l-l":

$$\begin{aligned} K_A &= (V_{(1)x} - V_{(2)x}) (K_{(1)v} \cdot K_{(2)v}) \\ K_B &= (V_{(1)x} - V_{(2)x}) (K_{(1)v} \cdot K_{(2)w} + K_{(1)w} \cdot K_{(2)v}) - (B_{(1)xy} \cdot I_{(1)xf} - B_{(2)xy} \cdot I_{(2)xf}) (K_{(1)v} \cdot K_{(2)v}) \\ K_C &= K_{(2)v} \cdot (K_{(1)q} \cdot V_{(1)x} + K_{(1)v} \cdot I_{(1)xf}) - K_{(1)v} \cdot (K_{(2)q} \cdot V_{(2)x} + K_{(2)v} \cdot I_{(2)xf}) \\ K_D &= \left[ K_{(2)v} \cdot (K_{(1)r} \cdot V_{(1)x} + K_{(1)v} \cdot I_{(1)xf}) + K_{(2)w} \cdot (K_{(1)q} \cdot V_{(1)x} + K_{(1)v} \cdot I_{(1)xf}) \right] - \\ &\quad - \left[ K_{(1)v} \cdot (K_{(2)r} \cdot V_{(2)x} + K_{(2)v} \cdot I_{(2)xf}) + K_{(1)w} \cdot (K_{(2)q} \cdot V_{(2)x} + K_{(2)v} \cdot I_{(2)xf}) \right] \end{aligned} \quad (III.38)$$

- Faltas trifásica "l-l-l" o "l-l-l-g":

$$\begin{aligned}K_A &= V_{(1)x} \cdot K_{(1)v} \\K_B &= V_{(1)x} \cdot K_{(1)w} - B_{(1)xy} \cdot I_{(1)xf} \cdot K_{(1)v} \\K_C &= K_{(1)q} \cdot V_{(1)x} + K_{(1)v} \cdot I_{(1)xf} \\K_D &= K_{(1)r} \cdot V_{(1)x} + K_{(1)u} \cdot I_{(1)xf}\end{aligned}\tag{III.39}$$

Para obtener la distancia  $d$  aplicando (III.36), este método presenta un procedimiento iterativo, que consiste en las siguientes acciones:

- 1) Determinar el valor de  $K_m$ ,  $K_n$  y  $K_p$ , aplicando (III.33).
- 2) Utilizando la admitancia de carga agrupada en  $N$ , para el caso pre-falta, determinar el valor de  $K_q$ ,  $K_r$ ,  $K_u$ ,  $K_v$  y  $K_w$ , aplicando (III.34).
- 3) En base a las constantes calculadas en los pasos anteriores, determinar  $K_A$ ,  $K_B$ ,  $K_C$  y  $K_D$ , aplicando (III.37), (III.38) o (III.39) según el tipo de falta.
- 4) En base a las constantes calculadas en los pasos anteriores, se determina la distancia  $d$ , aplicando (III.36).
- 5) Determinar, a partir de la distancia  $d$ , el valor de la tensión en el nodo  $N$ , aplicando (III.32).
- 6) Calcular un nuevo valor de admitancia de carga agrupada en  $N$ , aplicando (III.24) la tensión calculada en paso anterior
- 7) Calcular, aplicando (III.34), nuevos valores para  $K_q$ ,  $K_r$ ,  $K_u$ ,  $K_v$  y  $K_w$ , utilizando el nuevo valor de admitancia de carga agrupada en  $N$  calculado en paso anterior.
- 8) En base a estas nuevas constantes calculadas en paso anterior, se recalcularán  $K_A$ ,  $K_B$ ,  $K_C$  y  $K_D$ , aplicando (III.37), (III.38) o (III.39) según el tipo de falta.
- 9) En base a las nuevas constantes  $K_A$ ,  $K_B$ ,  $K_C$  y  $K_D$ , determinar la nueva distancia  $d$ , aplicando (III.36).
- 10) Repetir los pasos del 5 al 9, hasta la precisión deseada en  $d$ .

Para finalizar con la explicación de este método, destacar que los autores identifican el problema en sistemas con ramas laterales de la múltiple estimación, proponiendo una técnica para solucionarlo. Esta técnica se basa en utilizar la información adicional aportada por FCIs, que permita identificar las ramas realmente afectadas de la línea.

**III.1.1.1.4. Método Novosel et al.**

Este método de localización de faltas fue presentado por Novosel *et al.*[75] y está basado en la medida de tensión y corriente, antes y durante la falta, registradas en el comienzo de la línea siendo válido para cualquier tipo de falta (“1-g”, “1-l”, “1-l-g” y “1-l-l”). En este trabajo se describen dos métodos de localización; el primero consiste en una técnica iterativa pero con un cálculo más simple, y el segundo aplicando un cálculo directo más complejo. Básicamente, este método se basa en aplicar un análisis de componentes superimpuestas, sobre una simplificación de la línea de distribución suponiendo cargas concentradas (ver Figura III.8) donde  $Z_{Seq}$  agrupa las distintas laterales conectadas antes del nodo X, mientras que  $Z_{Ldeq}$  agrupa las distintas cargas conectadas después del nodo X+1. Esta simplificación es posible al presuponer que las impedancias de las cargas son mucho mayores que la impedancia de la línea.

Para determinar estas dos impedancias utilizaremos el análisis del circuito en la situación de pre-falta (ver Figura III.9). Concretamente (III.40) permite, aplicando un análisis mediante las componentes de secuencia positiva, calcular  $Z_{Ldeq}$  que agrupa toda las cargas conectadas desde el nodo X en adelante. Esto es posible, como se ha comentado anteriormente, debido a que las impedancias de las cargas son mucho mayores que la impedancia de la línea.

$$Z_{(1)Ld\ eq} = \frac{V_{(1)sp}}{I_{(1)sp}} - Z_{(1)L} \quad \text{(III.40)}$$

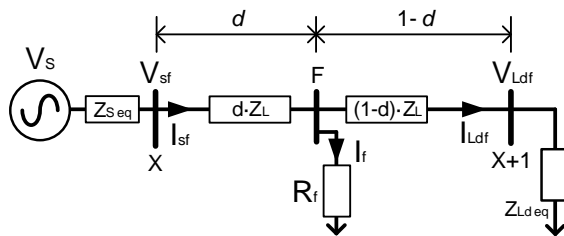


Figura III.8: Modelo simplificado de línea en condición de falta (mét. Novosel et al.).

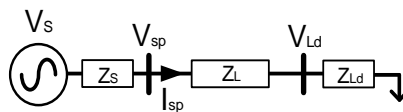


Figura III.9: Modelo simplificado de línea en condición de pre-falta (mét. Novosel et al.).

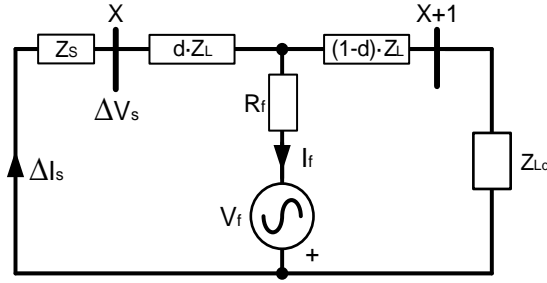


Figura III.10: Modelo simplificado de componentes superimpuestas (mét. Novosel et al.).

La impedancia  $Z_{s\text{eq}}$ , se puede obtener a través de (III.41), aplicando un análisis del circuito por componentes superimpuestas (ver Figura III.10, donde  $\Delta I_s = I_{sf} + I_{sp}$  y  $\Delta V_s = V_{sf} - V_{sp}$ ), combinado con un análisis por componentes de secuencia positiva. Esta impedancia equivalente modela las distintas laterales y cargas anteriores al nodo X. Como en el caso anterior, esto es posible, gracias a que las impedancias de las cargas son mucho mayores que la impedancia de la línea. También se pueden utilizar (III.41) con las componentes de secuencia negativa, para minimizar los errores asociados a sistemas con cargas desbalanceadas.

$$Z_{(1)s\text{eq}} = -\frac{\Delta V_{(1)s}}{\Delta I_{(1)s}} \quad \text{(III.41)}$$

Una vez calculada esta impedancia, este método analiza la impedancia aparente medida en X, definida según (III.42):

$$Z_{s,f} = \left( \frac{V_{sf}}{I_{sf}} \right) = d \cdot Z_L + R_f \cdot \left( \frac{I_f}{I_{sf}} \right) \quad \text{(III.42)}$$

Definiendo dos factores; el factor de distribución de corriente ( $d_s$ ) expresado según (III.43) y  $n_s$  expresado según (III.44).

$$d_s = \frac{\Delta I_s}{I_f} = |d_s| \angle \beta_s \quad \text{(III.43)}$$

$$n_s = \frac{I_{sf}}{\Delta I_s} = |n_s| \angle \gamma_s \quad \text{(III.44)}$$

Sustituyendo en (III.42) los factores (III.43) y (III.44), se obtiene:

$$Z_{s,f} = \left( \frac{V_{sf}}{I_{sf}} \right) = d \cdot Z_L + R_f \cdot \frac{1}{d_s} \cdot \frac{1}{n_s} \quad \text{(III.45)}$$

Es a partir de este punto donde este método, plantea dos procedimientos para la resolución de (III.45); uno iterativo y otro directo:



### Método iterativo para la resolución de (III.45)

Este método consiste en estimar la posición de la falta  $d$ , mediante el cálculo iterativo de la fase del factor de distribución de corriente ( $\beta_s$ ). Para esto se define  $d_s$  como:

$$d_s = \frac{\Delta I_s}{I_f} = \frac{Z_{Ldeq} + (1-d) \cdot Z_L}{Z_{se} + Z_L + Z_{Ldeq}} = |d_s| \angle \beta_s \quad (\text{III.46})$$

Definiendo el incremento de corriente de la fuente ( $\Delta I_s$ ) en notación polar (III.47), donde  $\lambda_s$  representa el ángulo relativo entre la corriente de entrada a la línea, en condición de falta ( $I_{sf}$ ) y pre-falta ( $I_{sp}$ ):

$$\Delta I_s = |\Delta I_s| \angle \lambda_s \quad (\text{III.47})$$

Sustituyendo en (III.45), las expresiones (III.43), (III.44) y (III.47), quedaría:

$$V_{sf} = d \cdot Z_L \cdot I_{sf} + R_f \cdot \frac{|\Delta I_s|}{|d_s|} \angle (\lambda_s - \beta_s) \quad (\text{III.48})$$

Tomando  $\Phi$  como un complejo unitario es posible reescribir (III.48) como:

$$V_{sf} = d \cdot Z_L \cdot I_{sf} + R_f \cdot \frac{|\Delta I_s|}{|d_s|} \cdot \Phi \quad (\text{III.49}) \quad \text{Donde:} \quad \Phi = e^{j(\lambda_s - \beta_s)} \quad (\text{III.50})$$

Dividiendo la ecuación compleja (III.49) en parte real e imaginaria quedaría:

$$d = \frac{\text{Re}[V_{sf}] \cdot \text{Im}[\Phi] - \text{Im}[V_{sf}] \cdot \text{Re}[\Phi]}{\text{Re}[Z_L] \cdot M - \text{Im}[Z_L] \cdot N} \quad (\text{III.51})$$

Donde:

$$M = \text{Re}[I_{sf}] \cdot \text{Im}[\Phi] - \text{Im}[I_{sf}] \cdot \text{Re}[\Phi] \quad ; \quad N = \text{Re}[I_{sf}] \cdot \text{Re}[\Phi] + \text{Im}[I_{sf}] \cdot \text{Im}[\Phi]$$

Tomando como primera aproximación  $\beta_s = 0$ , se obtendría  $\Phi_{app} = e^{j(\lambda_s)}$  como primer valor de la iteración. Aplicando (III.51) se obtiene un valor inicial de la posición de falta ( $d_{app}$ ), que se utilizaría a su vez en (III.46), para recalcular un nuevo ángulo  $\beta_s$ . Este proceso iterativo se repetirá aplicando (III.46), (III.50) y (III.51), hasta que la variación de la posición ( $d$ ) obtenga la precisión deseada. En base al valor final estimado de posición, es posible obtener  $R_f$ , aplicando la expresión (III.52), derivada de (III.48):

$$R_f = \frac{\text{Re}[V_{sf}] - d \cdot \text{Re}[I_{sf} \cdot Z_L]}{\text{Re}\left[\frac{\Delta I_s}{d_s}\right]} \quad (\text{III.52})$$

**Método directo para la resolución de (III.45)**

$$V_{sf} = d \cdot Z_L \cdot I_{sf} + R_f \cdot \frac{\Delta I_s}{d_s} \quad (III.53)$$

Este método se basa en resolver directamente ecuación compleja (III.53), y que aplicando (III.46), se puede reescribir según:

$$d^2 - d \cdot k_1 + k_2 - k_3 \cdot R_f \quad (III.54)$$

Donde:

$$k_1 = \frac{V_{sf}}{I_{sf} \cdot Z_L} + \frac{Z_{Ldeq}}{Z_L} + 1 \quad k_2 = \frac{V_{sf}}{I_{sf} \cdot Z_L} \left( \frac{Z_{Ldeq}}{Z_L} + 1 \right) \quad k_3 = \frac{\Delta I_s}{I_{sf} \cdot Z_L} \left( \frac{Z_{seq} + Z_{Ldeq}}{Z_L} + 1 \right)$$

Resolviendo la ecuación compleja (III.53), puede obtenerse la expresión de la distancia d según. Es importante destacar que de las dos soluciones posibles, en (III.55) ya se ha escogido la correcta:

$$d = \frac{-b - \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a} \quad (III.55)$$

Donde:

$$a = 1$$

$$b = - \left( \operatorname{Re}[k_1] - \frac{\operatorname{Im}[k_1] \cdot \operatorname{Re}[k_3]}{\operatorname{Im}[k_3]} \right)$$

$$c = \operatorname{Re}(k_2) - \frac{\operatorname{Im}(k_2) \cdot \operatorname{Re}(k_3)}{\operatorname{Im}(k_3)}$$

El método de Novosel *et al.* es extensible a sistemas trifásico y a cualquier tipo de falta, únicamente cambiando sus datos de entrada según la Tabla III.4 (esta extensión se justifica según el Anexo C del presente documentos). Así pues, este método propone un método de clasificación de faltas mediante la comparación directa de los incrementos de corriente asociados a cada fase. Pero no plantea ningún procedimiento para solucionar el problema de la múltiple estimación de la posición.

Tipo de Falta	$V_{sf}$	$I_{sf}$	$\Delta I_s$
Faltas Monofásica, línea-tierra fase "x"	$V_{sf,x}$	$I_{sf,x} + \frac{Z_{(0)L} - Z_{(1)L}}{Z_{(1)L}} \cdot I_{(0)sf}$	$3 \cdot \Delta I_{(1)sf,x}$
Faltas Bifásicas Línea-línea o línea-línea-tierra fases "x" e "y"	$V_{sf,x} - V_{sf,y}$	$I_{sf,x} - I_{sf,y}$	$\Delta I_{sf,x} - \Delta I_{sf,y}$
Faltas Trifásica, fases "a", "b" y "c"	$V_{sf,a} - V_{sf,b}$	$I_{sf,a} - I_{sf,b}$	$\Delta I_{sf,a} - \Delta I_{sf,b}$

Tabla III.4: Extensión para distintos casos de falta (mét. Novosel *et al.*).

**III.1.1.1.5. Método Choi et al.**

El método descrito por Choi *et al.*[76] pone de manifiesto los problemas que presentan los métodos de localización basados en el análisis sobre componentes simétricas, donde a diferencia de lo que sucede en los sistemas balanceados, no se generan tres redes de secuencia independientes. Debido a este hecho, los autores plantean como un método de localización, basado en un análisis directo del circuito, válido tanto para sistemas balanceados como desbalanceados.

El método presentado por los autores no tiene en cuenta las impedancias laterales ( $Z_{Teq}$  en Figura III.2), por lo que el circuito equivalente sería el representado en la Figura III.11. Es importante denotar que los autores han cambiado la forma de expresar la distancia normalizada desde el origen del tramo hasta el punto de falta, siendo ahora  $(1-d)$ , en vez de  $d$ .

Este método consiste en analizar la tensión de entrada (III.56), para cada fase:

$$\begin{matrix} \underbrace{V_A} \\ \downarrow \\ \begin{bmatrix} V_{Aa} \\ V_{Ab} \\ V_{Ac} \end{bmatrix} \end{matrix} = (1-d) \cdot \begin{bmatrix} Z_{Laa} & Z_{Lab} & Z_{Lac} \\ Z_{Lba} & Z_{Lbb} & Z_{Lbc} \\ Z_{Lca} & Z_{Lcb} & Z_{Lcc} \end{bmatrix} \cdot \begin{matrix} \underbrace{I_{A,f}} \\ \downarrow \\ \begin{bmatrix} I_{A,fa} \\ I_{A,fb} \\ I_{A,fc} \end{bmatrix} \end{matrix} + \begin{matrix} \underbrace{V_F} \\ \downarrow \\ \begin{bmatrix} V_{Fa}} \\ V_{Fb} \\ V_{Fc} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (III.56)$$

Analizando la segunda parte del circuito, es posible asociar la resistencia de falta con una carga en paralelo, formada por el tramo de línea posterior a la falta y por la propia carga. Analizando esta asociación en términos de admitancia, quedaría la siguiente expresión:

$$Y_L = Y_f + (d \cdot Z_L + Z_{Ld})^{-1} \quad (III.57)$$

Donde la admitancia de la falta ( $Y_f$ ) si es una falta únicamente sobre la línea "a" quedaría definida según (III.58) y la impedancia de carga ( $Z_{Ld}$ ) definida según (III.59).

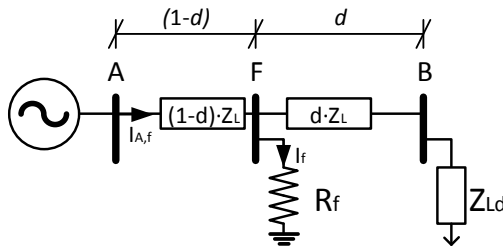


Figura III.11: Modelo simplificado de línea en condición de falta (mét. Choi et al.).

$$Y_f = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.58}) \quad Z_{Ld} = \begin{bmatrix} Z_{Ld\ aa} & Z_{Ld\ ab} & Z_{Ld\ ac} \\ Z_{Ld\ ba} & Z_{Ld\ bb} & Z_{Ld\ bc} \\ Z_{Ld\ ca} & Z_{Ld\ cb} & Z_{Ld\ cc} \end{bmatrix} \quad (\text{III.59})$$

Por tanto, aplicado un divisor de corriente sobre dicha asociación es posible expresar esa corriente de falta ( $I_f$ ), según la siguiente expresión:

$$I_f = Y_f \cdot [Y_f + (d \cdot Z_L + Z_{Ld})^{-1}]^{-1} \cdot I_{A,f} \quad (\text{III.60})$$

Para calcular la matriz inversa, los autores plantean usar la identidad de Woodbury[77], donde se define:

$$(A^{-1} + BCD)^{-1} = A - AB(C^{-1} + DAB)^{-1}DA \quad (\text{III.61})$$

Una vez determinadas A, B, C y D y en base a éstas, es posible determinar la expresión de la corriente de falta:

$$I_f = \frac{R_f}{R_f + d \cdot Z_{Laa} + Z_{Ld\ aa}} \begin{bmatrix} d \cdot Z_{Laa} + Z_{Ld\ aa} \\ d \cdot Z_{Lab} + Z_{Ld\ ab} \\ d \cdot Z_{Lac} + Z_{Ld\ ac} \end{bmatrix}^T \cdot \begin{bmatrix} I_{A,f\ a} \\ I_{A,f\ b} \\ I_{A,f\ c} \end{bmatrix} \quad (\text{III.62})$$

Sustituyendo (III.62) en (III.56) y agrupando términos, es posible determinar el siguiente polinomio complejo de segundo orden:

$$d^2 \cdot a_1 + d \cdot a_2 + a_3 + R_f \cdot a_4 = 0 \quad (\text{III.63})$$

Donde:

$$\begin{aligned} a_1 &= (Z_{Laa} \cdot I_{A,f\ a} + Z_{Lab} \cdot I_{A,f\ b} + Z_{Lac} \cdot I_{A,f\ c}) \cdot Z_{Laa} \\ a_2 &= V_{Aa} \cdot Z_{Laa} - (Z_{Laa} \cdot I_{A,f\ a} + Z_{Lab} \cdot I_{A,f\ b} + Z_{Lac} \cdot I_{A,f\ c}) \cdot Z_{Laa} (Z_{Laa} \cdot I_{A,f\ a} + Z_{Lab} \cdot I_{A,f\ b} + Z_{Lac} \cdot I_{A,f\ c}) \cdot Z_{Ld\ aa} \\ a_3 &= [V_{Aa} - (Z_{Laa} \cdot I_{A,f\ a} + Z_{Lab} \cdot I_{A,f\ b} + Z_{Lac} \cdot I_{A,f\ c})] \cdot Z_{Ld\ aa} \\ a_4 &= V_{Aa} - (Z_{Laa} \cdot I_{A,f\ a} + Z_{Lab} \cdot I_{A,f\ b} + Z_{Lac} \cdot I_{A,f\ c}) - (Z_{Ld\ aa} \cdot I_{A,f\ a} + Z_{Ld\ ab} \cdot I_{A,f\ b} + Z_{Ld\ ac} \cdot I_{A,f\ c}) \end{aligned}$$

Analizando la parte imaginaria de (III.63), es posible determinar:

$$R_f = -\frac{d^2 \cdot \text{Im}[a_1] + d \cdot \text{Im}[a_2] + \text{Im}[a_3]}{\text{Im}[a_4]} \quad (\text{III.64})$$

Analizando la parte real, y sustituyendo  $R_f$  según (III.64), se obtiene una expresión de segundo grado, únicamente dependiente de la distancia normalizada  $d$ :

$$d^2 \left( \text{Re}[a_1] - \frac{\text{Re}[a_4]}{\text{Im}[a_4]} \text{Im}[a_1] \right) + d \left( \text{Re}[a_2] - \frac{\text{Re}[a_4]}{\text{Im}[a_4]} \text{Im}[a_2] \right) + \text{Re}[a_3] - \frac{\text{Re}[a_4]}{\text{Im}[a_4]} \text{Im}[a_3] = 0 \quad (\text{III.65})$$

Resolviendo (III.65) es posible determinar la distancia que existe hasta la falta definida como  $1-d$ . Este método al igual que ocurría con todos los anteriores basados en medidas en un único punto, también presenta problemas de múltiple estimación.

**III.1.1.1.6. Método de Lee et al.**

El método descrito por Lee *et al.*[78] propone un sistema para localizar faltas simples (l-g), aplicando un algoritmo basado en el análisis de patrones de corriente para determinar la posición real de la falta. Sin embargo, como primera parte del trabajo, también propone un método iterativo de localización basado en el cálculo de la impedancia aparente.

Basándose en la simplificación de sección única sometida a una falta simple en la fase a (ver Figura III.12), se puede plantear la expresión de la tensión de entrada (nodo X), según (III.66), donde se tienen en cuenta los efectos de las impedancia de la línea, de acoplamiento directo ( $Z_{Laa}$ ) e indirecto ( $Z_{Lba}$  y  $Z_{Lca}$ ), la medidas de corrientes de cada fase ( $I_a$ ,  $I_b$  y  $I_c$ ) en X, la posición ( $d$ ), la corriente ( $I_f$ ) y resistencia ( $R_f$ ) de la falta.

$$V_a = d \cdot (Z_{Laa} \cdot I_a + Z_{Lab} \cdot I_b + Z_{Lac} \cdot I_c) + I_f \cdot R_f \quad (III.66)$$

Se puede observar que (III.66) presenta tres incógnitas; la posición normalizada ( $d$ ), la corriente ( $I_f$ ) y resistencia ( $R_f$ ) de la falta. Analizando ésta expresión en parte real e imaginaria y sustituyendo la resistencia de falta en una de las dos expresiones resultantes, se obtiene:

$$d = \frac{\text{Re}[V_a] \cdot \text{Im}[I_f] - \text{Im}[V_a] \cdot \text{Re}[I_f]}{A \cdot \text{Im}[I_f] - B \cdot \text{Re}[I_f]} \quad (III.67)$$

Donde:

$$A = \text{Re}[Z_{Laa}] \cdot \text{Re}[I_a] - \text{Im}[Z_{Laa}] \cdot \text{Im}[I_a] + \text{Re}[Z_{Lab}] \cdot \text{Re}[I_b] - \text{Im}[Z_{Lab}] \cdot \text{Im}[I_b] + \text{Re}[Z_{Lac}] \cdot \text{Re}[I_c] - \text{Im}[Z_{Lac}] \cdot \text{Im}[I_c]$$

$$B = \text{Re}[Z_{Laa}] \cdot \text{Im}[I_a] + \text{Im}[Z_{Laa}] \cdot \text{Re}[I_a] + \text{Re}[Z_{Lab}] \cdot \text{Im}[I_b] + \text{Im}[Z_{Lab}] \cdot \text{Re}[I_b] + \text{Re}[Z_{Lac}] \cdot \text{Im}[I_c] + \text{Im}[Z_{Lac}] \cdot \text{Re}[I_c]$$

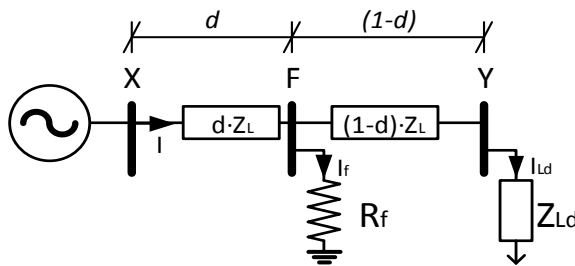


Figura III.12: Modelo simplificado de línea en condición de falta (mét. Lee et al.).

Por otro lado la corriente de falta ( $I_f$ ) puede ser obtenida mediante la expresión (III.68), donde introducimos la corriente por la carga ( $I_{Ld a}$ ).

$$I_f = I_a - I_{Ld a} \quad (III.68)$$

Sin embargo, la corriente de carga no puede igualarse directamente a su valor anterior a la falta (prefalta), ya que cuando esta se origina, se produce una disminución (normalmente pequeña) en la tensión aplicada sobre la carga.

Concretamente se toma un modelo[79], que utiliza una carga agrupada dependiente de la tensión, y que permite expresar la corriente de carga según:

$$I_{Ld a} = \text{Re} \left[ I_{Ld p,a} \right] \cdot \left| \frac{V_{F f,a}}{V_{p,a}} \right|^{n_p} + j \cdot \text{Im} \left[ I_{Ld p,a} \right] \cdot \left| \frac{V_{F f,a}}{V_{p,a}} \right|^{n_q} \quad (III.69)$$

Donde  $I_{Ld p,a}$  y  $V_{F p,a}$  representan la corriente y la tensión de la fase  $a$  de la carga en el caso de prefalta, y  $V_{F f,a}$  representa la tensión en el nodo  $F$ , en presencia de falta. Por otro lado,  $n_p$  y  $n_q$  representan dos constantes que permiten modular el comportamiento de la carga; carga de corriente constante ( $n_p = n_q = 0$ ), carga de potencia constante ( $n_p = n_q = -1$ ) y carga de impedancia constante ( $n_p = n_q = 1$ ). Habitualmente en un sistema de distribución  $n_p$  presentan unos valores de 1.5 a 2.8, y  $n_q$  valores de 2.5 a 7.0.

Con todo esto, para determinar la posición de la falta, en este método se presenta el siguiente método iterativo:

- 1) Asumir  $I_{Ld a}$  inicialmente como el valor prefalta
- 2) Calcular  $I_f$  aplicando la expresión (III.68).
- 3) Determinar  $d$  aplicando (III.67).
- 4) Calcular la tensión en el punto de falta ( $V_{f,a}$ ,  $V_{f,b}$  y  $V_{f,c}$ ) del nodo  $F$ , aplicando:

$$\begin{bmatrix} V_{f,a} \\ V_{f,b} \\ V_{f,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - d \cdot \begin{bmatrix} Z_{Laa} & Z_{Lab} & Z_{Lac} \\ Z_{Lba} & Z_{Lbb} & Z_{Lbc} \\ Z_{Lca} & Z_{Lcb} & Z_{Lcc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (III.70)$$

- 5) Calcular el valor actualizado de  $I_{Ld a}$  aplicando (III.69), utilizando el valor de tensión calculado en el paso anterior mediante (III.70).
- 6) Repetir desde el paso 2, actualizando el nuevo valor de  $I_{Ld a}$ , hasta que  $d$  converja en un valor con la precisión deseada.

### III.1.1.1.7. Método de Salim et al.

El trabajo descrito por Salim *et al.*[80] no es exactamente la definición de un nuevo método de localización de falta. Concretamente, en este trabajo los autores ponen de manifiesto carencias encontradas en otros métodos de localización (ejemplo el método de Lee *et al.*, ver apartado III.1.1.1.6), proponiendo una extensión de estos a tres niveles; extensión a distintos tipos de falta, topologías radiales y carga variables.

En este trabajo, se plantean en primer lugar, las ecuaciones básicas y los pasos asociados a la localización en el caso de una falta simple (l-g), según la Figura III.13a. Donde la ecuación fundamental para permitir la localización dentro de una sección de línea ( $d$ ) y la resistencia de falta ( $R_f$ ), se describe según:

$$\begin{bmatrix} d \\ R_f \end{bmatrix} = \frac{1}{M_{1,x} \cdot \text{Im}[I_{f,x}] - M_{2,x} \cdot \text{Re}[I_{f,x}]} \begin{bmatrix} \text{Im}[I_{f,x}] & -\text{Re}[I_{f,x}] \\ -M_{2,x} & M_{1,x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Re}[V_{M,x}] \\ \text{Im}[V_{M,x}] \end{bmatrix} \quad (\text{III.71})$$

Donde  $V_{M,x}$  es la tensión registrada en el nodo M (nodo de entrada) en la línea x (línea en falta) e  $I_{f,x}$  representa la corriente de falta.  $M_{1,x}$  y  $M_{2,x}$  representan constantes definidas según (III.72) y (III.73), y donde  $I_{M,x}$  es la corriente de entrada a la sección, en la fase x y  $Z_{L,x,k}$  es la impedancia por unidad de longitud (ohm/m) de la sección analizada (M-N), entre la fases x y k:

$$M_{1,x} = \sum_{k=a,b,c} \left( \text{Re}[Z_{L,x,k}] \cdot \text{Re}[I_{M,k}] - \text{Im}[Z_{L,x,k}] \cdot \text{Im}[I_{M,k}] \right) \quad (\text{III.72})$$

$$M_{2,x} = \sum_{k=a,b,c} \left( \text{Re}[Z_{L,x,k}] \cdot \text{Im}[I_{M,k}] + \text{Im}[Z_{L,x,k}] \cdot \text{Re}[I_{M,k}] \right) \quad (\text{III.73})$$

### Extensión a distintos tipos de falta

A partir de estas expresiones, en este trabajo se plantea una variante según el tipo de falta, lo que como es obvio, requerirá una fase previa de análisis en la que se determine el tipo de falta.

#### Faltas simples “l-g” sobre la fase x:

En caso de una falta simple (ver Figura III.13a), el procedimiento propuesto es el ya explicado al comienzo de este apartado, aplicando (III.71) y utilizando un método iterativo como en Lee *et al.* (ver apartado III.1.1.1.6).

#### Faltas entre dos fases “l-l” (fases x e y):

En este caso de falta (ver Figura III.13b), este trabajo plantea utilizar el mismo método de resolución que en el caso de la falta simple, únicamente modificando la expresión (III.71), quedando descrita ésta según:

$$\begin{bmatrix} d \\ R_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_3 & \text{Re}[I_{f,x}] \\ M_4 & \text{Im}[I_{f,x}] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \text{Re}[V_{M,x}] - \text{Re}[V_{M,y}] \\ \text{Im}[V_{M,x}] - \text{Im}[V_{M,y}] \end{bmatrix} \quad (\text{III.74})$$

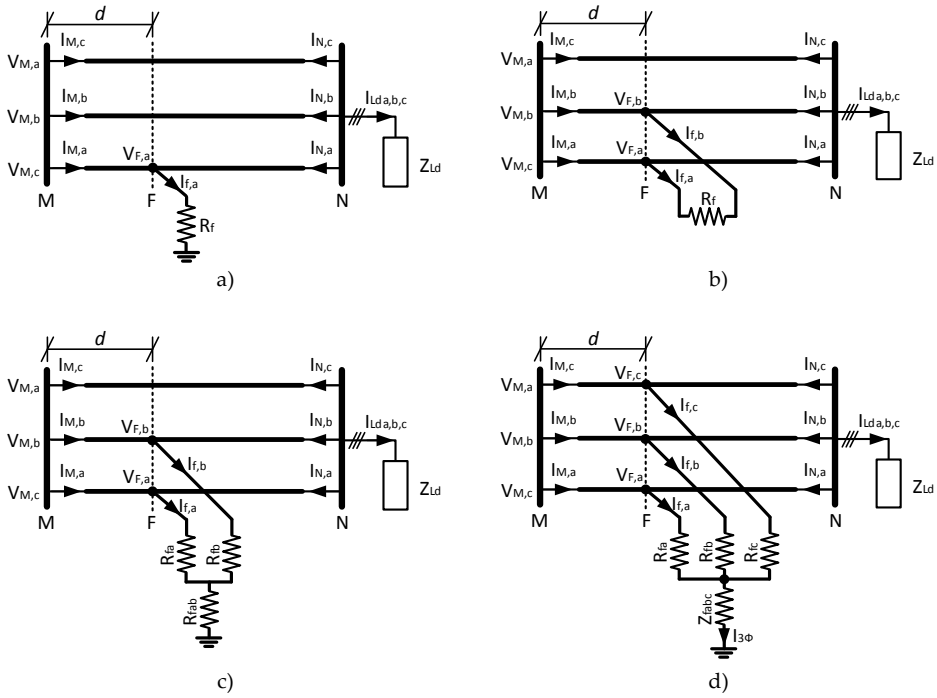


Figura III.13: Modelo simplificado de faltas (mét. Salim et al.).

a) falta simple "l-g" en fase a, b) falta "l-l" en fase a y b, c) falta "l-l-g" en fase a y b, d) falta trifásica "l-l-l-g".

Donde  $M_3$  y  $M_4$  representan constantes definidas según:

$$M_3 = \sum_{k=a,b,c} \left[ (\text{Re}[Z_{L,x,k}] - \text{Re}[Z_{L,y,k}]) \cdot \text{Re}[I_{M,k}] - (\text{Im}[Z_{L,x,k}] - \text{Im}[Z_{L,y,k}]) \cdot \text{Im}[I_{M,k}] \right] \quad (\text{III.75})$$

$$M_4 = \sum_{k=a,b,c} \left[ (\text{Re}[Z_{L,x,k}] - \text{Re}[Z_{L,y,k}]) \cdot \text{Im}[I_{M,k}] + (\text{Im}[Z_{L,x,k}] - \text{Im}[Z_{L,y,k}]) \cdot \text{Re}[I_{M,k}] \right] \quad (\text{III.76})$$

Faltas entre dos fases y tierra "l-l-g" (fases x e y):

En este caso (ver Figura III.13c), la expresión (III.71) quedaría ahora definida según:

$$\begin{bmatrix} d \\ R_{fx} \\ R_{fy} \\ R_{fxy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{1,x} & \text{Re}[I_{f,x}] & 0 & \text{Re}[I_{f,x}] + \text{Re}[I_{f,y}] \\ M_{2,x} & \text{Im}[I_{f,x}] & 0 & \text{Im}[I_{f,x}] + \text{Im}[I_{f,y}] \\ M_{1,y} & 0 & \text{Re}[I_{f,y}] & \text{Re}[I_{f,x}] + \text{Re}[I_{f,y}] \\ M_{2,y} & 0 & \text{Im}[I_{f,y}] & \text{Im}[I_{f,x}] + \text{Im}[I_{f,y}] \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \text{Re}[V_{M,x}] \\ \text{Im}[V_{M,x}] \\ \text{Re}[V_{M,y}] \\ \text{Im}[V_{M,y}] \end{bmatrix} \quad (\text{III.77})$$

Donde  $R_{fx}$  y  $R_{fy}$  representan las resistencias de falta conectadas a la fase x e y respectivamente.  $R_{fxy}$  representa la resistencia de falta que existe entre tierra y las resistencias conectadas con cada línea implicada ( $R_{fx}$  y  $R_{fy}$ ).  $M_{1,x}$ ,  $M_{2,x}$ ,  $M_{1,y}$  y  $M_{2,y}$  representan constantes definidas según (III.72) y (III.73).



**Faltas trifásicas “1-1-1-g”:**

En este caso (ver Figura III.13d), la expresión (III.71) quedaría ahora definida según:

$$\begin{bmatrix} d \\ R_{fa} \\ R_{fb} \\ R_{fc} \\ R_{fabc} \\ X_{fabc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{1,a} & \text{Re}[I_{f,a}] & 0 & 0 & \text{Re}[I_{3\Phi}] & -\text{Im}[I_{3\Phi}] \\ M_{2,a} & \text{Im}[I_{f,a}] & 0 & 0 & \text{Im}[I_{3\Phi}] & \text{Re}[I_{3\Phi}] \\ M_{1,b} & 0 & \text{Re}[I_{f,b}] & 0 & \text{Re}[I_{3\Phi}] & -\text{Im}[I_{3\Phi}] \\ M_{2,b} & 0 & \text{Im}[I_{f,b}] & 0 & \text{Im}[I_{3\Phi}] & \text{Re}[I_{3\Phi}] \\ M_{1,c} & 0 & 0 & \text{Re}[I_{f,c}] & \text{Re}[I_{3\Phi}] & -\text{Im}[I_{3\Phi}] \\ M_{2,c} & 0 & 0 & \text{Im}[I_{f,c}] & \text{Im}[I_{3\Phi}] & \text{Re}[I_{3\Phi}] \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \text{Re}[V_{M,a}] \\ \text{Im}[V_{M,a}] \\ \text{Re}[V_{M,b}] \\ \text{Im}[V_{M,b}] \\ \text{Re}[V_{M,c}] \\ \text{Im}[V_{M,c}] \end{bmatrix} \quad \text{(III.78)}$$

Donde  $I_{3\Phi}$  estaría definida según (III.79) y  $Z_{fabc}$  según (III.80).

$$I_{3\Phi} = I_{f,a} + I_{f,b} + I_{f,c} \quad \text{(III.79)} \quad Z_{fabc} = R_{fabc} + j \cdot X_{fabc} \quad \text{(III.80)}$$

**Extensión a topologías radiales**

En este trabajo se plantea un procedimiento para poder aplicar los métodos generales a líneas con topología radial (con múltiples ramas o líneas laterales). En este sentido, este método plantea dividir el sistema en varios circuitos equivalentes (tantos como secciones finales presente la línea) con una topología lineal con cargas distribuidas (sin ningún ramal). Estos circuitos equivalentes se denominarán “camino posible de flujo energético” (o *possible power flow path*, PFPF). Estos PFPF se obtienen agrupando en cada nodo con bifurcación, los distintos elementos (cargas y secciones de línea) colgados de las ramas no directamente relacionados con cada PFPF. Estas cargas agrupadas se asociarían a su vez con la propia carga conectada en cada nodo.

Una vez realizado esto, se aplicará el método de localización sobre cada uno de estos PFPF, aplicándose sección a sección, y obteniéndose como máximo una posible localización asociada a cada uno.

**Extensión a cargas variables**

Esta última parte del trabajo pretende poner de manifiesto los errores asociados a modelos que toman cargas constantes (asociadas típicamente a cargas medias). Para tratar de minimizar estos errores, en este trabajo se propone calcular un único factor de corrección por fase, y multiplicando éstos por cada una de las cargas. Dicho factor de corrección ( $f_{Ld\ x}$ ) se calculará analizando la carga prefalta medida desde la cabecera (mediante  $V_{p,x}$  y  $I_{p,x}$ ), comparándola con la carga promedio.

$$f_{Ld\ x} = \frac{V_{p,x} / I_{p,x}}{Z_{Ld\ M,x}} \quad \text{(III.81)}$$

### III.1.1.1.8. Método de Filomena et al.

Siguiendo con la filosofía del método descrito en el apartado anterior, Filomena *et al.*[81] presentan otra extensión de los métodos de localización, sin embargo en esta ocasión, dicha extensión está orientada a mejorar la resolución en la localización de faltas sobre líneas subterráneas, compensando las corrientes capacitivas típicas en este tipo de trazados. Para modelar este efecto se utiliza un modelo de línea en  $\pi$  (ver Figura III.14), donde se representan estos efectos capacitivos como una matriz de admitancias en derivación, únicamente caracterizando las capacidades directas, modelando como cero las componentes cruzadas[7].

Concretamente, en este método se propone una extensión para los dos casos de falta típicamente asociados a líneas subterráneas; faltas simples “1-g” (ver Figura III.14a) y faltas trifásicas “1-1-1-g” (ver Figura III.14b).

#### Extensión a faltas simple “1-g” sobre la fase x, en líneas subterráneas

En este caso (ver Figura III.14a) aplicamos directamente la ecuación básica de localización ya calculada en el método anterior (III.82), para determinar la posición de la falta ( $d$ ) dentro de la sección de línea bajo estudio y la resistencia de falta ( $R_f$ ).

$$\begin{bmatrix} d \\ R_f \end{bmatrix} = \frac{1}{M_{1,x} \cdot \text{Im}[I_{f,x}] - M_{2,x} \cdot \text{Re}[I_{f,x}]} \begin{bmatrix} \text{Im}[I_{f,x}] & -\text{Re}[I_{f,x}] \\ -M_{2,x} & M_{1,x} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Re}[V_{M,x}] \\ \text{Im}[V_{M,x}] \end{bmatrix} \quad \text{(III.82)}$$

Donde  $V_{M,x}$  es la tensión registrada en el nodo M (nodo de entrada) en la línea x (línea en falta).  $I_{f,x}$  representa la corriente de falta,  $I_{M,x}$  es la corriente de entrada a la sección, en la fase x y  $Z_{L,x,k}$  es la impedancia por unidad de longitud (ohm/m) de la sección analizada (M-N), entre las fases x y k.

$$M_{1,x} = \sum_{k=a,b,c} \left( \text{Re}[Z_{L,x,k}] \cdot \text{Re}[I'_{M,k}] - \text{Im}[Z_{L,x,k}] \cdot \text{Im}[I'_{M,k}] \right) \quad \text{(III.83)}$$

$$M_{2,x} = \sum_{k=a,b,c} \left( \text{Re}[Z_{L,x,k}] \cdot \text{Im}[I'_{M,k}] + \text{Im}[Z_{L,x,k}] \cdot \text{Re}[I'_{M,k}] \right) \quad \text{(III.84)}$$

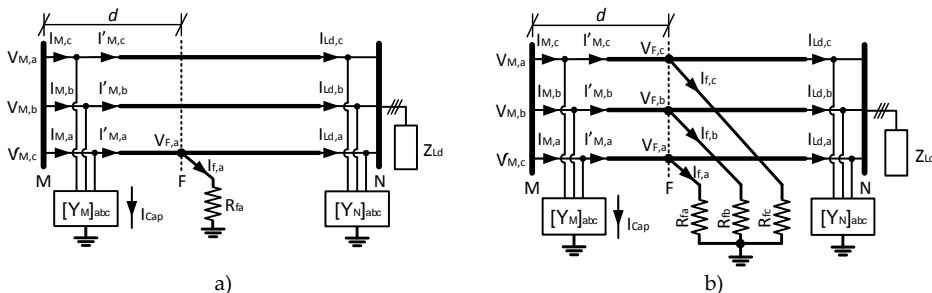


Figura III.14: Modelo simplificado de faltas en líneas subterráneas (mét. Filomena et al.).  
a) falta simple “1-g” en fase a, b) falta trifásica “1-1-1-g”.

La diferencia con el método explicado en el apartado anterior, radica en el cálculo del vector de corrientes de entrada modificadas ( $I'_{M,x}$ ) y el vector de corrientes de falta ( $I_f$ ), donde en ambos casos hay que sustraer la corriente asociada a la admitancia en paralelo,  $t$  definidas según (III.85) y (III.86). Además, es interesante destacar que en las corrientes de carga ( $I_{Ld}$ ), se agrupan los efectos de la capacidad en derivación asociada al tramo de sección tras la falta ( $Y_N$ ), junto con las cargas y secciones conectadas tras la sección bajo análisis ( $Z_{Ld}$ ).

$$[I'_M] = [I_M] - [I_{Cap}] \quad (III.85)$$

$$[I_f] = [I_M] - [I_{Ld}] - [I_{Cap}] \quad (III.86)$$

El cálculo de la corriente  $I_{cap}$ , viene definida según:

$$[I_{Cap}] = [Y_M][V_M] \quad (III.87)$$

$Y_M$ , como se comentó anteriormente, será modelada según una matriz diagonal, donde cada elemento es definido como una admitancia distribuida ( $\Omega\cdot m$ ):

$$[Y_M] = \begin{bmatrix} Y_{M,a} & 0 & 0 \\ 0 & Y_{M,b} & 0 \\ 0 & 0 & Y_{M,c} \end{bmatrix} \quad (III.88)$$

$$Y_{M,x} = \frac{d}{L} \cdot Y_{L,x} \quad (III.89)$$

Donde  $Y_{M,x}$  representa la admitancia en derivación asociada a la fase  $x$ ,  $L$  representa la distancia total de la línea e  $Y_{L,x}$  representa la admitancia en derivación total asociado a la línea  $x$ . No obstante, asociada a la suposición de sección en  $\pi$ ,  $Y_{M,x}$  ha de ser limitado al 50% de la admitancia total de la línea ( $Y_{L,x}$ ). Así pues, en casos de que la falta esté cercana al extremo final de la sección (nodo N), podría considerarse utilizar el 100% de esta admitancia, para aproximar mejor el modelo de línea.

### Extensión a faltas trifásicas “I-I-q”, en líneas subterráneas

En este caso (ver Figura III.14b) el planteamiento expuesto para la extensión a líneas simple “I-g” sigue siendo válido, únicamente sustituyendo la expresión (III.82) por (III.90), para el cálculo de la posición de la falta ( $d$ ) y las resistencias de faltas ( $R_{fa}$ ,  $R_{fb}$  y  $R_{fc}$ ).  $M_{1,x}$  y  $M_{2,x}$  representan constantes definidas según (III.83) y (III.84).

$$\begin{bmatrix} d \\ R_{fa} \\ R_{fb} \\ R_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{1,a} & \text{Re}[I_{f,a}] & 0 & 0 \\ M_{2,a} & \text{Im}[I_{f,a}] & 0 & 0 \\ M_{1,b} & 0 & \text{Re}[I_{f,b}] & 0 \\ M_{1,c} & 0 & 0 & \text{Re}[I_{f,c}] \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \text{Re}[V_{M,a}] \\ \text{Im}[V_{M,a}] \\ \text{Re}[V_{M,b}] \\ \text{Re}[V_{M,c}] \end{bmatrix} \quad (III.90)$$

**Algoritmo iterativo de resolución.**

Para la realización del cálculo en cualquiera de estos dos casos de falta, en éste método se plantea un procedimiento iterativo, que consiste en:

- 1) Asumir una  $Y_M$  inicial, aplicando (III.88) y (III.89) con  $Y_{M,x}$  igual al 50% de la admitancia total.

$$Y_{M,x} = Y_{N,x} = Y_{L,x} / 2 \quad (\text{III.91})$$

- 2) Asumir una  $I_{Ld,x}$  inicial, igual al valor de corriente registrado en la prefalta.

$$\left[ I_{Ld,x} \right] = \left[ I_{M,x \text{ pre}} \right] \quad (\text{III.92})$$

- 3) Calcular la corriente  $I_{cap}$  aplicando la expresión (III.87).
- 4) Calcular la corriente de falta  $I_{f,x}$  aplicando la expresión (III.86).
- 5) Estimar la posición de la falta ( $d$ ), aplicando según el caso (III.82) para faltas simples "l-g" o (III.90) para faltas trifásicas "1-1-1-g".
- 6) En base a este nuevo valor de  $d$  calcular un nuevo valor de  $Y_M$ , aplicando (III.88) y (III.89).
- 7) En el cálculo del paso anterior, hay que tener en cuenta que al aplicar un modelo en  $\pi$ , la  $Y_{M,x}$  resultante puede ser como máximo del 50% de la admitancia total, aplicándose la corrección (III.93) en caso de ser incumplida dicha condición:

$$\text{si } (Y_{M,x} > Y_{L,x} / 2) \Rightarrow Y_{M,x} = Y_{L,x} / 2 \quad (\text{III.93})$$

- 8) Calcular la tensión en el punto de falta ( $V_{f,a}$ ,  $V_{f,b}$  y  $V_{f,c}$ ) del nodo F, aplicando la expresión siguiente.

$$\begin{bmatrix} V_{f,a} \\ V_{f,b} \\ V_{f,c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{M,a} \\ V_{M,b} \\ V_{M,c} \end{bmatrix} - d \cdot \begin{bmatrix} Z_{Laa} & Z_{Lab} & Z_{Lac} \\ Z_{Lba} & Z_{Lbb} & Z_{Lbc} \\ Z_{Lca} & Z_{Lcb} & Z_{Lcc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I'_{M,a} \\ I'_{M,b} \\ I'_{M,c} \end{bmatrix} \quad (\text{III.94})$$

- 9) Calcular aplicando (III.95) la matriz de reactancia capacitiva asociada al extremo de la línea ( $X_{C,N}$ ).

$$\left[ X_{C,N} \right] = \left[ (L-d) \cdot Y_{L,x} \right]^{-1} \quad (\text{III.95})$$

- 10) Calcular aplicando (III.96) la impedancia agrupada de carga, línea y admitancia capacitiva en derivación agrupada ( $Y_{Ld \text{ eq}}$ ). Donde  $Z_L$  representa la matriz de impedancia distribuida de la línea ( $\Omega/m$ ) y  $Z_{Ld}$  representa la carga.

$$Y_{Ld \text{ eq}} = \left\{ \left( (L-d) \cdot [Z_L] + [Z_{Ld}] \right) / \left( [X_{C,N}] \right) \right\}^{-1} \quad (\text{III.96})$$

- 11) En base a esta nueva admitancia de carga equivalente, recalculamos la corriente por esta según (III.97) donde utilizamos la tensión calculada en el paso 9:

$$[I_{Ld}] = [Y_{Ld \text{ eq}}] \cdot [V_f] \quad \text{(III.97)}$$

- 12) Recalculamos aplicando (III.87) un nuevo valor de la corriente  $I_{Cap}$ .
- 13) Recalculamos aplicando (III.86) un nuevo valor de la corriente de falta  $I_{f,x}$  en base a los nuevos valores de corriente  $I_{Ld}$  (paso 11) y  $I_{Cap}$  (paso 12).
- 14) Reestimamos la posición de la falta ( $d$ ), aplicando según el caso (III.82) para faltas simples “1-g” o (III.90) para faltas trifásicas “1-1-1-g”.

Revisamos la convergencia de la posición  $d$  según la expresión (III.98), en caso de que el error sea todavía mayor al deseado, repetimos desde el paso 7. En este sentido un error de 0.1%, es propuesto como una buena opción.

$$|d(n) - d(n-1)| < \delta \quad \text{(III.98)}$$

### Extensión a topologías radiales

En lo que se refiere a su extensión a sistemas radiales, este método sigue la misma filosofía que el método anterior, subdividiendo el problema en distintos “campos posible de flujo energético” o PFP, resolviendo el problema para cada uno de ellos. Por otro lado, a pesar que este método está orientado a redes subterráneas, es compatible con otro tipo de redes aéreas (asumiendo que la capacidad en derivación será despreciable) o con la combinación de otros métodos, siendo este hecho un factor muy interesante para resolver redes mixtas.

#### III.1.1.2. Problemática típica asociada a esta familia de métodos

Como se ha comentado lo largo del apartado III.1.1, los métodos de localización basados en el cálculo de la impedancia aparente son, en términos generales, una buena herramienta para determinar el punto de falta. Sin embargo, esta familia de métodos también presenta problemas o limitaciones.

El principal problema que se encuentra en estos métodos es su imposibilidad de medir en sistemas donde el flujo energía no es radial (flujos bidireccionales típicos en los esquemas de redes *Smart Grids*, donde hay un importante presencia de DG). No obstante, aunque el sistema sobre el que se aplique sea radial, estos métodos también plantean otros inconvenientes como la múltiple estimación, errores relacionados con la calidad del modelo utilizado o limitaciones con la cantidad o calidad de magnitudes necesarias para su aplicación. Una explicación detallada de estos problemas podemos encontrarla en los siguientes apartados:

### ***III.1.1.2.1. Problemas asociados a flujos energéticos bidireccionales***

Este problema es inherente al principio de funcionamiento en el que se basa este tipo de técnicas, y el cual consiste en medir la impedancia aparente, vista desde un único punto, para luego comparar esta (en base a un modelo de línea) con un posible camino a lo largo de la línea, cuya impedancia es equivalente a la calculada. Sin embargo, con la inclusión de DG, la impedancia calculada no depende únicamente de la posición de la falta, dependiendo ahora de la posición y cantidad de energía inyectada en cada punto (datos no disponibles en esta familia de técnicas). Concluyéndose que no es posible la aplicación de esta familia de técnicas en casos con presencia de DG.

### ***III.1.1.2.2. Problema de múltiple estimación de la localización***

El problema de la múltiple estimación, al igual que sucedía con el apartado anterior, está asociado directamente al principio de funcionamiento de esta familia de técnicas (cálculo de la impedancia o reactancia, vista desde un único punto), y consiste en una indeterminación a la hora de identificar el punto real donde se originó la falta, ya que en un sistema de distribución (típicamente muy ramificados) pueden existir más de un punto que respondan a un mismo valor de impedancia (asociados a distintos caminos a lo largo de la línea). No obstante, para solucionar este problema existen trabajos que plantean aprovechar la información asociada a los equipos de campo previamente ya instalados (ej.: [82]). Otro enfoque consiste en añadir nuevos elementos inteligentes que aporten más información. Como ejemplo de este enfoque se destacan, un trabajo [70] que plantea desplegar IEDs, a lo largo de la red, para analizar la variación (o huecos) de tensión asociados a la falta, u otra implementación [83] que plantea el despliegue de FCIs para determinar el camino de la falta (en ambos casos, se plantea como optimizar el número de IEDs). Sin embargo, estos planteamientos se alejan del principio básico de la familia de métodos estudiados en este apartado, y que se basan en utilizar un único punto de medida.

En este sentido, son bastantes los trabajos que en los últimos años han planteado el uso de técnicas de inteligencia computacional para resolver este problema utilizando únicamente las medidas de tensión y corriente registradas en el comienzo de la línea. No obstante, no hay que confundir estos métodos, con los basados en el análisis de componentes armónicas (ver apartado III.2). Estos métodos localizan la falta, aplicando las técnicas de impedancia aparente, y únicamente utilizan esta información complementaria para solucionar el problema de la múltiple estimación, dividiendo la línea en zonas (asociadas cada una a distintas ramas), y estimando en cuál de ellas se encuentra realmente la falta.

Un ejemplo de este enfoque puede verse en la bibliografía[84], donde los autores plantean el uso de algoritmos de aprendizaje LAMDA (*Learning Algorithm for Multivariate Data Analysis*), para clasificar o agrupar hasta dieciocho características (valores instantáneos, máximos, mínimos, medidos, desviaciones estándar de parámetros tales como incrementos de corriente o huecos de tensión), determinando la mejor combinación de estas características. Esto permite una vez realizada la localización mediante un método de impedancia aparente, utilizar estas características para identificar la zona afectada.

Otro ejemplo de esto[78], propone utilizar un sistema experto, con reglas que permiten identificar la zona afectada, relacionando los patrones de corriente registrados durante las reconexiones con la acciones de los distintos elementos de protección ubicados en la línea.

Algunos autores proponen como alternativa el uso de redes neuronales ANN. Concretamente[85] plantea el uso de diez ANNs, una por cada tipo de falta (A-g, B-g, C-g, AB-g, BC-g, AC-g, AB, BC, AC o ABC-g), utilizando como características la resistencia de falta (calculada por el método de localización), y magnitudes asociadas a las fases afectadas, tales como: módulos de los fasores de corriente y tensión, desfase entre éstos, relación entre los módulos de las magnitudes complejas del 1<sup>er</sup> y 3<sup>er</sup> armónico de corriente y la relación entre el desfase de tensión y corriente del 1<sup>er</sup> y 3<sup>er</sup> armónico.

Se ha creído interesante destacar también otro trabajo[86], donde como características de entrada se plantean utilizar las variaciones en la potencia aparente ( $\Delta S$ ), y en los fasores de corriente ( $\Delta I$ ) y tensión ( $\Delta V$ ), tanto en sus magnitudes de fase como de línea. Como método de clasificación sus autores proponen una primera aproximación mediante un algoritmo simple de K-vecinos más cercanos (*k-Nearest Neighbors*, k-NN), con el que ya se obtiene buenos resultados. Una vez validada la capacidad de clasificación usando las características propuestas, los autores proponen la aplicación de un algoritmo SVM, menos restrictivo, y que proporciona mejores resultados.

Por último, aunque con un enfoque ligeramente distinto, se ha creído interesante destacar otro enfoque[87], donde los autores más que resolver el problema de la múltiple estimación, plantean únicamente un método para identificar la sección bajo falta (no la localización exacta), aplicando un reconocimiento de patrones, únicamente utilizando como características la variación y el desfase que se produce en la tensión cuando aparece la falta. Este trabajo plantea aplicar una búsqueda, comparando estas características con los valores simulados asociados a los nodos de entrada y salida de cada sección (vista desde el punto de medida), y previamente

almacenadas en una base de datos. Una vez determinadas las posibles secciones donde se encuentra la falta, y asumiendo que en tramos cortos la variación de las dos características en función de la posición de la falta es lineal, se calcula la proyección de la medida sobre cada posible solución. Finalmente ordenando las soluciones de menor a mayor según este criterio, se obtiene una lista donde el primer elemento es el que se plantea como la estimación más probable. Posteriormente, estos mismos autores presentan dos mejoras. Una en la que también se calcula la posición dentro de la sección estimada[88] y otra donde se subdivide el proceso de búsqueda[89], incluyéndose la información de tipo de falta como entrada.

### ***III.1.1.2.3. Problema de falta de calidad en el modelo o en las medidas***

Otro problema que presentan estos métodos, es su fuerte sensibilidad a los errores asociados a los modelos aplicados, así como a los errores en sus parámetros de entrada. Obviamente, dichos errores condicionan bastante al resultado, aumentando considerablemente el error en la localización.

Atendiendo a la calidad del modelado, no es fácil solucionar el problema. El modelo de una línea está fuertemente condicionado al conocimiento que se disponga de éstas, a través de las bases de datos del DSO. No obstante, como alternativa para mejorar los resultados encontramos[90], que plantean en base a la topología del modelo y dependiendo del tipo de falta, aprovechar la redundancia existente en los circuitos para replantear el modelo a través de diferentes expresiones, resolviendo la localización con cada una de ellas y promediando los resultados para aumentar la precisión de la estimación. En este sentido también es interesante plantear un método de localización generalizado[91], independiente del tipo de falta, evitando así un error en la localización derivado de una mala identificación del tipo de falta.

Con respecto a la calidad en la medida, ésta depende directamente de la instrumentación desplegada. Una de las principales ventajas de estos métodos, es que su necesidad de datos de entrada era directamente compatible con la información suministrada por los elementos de protección ubicados al comienzo de línea. Sin embargo, como se ha comentado varias veces en este trabajo, actualmente el nivel de automatización en la red de distribución es mucho menor que el de la red de transporte. Concretamente, es bastante habitual encontrar situaciones en la que la línea de distribución, únicamente está protegida por un relé basado en medidas de corriente (no suministrando medidas de tensión), imposibilitando la aplicación directa de este tipo de métodos. En este sentido, en la literatura han sido propuestas algunas soluciones que pretenden paliar esta escasez de información. Como ejemplo destacado se presenta[92][93], donde los autores proponen un método que utiliza el



fenómeno indeseables de las corrientes de conexión (o *Inrush current*) para completar la información de tensión necesaria en los métodos de esta familia.

### III.1.1.3. Resumen de los métodos basados en esta técnica

Como se ha podido observar, existen en la literatura una amplia variedad de métodos basados en la estimación de la impedancia aparente, vista desde un único terminal. Un ejemplo de esta variedad lo encontramos en la revisión[94] que realiza una resumen de distintos métodos basados en esta técnica. En este sentido, lo largo del apartado III.1.1.1 ha sido realizado un exhaustivo análisis de distintos enfoques y métodos basados en el cálculo de la impedancia aparente, medidas en un terminal. Un resumen con sus características puede observarse en la Tabla III.5. Así pues, este análisis ha sido completado con una revisión de los problemas típicos asociados a estos, y para los cuales se han analizado algunas de las soluciones más habituales planteadas en la literatura.

Sin embargo, a la hora de comparar los resultados de estos métodos, surge la imposibilidad de comparar resultados, ya que sus autores expresan la bondad de cada método utilizando un modelo de línea de distribución distinto. En este sentido, merece la pena destacar[95], donde sus autores también realizan una exhaustiva comparación entre distintos métodos, estudiando tanto sus resultados (calculados por simulación sobre un mismo sistema), así como sus necesidades de datos y características. En esta comparativa, sus autores valoran al método de Das *et al.*[73]

		Método de la componente reactiva (ver apartado III.1.1.1.1)	Método de Girgis et al. (ver apartado III.1.1.1.2)	Método de Das et al. (ver apartado III.1.1.1.3)	Método de Novosel et al. (ver apartado III.1.1.1.4)	Método de Choi et al. (ver apartado III.1.1.1.5)	Método de Lee et al. (ver apartado III.1.1.1.6)	Método de Salim et al. (ver apartado III.1.1.1.7)	Método de Filomena et al. (ver apartado III.1.1.1.8)
<b>Información necesaria (fasos V e I)</b>	Prefalta	-	√	√	√	√	√	√	√
	Falta	√	√	√	√	√	√	√	√
<b>Tipo de análisis*</b>		0,+,-	0,+,-	0,+,-	0,+,-	a,b,c	a,b,c	a,b,c	a,b,c
<b>Compatibilidad con tipo de falta</b>		"l-g"	todas	todas	todas	"l-g"	"l-g"	todas	"l-g" y "l-l-g"
<b>Compatible con topologías radiales</b>		-	√	√	-	-	√	√	√
<b>Tipo modelo de carga</b>		-	cte.	f(V)	cte.	cte.	f(V)	f(V)	f(V)
<b>Compatible con sistemas desbalanceados</b>		-	-	√	-	√	√	√	√

\* Nota: 0,+,-: basado en componentes simétricas, a,b,c: basado en análisis directo.

Tabla III.5: Comparativa entre mét. de impedancia aparente en un terminal.

(ver apartado III.1.1.1.3) como el mejor de los analizados. No obstante, también cuestionan la necesidad de aplicar métodos tan complejos, ya que otros de menor complejidad (como el método de la componente reactiva[71], ver apartado III.1.1.1.1, o el método de Novosel *et al.*[75], ver apartado III.1.1.1.4), también obtienen buenos resultados, siendo también una solución válida para resolver el problema de la localización de faltas. En este sentido, es interesante destacar como el error de este tipo de métodos aumenta considerablemente con el valor de la resistencia de falta. Además, no hay que olvidar el gran inconveniente de que estos métodos no resultan aplicables en sistemas con generación distribuida.

Por todo esto, a pesar de que los sistemas de localización basados en el cálculo de la impedancia aparente estimada desde un punto son unos de los métodos más extendidos (al no requerir una instrumentación compleja), el hándicap de su incompatibilidad con los futuros esquemas de distribución (con una fuerte presencia de DG) las hace insuficientes, teniendo que dejar lugar a las nuevas tendencias o técnicas compatibles con esta característica.

### III.1.2. Técnicas basadas en componentes fundamentales en dos o más terminales

Como su nombre indica, al igual que sucedía con los métodos anteriormente descritos, estos también se basan en operaciones sobre componentes fundamentales o fasores de tensión y corriente. La principal diferencia, es que en este conjunto de métodos, ahora si se dispone de información en más de un punto de la línea (típicamente en sus extremos, ver Figura III.15, nodos X e Y). Tradicionalmente, este tipo de técnicas han sido aplicadas a líneas de transporte, que como ya se ha comentado varias veces presentan una mayor longitud y topologías más simples que las líneas de distribución.

La principal ventaja de aumentar número de puntos de información, es que se añade la capacidad de conocer toda la energía inyectada/extraída a la red, permitiéndose así analizar las faltas en un entorno con generación distribuida y conociéndose en todo momento las cargas conectadas a la red. Así pues, la capacidad de conocer las

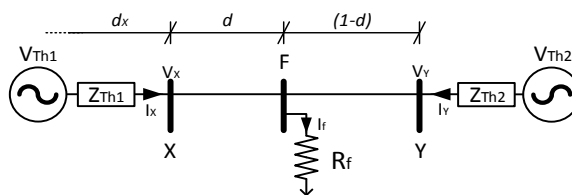


Figura III.15: Esquema simplificado de una línea de distribución en falta.  
(en F, entre los nodos X y Y)

corrientes y tensiones de múltiples puntos (en distintas ramas) de la línea, evita los problemas de múltiple estimación, típicos en los métodos de un terminal. Otra característica muy interesante de este conjunto de técnicas se basa en que, al disponer de una información de la falta (vista desde distintos puntos), es posible aprovechar dicha redundancia, para desacoplar el problema de la localización ( $d$ ) de los cálculos propios del circuito de falta ( $I_f$ ,  $R_f$ , etc.), consiguiendo mayor robustez, minimizando los efectos y errores derivados de estos, típicos en métodos de un terminal (ej.: errores con  $R_f$  es elevada). En contrapartida, el uso de múltiples puntos de medida plantea nuevos retos tecnológicos, ya que como se verá más adelante, estas medidas han de estar sincronizadas para poder ser agregadas.

En los apartados siguientes se realizará una revisión detallada de los métodos más relevantes propuestos en la literatura. No obstante, la problemática típicamente asociada a esta familia de métodos será analizada en el apartado III.1.2.2, revisando las soluciones propuestas en la literatura en este sentido.

### III.1.2.1. Revisión de los métodos más destacados basados en esta técnica

Dentro de los métodos de localización de faltas basados en el cálculo mediante componentes fundamentales, en dos o más terminales, se pueden destacar:

#### **III.1.2.1.1. Método de Girgis(2) et al.**

Este método fue presentado por Girgis *et al.*[96] y propone un análisis directo sobre las componentes trifásicas para localizar una falta en una red simple (dos terminales) o en una red con una bifurcación (tres terminales), independientemente del tipo de falta. El método es propuesto para medidas sincronizadas, planteando el uso de un método de sincronización si ésta fuese necesario.

#### Análisis de línea simple (dos terminales)

Este análisis se basa en analizar las mallas vistas desde cada extremo del circuito (ver Figura III.16), expresando la impedancia distribuida de la línea como  $Z_{abc}$ :

$$V_{abc1} = V_{F_{abc}} + d \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc1} \quad \text{(III.99)}$$

$$V_{abc2} = V_{F_{abc}} + (L - d) \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc2} \quad \text{(III.100)}$$

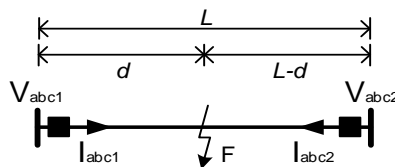


Figura III.16: Modelo simplificado de línea en condición de falta (mét. Girgis(2) et al.).

Restando (III.99) y (III.100), es posible obtener:

$$V_{abc1} - V_{abc2} + L \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc2} = d \cdot Z_{abc} \cdot (I_{abc1} + I_{abc2}) \quad (III.101)$$

Esta expresión puede ser reescrita como de forma matricial según:

$$\begin{matrix} Y \\ \begin{bmatrix} Y_a \\ Y_b \\ Y_c \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{matrix} M \\ \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \end{matrix} \cdot d \quad (III.102)$$

Donde:

$$\left. \begin{aligned} Y_j &= V_{j,1} - V_{j,2} + L \cdot \sum_{i=a,b,c} (Z_{ji} \cdot I_{i,2}) \\ M_j &= \sum_{i=a,b,c} [Z_{ji} \cdot (I_{i,1} + I_{i,2})] \end{aligned} \right\} j = a, b, c$$

Este sistema de ecuaciones puede resolverse aplicando la siguiente expresión, donde  $M^*$  representa la matriz transpuesta conjugada de  $M$ .

$$d = (M^* \cdot M)^{-1} \cdot M^* \cdot Y \quad (III.103)$$

Es interesante destacar que este procedimiento es independiente del tipo de falta, que puede ser posteriormente identificada a través de la tensión y corriente en el punto de falta:

$$V_{Fabc} = V_{abc1} - d \cdot Z_{abc} \cdot I_{abc1} \quad (III.104)$$

$$I_{Fabc} = I_{abc1} + I_{abc2} \quad (III.105)$$

### Análisis de línea con bifurcación (tres terminales).

El análisis es extendido a líneas con una bifurcación, donde pueden darse tres situaciones, cada una de ellas asociada a la posibilidad de que la falta esté en cada sección (ver Figura III.17). Tomando como ejemplo el caso "a" en que esté en línea 1, siguiendo el razonamiento del apartado anterior, se ha de plantear las distintas mallas del circuito. Este planteamiento sería análogo en los otros dos casos.

$$V_{abc1} = V_{Fabc} + d \cdot Z_{abc1} \cdot I_{abc1} \quad (III.106)$$

$$V_{abc2} = V_{Fabc} + L_2 \cdot Z_{abc2} \cdot I_{abc2} + (L_1 - d) \cdot Z_{abc1} \cdot (I_{abc2} + I_{abc3}) \quad (III.107)$$

$$V_{abc3} = V_{Fabc} + L_3 \cdot Z_{abc3} \cdot I_{abc3} + (L_1 - d) \cdot Z_{abc1} \cdot (I_{abc2} + I_{abc3}) \quad (III.108)$$

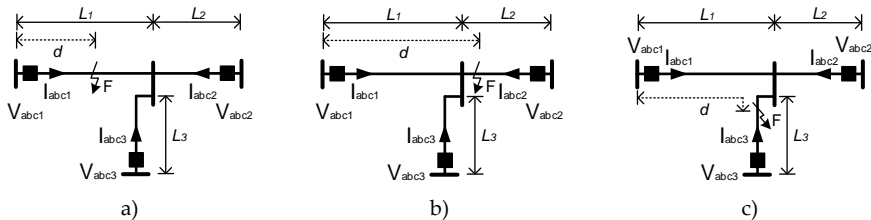


Figura III.17: Modelo de línea con bifurcación en cond. de falta (mét. Girgis(2) et al.).  
a) falta en segmentos 1, b) falta en segmentos 2, c) falta en segmentos 3.

Si eliminamos la tensión de falta, restando (III.107) a (III.106), podemos expresar el resultado de forma matricial:

Donde:

$$\begin{bmatrix} Y1_a \\ Y1_b \\ Y1_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \cdot d \quad \text{(III.109)}$$

$$Y1_j = V_{j,1} - V_{j,2} + \sum_{k=a,b,c} [(L_1 \cdot Z_{jk,1} + L_2 \cdot Z_{jk,2}) I_{k,2}] + L_1 \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_{jk,1} \cdot I_{k,2})$$

$$M_j = \sum_{k=a,b,c} [(I_{k,1} + I_{k,2} + I_{k,3}) \cdot Z_{jk,1}]$$

} j = a, b, c

En base a esto, es posible calcular  $d$ , según:

$$d = (M^* \cdot M)^{-1} \cdot M^* \cdot Y1 \quad \text{(III.110)}$$

Este mismo razonamiento puede hacerse restando (III.108) a (III.106), obteniendo otra solución de la posición de la falta:

Donde:

$$\begin{bmatrix} Y2_a \\ Y2_b \\ Y2_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} \cdot d' \quad \text{(III.111)}$$

$$Y2_j = V_{j,1} - V_{j,3} + \sum_{k=a,b,c} [(L_1 \cdot Z_{jk,1} + L_3 \cdot Z_{jk,3}) I_{k,3}] + L_1 \cdot \sum_{k=a,b,c} (Z_{jk,1} \cdot I_{k,3})$$

} j = a, b, c

$$d' = (M^* \cdot M)^{-1} \cdot M^* \cdot Y2 \quad \text{(III.112)}$$

Una vez calculados estas dos soluciones, podemos determinar la sección afectada según:

- Si  $d < L_1$  y  $d' < L_1$ , las falta estará presente en la sección 1 (según Figura III.17a).
- Si  $d < L_1$  y  $d' = L_1$ , las falta estará presente en la sección 2 (según Figura III.17b)
- Si  $d = L_1$  y  $d' < L_1$ , las falta estará presente en la sección 3 (según Figura III.17c)

### III.1.2.1.2. Método de Novosel(2) et al.

Este trabajo fue presentado por Novosel *et al.*[97], y plantea un método de localización basado en el estudio de las componentes de red de secuencia, asociadas a medidas (no sincronizadas) en los dos extremos de una línea simple, sin cargas distribuidas a lo largo de ésta (ver Figura III.18). La sincronización se realiza estimando el desfase entre estas medidas.

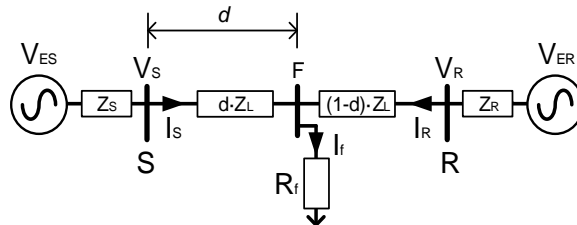


Figura III.18: Modelo simplificado de línea en condición de falta (mét. Novosel(2) et al.).

Básicamente, este análisis consiste en evaluar la tensión en el nodo de falta (F), analizando las mallas a cada lado de ésta (ver Figura III.18), y donde  $Z_L$  representa la impedancia de la línea completa.

$$V_F = V_S - d \cdot Z_L \cdot I_S \quad (\text{III.113}) \quad V_F = V_R - (1-d) \cdot Z_L \cdot I_R \quad (\text{III.114})$$

Igualando las expresiones (III.113) y (III.114), se obtiene:

$$V_S - V_R + Z_L \cdot I_R = d \cdot Z_L \cdot (I_S + I_R) \quad (\text{III.115})$$

Sin embargo los registros de tensión y corriente asociados a cada extremo, pueden no estar sincronizados. Asumiendo  $\alpha_S$  y  $\beta_R$  los ángulos de los fasores de tensión medios, podemos usar  $\delta$  para representar el desfase entre ambos:

$$V_S = |V_S| \angle (\alpha_S + \delta) \quad (\text{III.116})$$

$$V_R = |V_R| \angle \beta_R \quad (\text{III.117})$$

Reescribiendo (III.115) como:

$$V_S \cdot e^{j\delta} - V_R + Z_L \cdot I_R = d \cdot Z_L \cdot (I_S \cdot e^{j\delta} + I_R) \quad (\text{III.118})$$

Dicha ecuación compleja puede analizarse como parte real e imaginaria, según:

$$\begin{aligned} \text{Re}[V_S] \cdot \sin(\delta) + \text{Im}[V_S] \cdot \cos(\delta) - \text{Im}[V_R] + C_4 = \\ = d \cdot (C_1 \cdot \sin(\delta) + C_2 \cdot \cos(\delta) + C_4) \end{aligned} \quad (\text{III.119})$$

$$\begin{aligned} \text{Re}[V_S] \cdot \cos(\delta) - \text{Im}[V_S] \cdot \sin(\delta) - \text{Re}[V_R] + C_3 = \\ = d \cdot (C_1 \cdot \cos(\delta) - C_2 \cdot \sin(\delta) + C_3) \end{aligned} \quad (\text{III.120})$$

Donde:

$$C_1 = \text{Re}[Z_L] \cdot \text{Re}[I_S] - \text{Im}[Z_L] \cdot \text{Im}[I_S] \quad (\text{III.121}) \quad C_3 = \text{Re}[Z_L] \cdot \text{Re}[I_R] - \text{Im}[Z_L] \cdot \text{Im}[I_R] \quad (\text{III.122})$$

$$C_2 = \text{Re}[Z_L] \cdot \text{Im}[I_S] + \text{Im}[Z_L] \cdot \text{Re}[I_S] \quad (\text{III.123}) \quad C_4 = \text{Re}[Z_L] \cdot \text{Im}[I_R] + \text{Im}[Z_L] \cdot \text{Re}[I_R] \quad (\text{III.124})$$

En base a estas expresiones, si se divide (III.119) entre (III.120), es posible obtener una expresión que únicamente depende de  $\delta$ .

$$a \cdot \sin(\delta) + b \cdot \cos(\delta) + c = 0 \quad (\text{III.125})$$

Donde:

$$a = -C_3 \cdot \text{Re}[V_S] - C_4 \cdot \text{Im}[V_S] - C_1 \cdot \text{Re}[V_R] - C_2 \cdot \text{Im}[V_R] + C_1 \cdot C_3 + C_2 \cdot C_4 \quad (\text{III.126})$$

$$b = C_4 \cdot \text{Re}[V_S] - C_3 \cdot \text{Im}[V_S] - C_2 \cdot \text{Re}[V_R] + C_1 \cdot \text{Im}[V_R] + C_2 \cdot C_3 - C_1 \cdot C_4 \quad (\text{III.127})$$

$$c = C_2 \cdot \text{Re}[V_S] - C_1 \cdot \text{Im}[V_S] - C_4 \cdot \text{Re}[V_R] + C_3 \cdot \text{Im}[V_R] \quad (\text{III.128})$$

Para la resolución de (III.125), este trabajo plantea utilizar el método iterativo de Newton-Raphson, según (III.129). Como valor inicial supondremos un  $\delta_0 = 0$ , siendo una precisión aceptable  $\delta_{k+1} - \delta_k = 10^{-4}$ :

$$\delta_{k+1} = \delta_k + \frac{F(\delta_k)}{F'(\delta_k)} \quad (III.129) \quad \begin{aligned} F(\delta_k) &= b \cdot \cos(\delta_k) + a \cdot \sin(\delta_k) + c & (III.130) \\ F'(\delta_k) &= a \cdot \cos(\delta_k) - b \cdot \sin(\delta_k) & (III.131) \end{aligned}$$

Una vez determinado  $\delta$ , podemos determinar la posición de la falta utilizando (III.119) y (III.120), según:

$$d = \frac{\text{Re}[V_S] \cdot \sin(\delta) + \text{Im}[V_S] \cdot \cos(\delta) - \text{Im}[V_R] + C_4}{C_1 \cdot \sin(\delta) + C_2 \cdot \cos(\delta) + C_4} \quad (III.132)$$

Sin embargo para la resolución de esta expresión, así como de las anteriores, para evitar su dependencia del tipo de falta, se plantea su resolución aplicando tensiones y corrientes de secuencia. Concretamente, se plantea el uso de las componentes positiva o negativa, la componente de cero es no recomendada debido a su incertidumbre en los parámetros asociados a esta componente. Las componentes de secuencia negativa pueden aplicarse a todas las faltas desequilibradas. Sin embargo, en faltas trifásicas (equilibradas) únicamente son útiles las componentes positivas.

Este método ha sido testado para valores de resistencia de falta elevada y para valores reducidos de tensión en terminales y falta, obteniéndose buenos resultados en ambos casos, aunque con pequeñas desviaciones en los valores de secuencia positiva (donde la corriente de carga puede degradar la sensibilidad algoritmo). Este problema es menor analizando la componente negativa (donde la carga de secuencia negativa es a menudo insignificante). Sin embargo, como el objetivo es localizar cualquier tipo de falta, en este trabajo se propone aplicar la componente positiva.

### III.1.2.1.3. Método de Liu et al.

Este método fue presentado por Liu *et al.*[98], y describe un algoritmo de localización de faltas, basado en medidas sincronizadas en dos terminales, aplicado sobre líneas compuestas por múltiples secciones (pudiendo combinar tramos aéreos y subterráneos, ver Figura III.19). No obstante, este trabajo está orientado a líneas de transporte (sin cargas conectadas a lo largo de ésta). Este método se basa en analizar todas las secciones, suponiendo la falta en cada una de éstas. Aplicando posteriormente un análisis de la posición obtenida para cada uno de estos análisis, identificando con estos la sección bajo falta el tramo bajo falta.

Considerando una falta en la sección K (ver Figura III.19), el primer paso es determinar la tensión y corriente en los extremos de esta sección (puntos  $P_{KR}$  y  $P_{KS}$ ). Para esto, basándose en un modelo de línea larga de cada sección, se aplicará un análisis en componentes de secuencia positiva, según (III.133) y (III.134).

$$\begin{bmatrix} V_{PK,R} \\ I_{PK,R} \end{bmatrix} = \left( \prod_{m=1}^{K-1} T_{R(K-m)} \right) \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (III.133) \quad \begin{bmatrix} V_{PK,S} \\ I_{PK,S} \end{bmatrix} = \left( \prod_{m=K+1}^N T_{R(K-m)} \right) \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \quad (III.134)$$

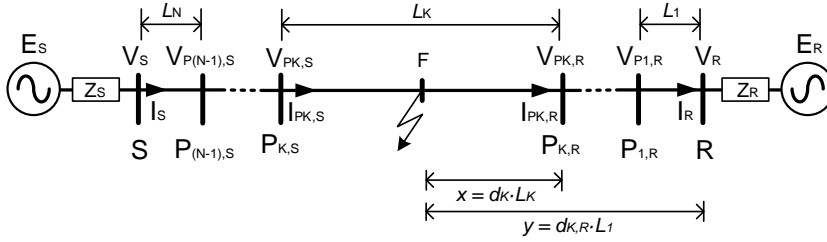


Figura III.19: Modelo simplificado de línea en falta, con varias secciones (mét. Liu et al.).

$T_{Sm}$  y  $T_{Rm}$ , son calculadas mediante (III.135) y (III.136), donde  $L_m$  representa la longitud,  $Z_{c,m}$  es la impedancia de secuencia positiva característica por unidad de longitud y  $\Gamma_m$  es la constante de propagación, todas éstas asociadas a la sección  $m$ .

$$T_{Rm} = \begin{bmatrix} \cosh(\Gamma_m \cdot L_m) & Z_{c,m} \cdot \sinh(\Gamma_m \cdot L_m) \\ \frac{\sinh(\Gamma_m \cdot L_m)}{Z_{c,m}} & \cos(\Gamma_m \cdot L_m) \end{bmatrix} \quad (III.135)$$

$$T_{Sm} = \begin{bmatrix} \cosh(\Gamma_m \cdot L_m) & -Z_{c,m} \cdot \sinh(\Gamma_m \cdot L_m) \\ \frac{-\sinh(\Gamma_m \cdot L_m)}{Z_{c,m}} & \cos(\Gamma_m \cdot L_m) \end{bmatrix} \quad (III.136)$$

$$Z_{c,m} = \sqrt{Z_m / Y_m} \quad ; \quad \Gamma_m = \sqrt{Z_m \cdot Y_m}$$

Siguiendo el mismo enfoque, y calculando la tensión del punto de falta visto desde ambos extremos, es posible determinar la posición relativa  $d_K$ , dentro del segmento  $K$ , según:

$$d_K = \frac{\ln\left(\frac{N_K}{M_K}\right)}{2 \cdot \Gamma_K \cdot L_K} \quad (III.137)$$

Donde:

$$N_K = \frac{1}{2}(V_{PK,R} - Z_{C,K} \cdot I_{PK,R}) - \frac{1}{2}(V_{PK,S} - Z_{C,K} \cdot I_{PK,S}) e^{(\Gamma_K \cdot L_K)} \quad (III.138)$$

$$M_K = \frac{1}{2}(V_{PK,S} + Z_{C,K} \cdot I_{PK,S}) e^{(-\Gamma_K \cdot L_K)} - \frac{1}{2}(V_{PK,R} + Z_{C,K} \cdot I_{PK,R}) \quad (III.139)$$

Esta distancia también se puede expresar referido a uno de los extremos (nodo R), agregándole la distancia entre este punto y el comienzo de la sección K:

$$d_{K,R} = \frac{\ln\left(\frac{N_K}{M_K}\right)}{2 \cdot \Gamma_K \cdot L_1} + \frac{\sum_{i=1}^{K-1} L_i}{L_1} \quad (III.140)$$

Analizando los índices  $d_K$  para cada sección es posible identificar el tramo afectado, cuando alguno de estos índices esté comprendido en el intervalo  $[0,1]$ . Una vez determinado este segmento la posición de la falta ( $y$ ) referida a uno de los extremos de la línea, puede calcularse según:

$$y = d_{K,R} \cdot L_1 \quad (III.141)$$



### III.1.2.1.4. Método de Pereira et al.

Este método fue presentado por Pereira *et al.*[99] y propone un procedimiento de localización de faltas basado en el análisis de la propagación de la caída de tensión (con diferente módulo y fase), en una línea de distribución en un caso de falta. Este método utiliza la información fasorial de tensión y corriente en cabecera (antes y durante la falta) y distintas medidas (durante la falta) del módulo de la tensión, repartidas por algunos nodos de la instalación. Analizando varias veces la red (suponiendo en cada análisis la falta ubicada en un punto), se compara la desviación entre la tensión calculada y medida en los nodos con medida, determinando así el nodo bajo falta. Este método no proporciona una posición exacta, únicamente identifica una posición asociada a uno de los nodos analizados. Para este método es necesario estudiar previamente:

#### Modelado de la carga

Este método propone un modelo basado en (III.142), donde  $S^{nom}$  representa la potencia nominal compleja,  $V$  la tensión aplicada a la carga y  $V_{nom}$  es la tensión nominal de la carga. Además  $\alpha$  representa la proporción de la carga con comportamiento a potencia constante,  $\delta$  con comportamiento a corriente constante y  $\beta$  a impedancia constante (y donde  $\alpha+\beta+\delta=1$ ).

$$S = \alpha \cdot S^{nom} + \delta \cdot S^{nom} \left( \frac{|V|}{|V_{nom}|} \right) + \beta \cdot S^{nom} \left( \frac{|V|}{|V_{nom}|} \right)^2 \quad (III.142)$$

Sin embargo la estimación real de la carga es una importante fuente de error en la localización de faltas. Siendo así, este método propone definir un cálculo iterativo de (III.143) para la estimación de dichas cargas, donde  $S_i^{nom}$  es la potencia aparente y  $\lambda_i$  la carga media del transformador  $i$ .  $nt$  representa el número total de transformadores. Finalmente  $\cos(\phi_m)$  representa el factor de potencia registrado en cabecera.

$$S_i = \lambda_i \cdot S_i^{nom} \cdot \frac{S_{est}}{\sum_{k=1}^{nt} \lambda_k \cdot S_k^{nom}} \cdot [\cos(\phi_m) + j \cdot \sin(\phi_m)] \quad (III.143)$$

La medida de cabecera no puede ser aplicada directamente en (III.143), ya que éste agrupa consumos y pérdidas. Este método plantea el uso de un algoritmo iterativo basado en los datos anteriores a la situación de falta, y cuyos pasos son:

- 1) Calcular el valor inicial de cada transformador, aplicando (III.143), utilizando como  $S_{est}$  el valor del registro de potencia compleja medido en cabecera.
- 2) Realizar un análisis del flujo de carga (según el algoritmo descrito más adelante), suponiendo que inicialmente la tensión aplicada en cada nodo es igual a la tensión registrada en cabecera.

- 3) Evaluar el criterio de convergencia según (III.144) y (III.145), en caso de cumplirse, se tomarán como resultado los valores obtenidos de (III.143) para esa iteración. En caso contrario se continuará con el paso siguiente.

$$\left| \operatorname{Re} \left[ I_m^{med} \right] - \operatorname{Re} \left[ I_m^{calc} \right] \right| \leq \varepsilon \quad \text{(III.144)}$$

$$\left| \operatorname{Im} \left[ I_m^{med} \right] - \operatorname{Im} \left[ I_m^{calc} \right] \right| \leq \varepsilon \quad \text{(III.145)}$$

- 4) Recalcular el nuevo valor de  $S_{est}$ , según:

$$S_m^{k+1} = S_m^{k+1} + \left[ S_m^{med} - S_m^{calc} \right] \quad \text{(III.146)}$$

- 5) Recalcular los valores de potencia compleja asociado a cada transformador, según (III.143), actualizando el valor de  $S_{est}$  con el valor calculado en el paso anterior, y repetir desde el paso 2.

### Cálculo de la corriente de falta

El cálculo de la corriente de falta se realiza mediante (III.147), que calcula ésta restando a la corriente registrada en la cabecera en condición de falta ( $I_m^{f,med}$ ), las corrientes de todas las cargas ( $\sum I_i$ ):

$$I_f = I_m^{f,med} - \sum_{i=1}^{nt} I_i \quad \text{(III.147)}$$

Posteriormente en el análisis del flujo de carga, esta corriente será utilizada como si fuera una carga más, conectada en este nodo.

### Análisis de flujo de carga

Concretamente este método se basa en un algoritmo “*Backward/Forward Sweep Load Flow*” [100]. Considerando la cabecera como nodo de referencia, y en donde la tensión es conocida. Este algoritmo consiste en calcular de forma iterativa las corrientes de las ramas en un barrido hacia atrás (de los extremos de la línea a la subestación) y luego los voltajes de cada nodo en un barrido hacia adelante (de subestación a los extremos), obteniéndose rápidamente resultados gracias a sus buenas características de convergencia y eficiencia en análisis de este tipo de redes.

El algoritmo se repetirá tantas veces como nodos se deseen evaluar, asumiendo para cada una de estas repeticiones, que inicialmente todos los nodos de la línea están alimentados a la tensión registrada en la cabecera de ésta. Este algoritmo consta de los siguientes pasos:

- 1) Cálculo de la corriente asociada a cada carga. Para un cálculo de esta corriente en el nodo  $j$ , basada en la ecuación (III.142), se aplica (III.139), que depende de la tensión estimada en éste, para la iteración anterior. Como valor de potencia  $S_{jx}$ , se aplicará lo definido en los apartados anteriores y en el caso del nodo de

falta que se le ha de sumar ésta corriente. En esta ecuación también se ha añadido el efecto de la admitancia en paralelo de la línea, modelada como una admitancia concentrada mediante  $Y_{jx}$ .

$$\begin{bmatrix} I_{ja}^{(n)} \\ I_{jb}^{(n)} \\ I_{jc}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left( \frac{S_{ja}}{V_{ja}^{(n-1)}} \right)^* & \left( \frac{S_{ja}}{|V_{nom}|} \right)^* \frac{V_{ja}^{(n-1)}}{|V_{ja}^{(n-1)}|} & \left( \frac{V_{ja}^{(n-1)} \cdot S_{ja}}{|V_{nom}|^2} \right) \\ \left( \frac{S_{jb}}{V_{jb}^{(n-1)}} \right)^* & \left( \frac{S_{jb}}{|V_{nom}|} \right)^* \frac{V_{jb}^{(n-1)}}{|V_{jb}^{(n-1)}|} & \left( \frac{V_{jb}^{(n-1)} \cdot S_{jb}}{|V_{nom}|^2} \right) \\ \left( \frac{S_{jc}}{V_{jc}^{(n-1)}} \right)^* & \left( \frac{S_{jc}}{|V_{nom}|} \right)^* \frac{V_{jc}^{(n-1)}}{|V_{jc}^{(n-1)}|} & \left( \frac{V_{jc}^{(n-1)} \cdot S_{jc}}{|V_{nom}|^2} \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \delta \\ \beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{ja}^* & 0 & 0 \\ 0 & Y_{jb}^* & 0 \\ 0 & 0 & Y_{jc}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ja}^{(n-1)} \\ V_{jb}^{(n-1)} \\ V_{jc}^{(n-1)} \end{bmatrix} \quad \text{(III.148)}$$

- 2) Estimación de la corriente de cada sección de línea. Como se ha comentado anteriormente esta corriente se estima recorriendo la línea desde el final hasta el principio (ver ejemplo en Figura III.20), agregando las corrientes de las cargas de cada nodo (calculadas en el paso anterior) y la corriente de falta, en el caso de evaluarse el nodo bajo falta.
- 3) Estimación de las tensiones de cada nodo. Una vez calculadas las corrientes (paso anterior) y aplicando el modelo de cada sección, es posible calcular las tensiones de cada nodo, recorriendo la líneas de principio a fin (ver ejemplo en Figura III.20)
- 4) Análisis de convergencia. En este paso se verificará la convergencia mediante las expresiones (III.149) y (III.150). En caso de no cumplirse, el algoritmo se repetirá desde 1, aplicando los nuevos valores de tensión.

$$\left| \text{Re} \left[ I_m^{f,med} \right] - \text{Re} \left[ I_m^{f,calc} \right] \right| \leq \varepsilon \quad \text{(III.149)}$$

$$\left| \text{Im} \left[ I_m^{f,med} \right] - \text{Im} \left[ I_m^{f,calc} \right] \right| \leq \varepsilon \quad \text{(III.150)}$$

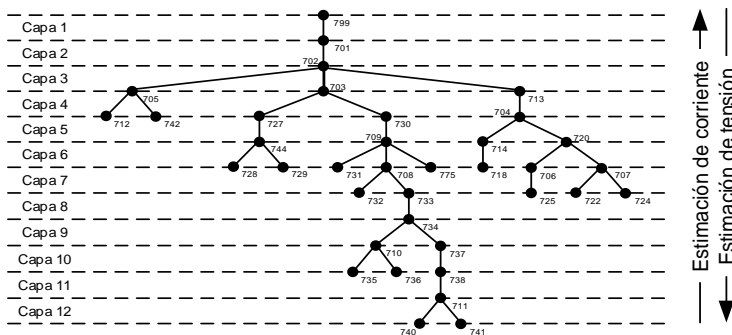


Figura III.20: Estructura jerárquica de capas y nodos de la IEEE 37 Node Test Feeder.

Adicionalmente, en el algoritmo también se propone (III.151), que nos permite estudiar cómo evoluciona la convergencia de cada iteración.

$$\begin{bmatrix} \Delta S_{ja}^{(n)} \\ \Delta S_{jb}^{(n)} \\ \Delta S_{jc}^{(n)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ja}^{(n)} \left( I_{ja}^{(n)} \right)^* \\ V_{jb}^{(n)} \left( I_{jb}^{(n)} \right)^* \\ V_{jc}^{(n)} \left( I_{jc}^{(n)} \right)^* \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Y_{ja}^* |V_{ja}^{(n)}|^2 \\ Y_{jb}^* |V_{jb}^{(n)}|^2 \\ Y_{jc}^* |V_{jc}^{(n)}|^2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} S_{ja} \frac{S_{ja} |V_{ja}^{(n)}|}{|V_{nom}|} & S_{ja} \left( \frac{V_{ja}^{(n)}}{|V_{nom}|} \right)^2 \\ S_{jb} \frac{S_{jb} |V_{jb}^{(n)}|}{|V_{nom}|} & S_{jb} \left( \frac{V_{jb}^{(n)}}{|V_{nom}|} \right)^2 \\ S_{jc} \frac{S_{jc} |V_{jc}^{(n)}|}{|V_{nom}|} & S_{jc} \left( \frac{V_{jc}^{(n)}}{|V_{nom}|} \right)^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \delta \\ \beta \end{bmatrix} \quad (III.151)$$

### Cálculo del índice de localización de faltas

Para valorar la desviación de cada posible configuración de falta con respecto a las medidas tomadas en los distintos puntos estratégicos, este método propone el cálculo de un índice de localización por caso. Para esto previamente se define un parámetro que representa la desviación de cada par medida-cálculo:

$$\delta_k^{i,j} = \left| V_{k,med}^i - |V_{k,calc}^{i,j}| \right| \quad (III.152)$$

Donde:

- $|V_{k,med}^i|$ : Representa el módulo de la tensión medida en la fase k y en el nodo i.
- $|V_{k,calc}^{i,j}|$ : Representa el módulo de la tensión calculada en la fase k y en el nodo i, suponiendo la sección j bajo falta.

La expresión de este índice de localización para cada posible nodo bajo falta vendrá dada por (III.153), donde  $\Delta$  es un número pequeño para evitar las divisiones por 0:

$$\eta_j = \frac{1.0}{\max \left[ \max (\delta_k^{i,j}) - \min (\delta_k^{i,j}) \right] + \Delta} \quad (III.153)$$

### Método iterativo para la aplicación del método

Finalmente, para realizar la localización el algoritmo propone un análisis en los siguientes pasos, a realizar en caso de detectarse una falta:

- 1) Adquirir los datos de los fasores de corriente y tensión (anterior y durante la falta) registrados en cabecera y los módulos de tensión de los distintos nodos con capacidad de medida.
- 2) Centralizar toda esta información y almacenarla para su análisis.
- 3) Seleccionar el modelo para la caracterización de cada carga, según (III.142).
- 4) Caracterizar el consumo para cada carga utilizando los datos prefalta y el algoritmo iterativo asociado a (III.143).
- 5) Tomar inicialmente como valor de tensión estimada para todos los nodos, la tensión del nodo de cabecera.

- 6) Calcular la corriente de falta aplicando (III.147).
- 7) Inyectar la corriente de falta en los nodos analizados.
- 8) Ejecutar el algoritmo (definido en los apartados anteriores) de flujo de carga en condición de falta.
- 9) Verificar que la corriente de cabecera calculada es igual a la medida en dicho punto. Condición de convergencia, expresiones (III.149) y (III.150), en caso contrario repetir desde el paso 6, actualizando en cada iteración las corrientes de las cargas, en función de las nuevas tensiones aplicada a ésta, aplicando la expresión (III.148).
- 10) Cambiar al siguiente nodo a analizar (suponiendo ahora la falta en éste), y repetir desde el paso 5.
- 11) Calcular el índice de localización de faltas asociado a cada nodo analizado, según (III.153).
- 12) Ordenar los nodos, aplicando un criterio de mayor a menor según sus índices de localización de faltas (calculados en el paso anterior).
- 13) Finalmente se selecciona como nodo afectado por la falta el que presente un índice de localización más elevado.

Este método, como ya se ha comentado previamente y se deduce de su último paso, no proporciona una posición exacta de la falta, más bien identifica el nodo más cercano a ésta. Para aumentar la resolución únicamente sería necesario aumentar la granularidad espacial del análisis (aumentando el número de nodos), obviamente esto aumentaría también el tiempo empleado por el algoritmo. En contrapartida, la principal ventaja que plantea este enfoque, es que las medidas de tensión distribuidas no han de estar sincronizadas con los registros de cabecera, únicamente es necesario su módulo. Además no todos los nodos han de disponer de una medida. Sin embargo, no se especifica un criterio para la ubicación óptima de estos.

La aplicación de este método y de sus índices es propuesto como una solución orientada a *Smart Grids*[101]. Sin embargo, no se identifica como ha de contemplar éste la generación distribuida. Una posible solución a este problema sería utilizar las medidas de corriente asociadas a los nodos donde se conecte cada generador, siendo agregadas en la estimación de corriente de cada sección. La medida de tensión también podría ser utilizada como un valor ya conocido para estos nodos, simplificando su estimación. Obviamente, a diferencia de las medidas de tensión distribuidas utilizadas en este algoritmo, para poder hacer esto las medidas han de estar sincronizadas.

### III.1.2.1.5. Método de Jiang et al.

Este trabajo fue presentado por Jiang *et al.*[102] y describe un método de localización de faltas basado en los fasores de tensión y corriente registrados por unidades de medida de fasores (o *Phasor Measurement Units*, PMUs), repartidos a lo largo de la red (mínimo uno por cada punto de consumo/generación). Este método utiliza un análisis mediante la componente en red de secuencia positiva (pudiendo tener algún error en líneas sin transposición de línea), e implementan la localización en dos etapas, la primera donde se estima la sección afectada (a través de unos indicadores basados en un balance de corriente) y una segunda donde se realiza la localización dentro de esta.

Para el análisis de la primera de las etapas, este método se basa en la posibilidad de formular el estado de la red completa de forma matricial, siguiendo la filosofía de un análisis nodal del circuito. En (III.154) se expresa el caso prefalta, donde  $V_{nx1}^0$  es el vector de tensiones en cada nodo e  $I_{nx1}^0$  es el vector de corrientes inyectadas en estos, ambos en el caso prefalta.  $Y_{nxn}$  representa la matriz de admitancias, que relacionan a estos vectores.

$$Y_{nxn} \cdot V_{nx1}^0 = I_{nx1}^0 \quad (\text{III.154})$$

Suponiendo una sección genérica entre los nodo  $i$  y  $j$ , ésta puede ser modelada mediante una sección equivalente en  $\pi$  (ver Figura III.21a), o suponiendo ésta en falta, mediante dos secciones equivalentes de este tipo a ambos lados de la falta (ver Figura III.21b). Dicha sección puede ser añadida como una sección ficticia, aumentando en una la dimensión de la matriz de admitancia, descrita según:

$$Y_{new} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1j} & \dots & Y_{1n} & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ Y_{i1} & \dots & Y'_{ii} & \dots & Y'_{ij} & \dots & Y_{in} & Y'_{i(n+1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ Y_{j1} & \dots & Y'_{ji} & \dots & Y'_{jj} & \dots & Y_{jn} & Y'_{j(n+1)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ Y_{n1} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nj} & \dots & Y_{nn} & 0 \\ 0 & 0 & Y'_{(n+1)i} & 0 & Y'_{(n+1)j} & 0 & 0 & Y'_{(n+1)(n+1)} \end{bmatrix} \quad (\text{III.155})$$

Donde:  $Y'_{ij} = Y'_{ji} = 0$  (III.156)

$$Y'_{ii} = Y_{ii} - \frac{Y_{Lij}}{2} - \frac{1}{Z_{Lij}} + \frac{d \cdot Y_{Lij}}{2} + \frac{1}{d \cdot Z_{Lij}} \quad (\text{III.157})$$

$$Y'_{jj} = Y_{jj} - \frac{Y_{Lij}}{2} - \frac{1}{Z_{Lij}} + \frac{(1-d) \cdot Y_{Lij}}{2} + \frac{1}{(1-d) \cdot Z_{Lij}} \quad (\text{III.158})$$

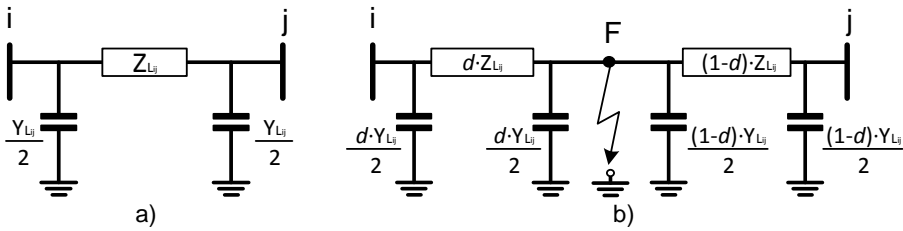


Figura III.21: Modelo de sección de línea (mét. de Jiang et al.).

a) Sección genérica, b) Sección genérica en falta.

$$Y'_{i(n+1)} = Y'_{(n+1)i} = -\frac{1}{d \cdot Z_{Lij}} \quad (III.159) \quad Y'_{j(n+1)} = Y'_{(n+1)j} = -\frac{1}{(1-d) \cdot Z_{Lij}} \quad (III.160)$$

$$Y'_{(n+1)(n+1)} = \frac{Y_{Lij}}{2} + \frac{1}{d \cdot Z_{Lij}} + \frac{1}{(1-d) \cdot Z_{Lij}} \quad (III.161)$$

En la matriz  $Y_{new}$  (III.155), únicamente los valores relacionados con los nodos  $i$  y  $j$  (marcados como prima), varían con respecto de la matriz  $Y_{nxn}$ , anteriormente definida. En base a la matriz  $Y_{new}$  es posible estudiar el caso de falta mediante la expresión (III.162), donde  $V_f$  y  $I_f$  son la tensión y la corriente asociada al nodo de falta (F), y  $V_{nx1}$  e  $I_{nx1}$  son los vectores de tensión y corriente asociados a cada nodo, en caso de falta.

$$Y_{new} \cdot \begin{bmatrix} V_{nx1} \\ V_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{nx1} \\ I_f \end{bmatrix} \quad (III.162)$$

Analizando las filas  $i$  y  $j$  (nodos entre los que se encuentra la falta) es posible obtener:

$$Y_{i1} \cdot V_1 + \dots + Y'_{ii} \cdot V_i + \dots + Y'_{ij} \cdot V_j + \dots + Y_{in} \cdot V_n + Y'_{i(n+1)} \cdot V_f = I_i \quad (III.163)$$

$$Y_{j1} \cdot V_1 + \dots + Y'_{ji} \cdot V_i + \dots + Y'_{jj} \cdot V_j + \dots + Y_{jn} \cdot V_n + Y'_{j(n+1)} \cdot V_f = I_j \quad (III.164)$$

Estas expresiones pueden ser reescritas según:

$$\begin{aligned} Y_{i1} \cdot V_1 + \dots + Y_{ii} \cdot V_i + \dots + Y_{ij} \cdot V_j + \dots + Y_{in} \cdot V_n &= \\ = I_i + (Y_{ii} - Y'_{ii}) \cdot V_i + (Y_{ij} - Y'_{ij}) \cdot V_j - Y'_{i(n+1)} \cdot V_f & \end{aligned} \quad (III.165)$$

$$\begin{aligned} Y_{j1} \cdot V_1 + \dots + Y_{ji} \cdot V_i + \dots + Y_{jj} \cdot V_j + \dots + Y_{jn} \cdot V_n &= \\ = I_j + (Y_{ji} - Y'_{ji}) \cdot V_i + (Y_{jj} - Y'_{jj}) \cdot V_j - Y'_{j(n+1)} \cdot V_f & \end{aligned} \quad (III.166)$$

En base a este nuevo planteamiento de las expresiones de las filas  $i$  y  $j$ , es posible reescribir el caso con falta utilizando la matriz de admitancias  $Y_{nxn}$  (asociada al circuito sin falta), añadiendo en el vector de corriente los términos  $\Delta i$  e  $\Delta j$ :

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1j} & \dots & Y_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{i1} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{ij} & \dots & Y_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{j1} & \dots & Y_{ji} & \dots & Y_{jj} & \dots & Y_{jn} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{n1} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nj} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \dots \\ V_i \\ \dots \\ V_j \\ \dots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ \dots \\ I_i + \Delta I_i \\ \dots \\ I_j + \Delta I_j \\ \dots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (\text{III.167})$$

Donde:

$$\Delta I_i = (Y_{ii} - Y'_{ii}) \cdot V_i + (Y_{ij} - Y'_{ij}) \cdot V_j - Y'_{i(n+1)} \cdot V_f \quad (\text{III.168})$$

$$\Delta I_j = (Y_{ji} - Y'_{ji}) \cdot V_i + (Y_{jj} - Y'_{jj}) \cdot V_j - Y'_{j(n+1)} \cdot V_f \quad (\text{III.169})$$

Expresando (III.167) de forma simplificada, quedaría (III.170), donde  $V_{nx1}$  es el vector de tensiones en cada nodo e  $I_{nx1}$  es el vector de corrientes inyectadas en estos, ambos ahora en el caso falta.

$$Y_{nxn} \cdot V_{nx1} = I_{nx1} + \Delta I_{nx1} \quad (\text{III.170})$$

Donde el vector  $\Delta I_{nx1}$  queda definido según:

$$\Delta I_{nx1} = [0 \quad \dots \quad 0 \quad \Delta I_i \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad \Delta I_j \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \quad (\text{III.171})$$

Esto permite que calculando este vector, sea fácil identificar la sección afectada, comprendida entre los dos nodos representados por sus dos elementos no nulos.

Este planteamiento es válido si se conocen todas las tensiones ( $V_{nx1}$ ) y las corrientes ( $I_{nx1}$ ) asociadas a cada nodo. Sin embargo, debido al elevado precio de los PMUs, esto no es lo habitual, por lo que en este método se plantea la posibilidad de disponer medidas estimadas para estos nodos (obligatoriamente sin ningún tipo de generación).

En este trabajo se plantea el cálculo para un modelo simple de red, según la estructura descrita en la Figura III.22. En base a esto, los cálculos asociados a un nodo no terminal genérico  $p$  serían (III.172) y (III.173), en donde destaca el valor nulo de  $I_p$ , que es una condición impuesta en este tipo de nodos no medidos directamente:

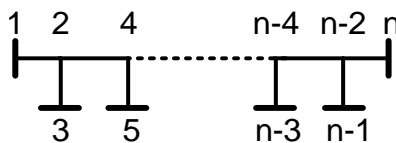


Figura III.22: Modelo simplificado de línea (mét. de Jiang et al.).



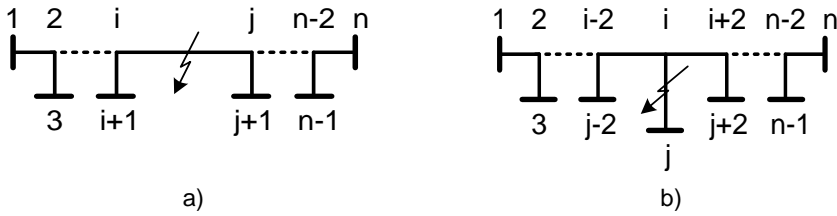


Figura III.23: Modelo simplificado de línea, con falta (mét. de Jiang et al.).  
a) falta en rama principal, b) falta en rama secundaria.

$$V_p = \frac{I_{(p+1)} - Y_{(p+1)(p+1)} \cdot V_{(p+1)}}{Y_{(p+1)p}} \quad (\text{III.172}) \quad I_p = 0 \quad (\text{III.173})$$

En base a este modelo, y aplicando el criterio antes mencionado, pueden darse dos casos; falta en una sección de las ramas principales (ver Figura III.23a), o falta en una sección de las ramas secundarias (ver Figura III.23b). En el primer el caso, el cálculo de los nodos estimados a través de (III.172) es válido, por lo que el vector  $\Delta I_{nx1}$ , nos identificará mediante sus dos elementos no nulos los nodos de cada extremos de la sección afectada, tal y como se sucedía en (III.167). Por el contrario, si la falta se encuentra en una sección secundaria, el procedimiento de estimación de las tensiones no es válido, afectando a más de dos nodos. En un caso con una topología similar a la Figura III.23b, en el vector  $\Delta I_{nx1}$  se obtendría tres elementos no nulos, que identificarían tres nodos, en los que el nodo identifica la rama secundaria afectada, ver (III.174).

$$\Delta I_{nx1} = [0 \quad \dots \quad 0 \quad \Delta I_{i-2} \quad 0 \quad \Delta I_i \quad 0 \quad \Delta I_{i+2} \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \quad (\text{III.174})$$

Obviamente, este planteamiento se dificulta con topologías más complejas, impidiendo realizar una localización exacta. Para estas topologías más complejas sería necesario utilizar medidas reales en todos los nodos. Sin embargo, como ya se ha comentado anteriormente, estas soluciones suelen tener un coste muy elevado.

### Método de localización

Una vez determinada la sección afectada, es posible realizar una estimación más concreta del punto de falta dentro de esta. Para esto, en este método se plantea una resolución similar a la planteada en otros métodos, igualando la tensión de falta ( $V_i$ ) de las expresiones (III.168) y (III.169), obteniéndose (III.175).

$$\begin{aligned} & \left[ (Y_{ii} - Y'_{ii}) \cdot V_i + (Y_{ij} - Y'_{ij}) \cdot V_j - \Delta I_i \right] \cdot Y'_{j(n+1)} = \\ & = \left[ (Y_{ji} - Y'_{ji}) \cdot V_i + (Y_{jj} - Y'_{jj}) \cdot V_j - \Delta I_j \right] \cdot Y'_{i(n+1)} \end{aligned} \quad (\text{III.175})$$

Donde las admitancias  $Y'_{ii}$ ,  $Y'_{jj}$ ,  $Y'_{i(n+1)}$  and  $Y'_{j(n+1)}$ , son conocidas y dependen de la posición normalizada  $d$ , ver (III.157)–(III.160). Esto permite determinar dicha posición resolviendo la ecuación de 2º grado (III.176), obteniéndose el valor de posición normalizada por el tamaño de la sección bajo análisis ( $0 \leq d \leq 1$ ).

$$a \cdot d^2 + b \cdot d + c = 0 \quad \text{(III.176)}$$

$$a = k \cdot (V_i - V_j) \quad \text{(III.177)} \quad b = -k \cdot (V_i - V_j) + Z_{Lij} \cdot (\Delta I_i + \Delta I_j) \quad \text{(III.178)}$$

$$c = -\Delta I_j \cdot Z_{Lij} \quad \text{(III.179)} \quad k = \frac{Y_{Lij} \cdot Z_{Lij}}{2} \quad \text{(III.180)}$$

### **III.1.2.2. Problemática típica asociada a esta familia de métodos**

Como se ha comentado a lo largo del apartado III.1.2, los métodos de localización basados en componentes fundamentales de las medidas registradas en dos o más terminales son, en términos generales, una muy buena herramienta para determinar la posición de una falta. Sin embargo, al igual que sucedía con otras familias de métodos, los métodos de esta familia también presentan algunos problemas o limitaciones.

Concretamente, como ya se ha comentado en los apartados anteriores, esta filosofía de medida multipunto sí es compatible con *Smart Grids*, donde existe una fuerte presencia de generación distribuida. Sin embargo esta filosofía multipunto, para que pueda operar correctamente y de forma coherente, requiere que dichas medidas estén sincronizadas y presenten una precisión adecuada, traduciéndose cualquier desvío de estos dos condicionantes en errores en la estimación de la posición de la falta. Analizando detalladamente esta problemática, podemos encontrar:

#### **III.1.2.2.1. Problema de sincronización de las medidas entre los nodos.**

La variabilidad temporal de las magnitudes registrada por los distintos medidores, exige algún mecanismo de sincronización o coordinación para poder relacionar a estos de forma coherente. En este sentido, en la literatura es fácil identificar dos tendencias claras para la resolución de este problema; una primera que utiliza sistemas de medida con mecanismos hardware de sincronización, y una segunda que aplica algoritmos de sincronización a posteriori, permitiendo identificar los retrasos existentes entre éstas.

Concretamente, el mecanismo de sincronización hardware más habitual es mediante el uso de GPS[103][104], típico en PMUs, y que consigue precisiones de hasta 10ns. La otra alternativa de sincronización consiste en aplicar algoritmos o técnicas que permitan identificar el desfase entre las distintas medidas. Como ejemplo de

esto[105], plantea un método de localización de faltas simples l-g para redes subterráneas, utilizando medidas multipunto no sincronizadas. La clave de este método radica en la aplicación de un algoritmo que permite sincronizar todas las medidas con las registradas en la subestación, utilizando un método de compensación de fase basado en las características de los sistemas subterráneos. Otra alternativa de sincronización la encontramos en el algoritmo de localización[96] donde se incluye el desfase entre medidas como una variable más a resolver en las ecuaciones de malla, planteándose un método iterativo para su resolución. En este trabajo se analiza la sincronización para sistemas con dos y tres terminales. No obstante, la complejidad del análisis crece considerablemente con el número de nodos, haciéndose muy difícil su aplicación en sistemas con muchos terminales (típicos en redes de distribución).

#### **III.1.2.2.2. Problema de falta de calidad en el modelo o en las medidas**

Al igual que sucedía con los métodos de un único terminal, estos métodos se basan en analizar la evolución de las magnitudes de tensión y corriente a lo largo de la línea bajo análisis. Obviamente un error en la estimación de dicho modelo o en la propia medida que se utilizan como entrada para estos métodos, se traduce en desviaciones y errores en la estimación de la posición de la falta.

En este sentido, existen algunos trabajos en la literatura que intentan minimizar estos efectos. Un ejemplo de esto puede encontrarse en la bibliografía[106], donde los autores proponen un método de localización multipunto, además de resolver la propia localización. Este método plantea un mecanismo de resolución que permite identificar y corregir de forma óptima la medidas erróneas, pudiendo incluso estimar alguna de ellas si fuesen desconocidas. Este método se basa en estudiar la interacción de cada medida con las demás (a través de un análisis de parámetros distribuidos de la línea), pudiendo identificar las desviaciones entre medidas reales y estimadas, optimizándose este dato aprovechando dicha redundancia.

#### **III.1.2.3. Resumen de los métodos basados en esta técnica**

Como se ha podido observar a lo largo de este apartado, existe en la literatura una amplia variedad de métodos de localización basados en el análisis de las componentes fundamentales (o fasores) de las tensiones y corrientes, registradas en dos o más terminales. La mayoría de estos métodos están orientados a redes de transporte (con tipologías mucho menos compleja que las redes distribución). No obstante, al aumentar el número de puntos de medida, es posible ver estas topologías más complejas, como una agrupación de topologías simples (similares a las de las redes de transporte), haciendo viables su aplicación en este tipos de redes.

Como se ha comentado anteriormente, la principal ventaja que presenta este método con respecto a los métodos basados en medida en un terminal, es su compatibilidad con sistemas donde exista generación distribuida, así como su baja sensibilidad de la resistencia de falta. Este hecho se pone de manifiesto a lo largo del apartado III.1.2.1, donde un exhaustivo análisis de distintos enfoques y métodos basados en esta técnica ha sido realizado (ver Tabla III.6). Así pues, al igual que se hizo con los métodos basados en medida en un único terminal, este análisis ha sido completado con una revisión de su problemática típica, revisando algunas de las soluciones más habituales planteadas en la literatura. Así pues, también se ha creído interesante destacar[107], donde sus autores realizan una revisión de las técnicas de localización basadas en medidas sincronizadas, distinguiéndose entre técnicas de dos terminales y multiterminal. Adicionalmente, también se destaca la dificultad de aplicar estas técnicas a las redes de distribución, donde la topología no es homogénea, así como realiza una interesante revisión de técnicas orientada a líneas donde se disponga de sistemas de compensación (condensadores, FACTS) y técnicas de localización adaptativas (donde se persigue que el algoritmo de localización sea robusto a los cambios que pueda sufrir la red). Sin embargo, al igual que sucedía en los métodos basados en medidas en un único terminal, cada autor muestra sus resultados en base a simulaciones sobre distintos sistemas o redes, no pudiéndose comparar sus resultados entre si, y dificultando la elección entre estos.

		Método de Girgis et al. (2) (ver apartado III.1.2.1.1)	Método de Novosel et al. (2) (ver apartado III.1.2.1.2)	Método de Liu et al. (ver apartado III.1.2.1.3)	Método de Pereira et al. (ver apartado III.1.2.1.4)	Método de Jiang et al. (ver apartado III.1.2.1.5)
<b>Información necesaria (fasores V e I)</b>	Prefalta	-	-	-	√	√
	Falta	√	√	√	√	√
<b>Tipo de análisis*</b>		a,b,c	0,+,-	0,+,-	a,b,c	0,+,-
<b>Sincronización**</b>		Med o Alg	Med	Med	Med	Med
<b>Compatibilidad con tipo de falta</b>		todas	todas	todas	todas	todas
<b>Compatible con sistemas desbalanceados</b>		√	-	-	√	-

\* Nota: 0,+,-: basado en componentes simétricas, a,b,c: basado en análisis directo.

\*\* Nota: Med: sincronización mediante hardware específico, Alg: sincronización mediante algoritmo de cálculo del desfase.

Tabla III.6: Comparativa entre mét. de componentes fund. en dos o más terminales.

Actualmente, el desarrollo en los últimos años de los PMUs, y la estandarización de su información asociada (a través de IEEE C37.118.1[108]), ha hecho evolucionar los mecanismos de localización en las redes de distribución, hacia el concepto “*Wide Area Monitoring, Protection and Control*” (WAMPAC)[109], donde en cada momento se dispone de una información sincronizada de cada punto de la red, permitiendo aplicarse técnicas como las descritas en el apartado III.1.2.1.5. No obstante, a pesar de sus grandes ventajas, esta tendencia requiere la instalación a lo largo de la red de un importante número de PMUs, (cuyo coste suele ser elevado), cuestionándose seriamente la viabilidad económica de este planteamiento para abordar todo el conjunto de líneas que forma una red de distribución.

## **III.2. Métodos basados en el análisis de componentes de alta frecuencia**

Esta familia de técnicas, como su nombre indica consiste en analizar la información registrada (habitualmente en un único punto la cabecera de la línea), en esta ocasión no centrándose únicamente en la información contenida en los armónicos fundamentales de tensión y corriente. En este sentido, es posible diferenciar dos conjuntos de técnicas en función de los datos de entrada utilizados; basados en análisis de las señales en el dominio del tiempo o los basados en el análisis de las componentes armónicas (extraídas aplicando transformadas; Fourier o wavelet). Estos dos grupos serán analizados con más detalle en los siguientes apartados:

### **III.2.1. Métodos basados en el análisis temporal de las medidas.**

Este grupo de métodos consiste en plantear las ecuaciones de mallas, de forma similar a los métodos explicados en los apartados anteriores, únicamente planteando éstas ahora en el dominio del tiempo.

En este sentido destaca[110], donde los autores proponen un método de localización de dos terminales con medidas sincronizada, analizando las medidas en el dominio del tiempo. En este trabajo se plantea un doble análisis, uno suponiendo un modelo de línea corta y otro aplicando un modelo de línea larga. De estos dos estudios, el segundo utiliza un análisis de las componentes modales (y que se verán en más detalle más adelante), no obstante para entender el concepto básico de este método nos centraremos en el análisis del modelo de línea corta.

Este método (basándose en la Figura III.24) plantea un estudio de una sección en un sistema trifásico, que suponiendo conocidas las tensiones y corrientes en ambos extremos (nodos S y R), podrían plantearse (III.181) como expresión genérica para las tres fases (con independencia del tipo de falta).

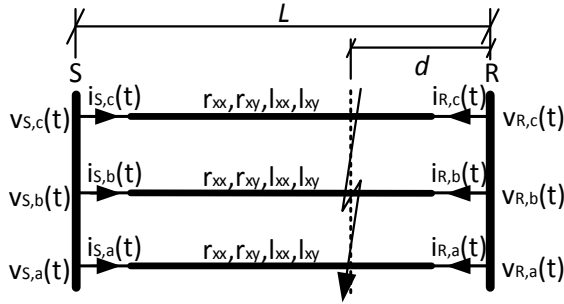


Figura III.24: Modelo de sección línea corta (análisis de la falta en el dominio del tiempo).

$$v_{mS}(t) - v_{mR}(t) - L \cdot \sum_{n=a,b,c} \left[ r_{mn} \cdot i_{nS}(t) + l_{mn} \cdot \frac{d i_{nS}(t)}{dt} \right] + \quad \forall m=a,b,c \quad (III.181)$$

$$+ d \cdot \sum_n \left[ r_{mn} \cdot i_{nR}(t) + r_{mn} \cdot i_{nS}(t) + l_{mn} \cdot \frac{d i_{nR}(t)}{dt} + l_{mn} \cdot \frac{d i_{nS}(t)}{dt} \right] = 0$$

Asumiendo que realmente las medidas de tensión y corriente son magnitudes discretas (muestreadas cada  $\Delta t$ ), esta expresión puede ser reescrita según:

$$A_m(k) + d \cdot B_m(k) = 0 \quad \forall m=a, b, c \quad (III.182)$$

Donde:

$$A_m(k) = v_{mS}(k) - v_{mR}(k) - L \cdot \sum_{n=a,b,c} \left[ \left( r_{mn} + \frac{l_{mn}}{\Delta t} \right) i_{nS}(k) - \frac{l_{mn}}{\Delta t} \cdot i_{nS}(k-1) \right] \quad (III.183)$$

$$B_m(k) = \sum_{n=a,b,c} \left\{ \left( r_{mn} + \frac{l_{mn}}{\Delta t} \right) [i_{nR}(k) + i_{nS}(k)] - \frac{l_{mn}}{\Delta t} [i_{nR}(k-1) + i_{nS}(k-1)] \right\} \quad (III.184)$$

A partir de (III.182), la distancia  $d$  puede ser determinada utilizando una estimación por mínimos cuadrados, combinando las tres fases y analizándolo para un conjunto de  $N$  muestras:

$$x = \frac{\sum_{m=a,b,c} \left\{ \sum_{k=1}^N [A_m(k) \cdot B_m(k)] \right\}}{\sum_{m=a,b,c} \left\{ \sum_{k=1}^N [B_m^2(k)] \right\}} \quad (III.185)$$

Obviamente, la precisión del cálculo de la posición de la falta vendrá fuertemente condicionada por el número de muestras registradas, requiriéndose una elevada frecuencia de muestreo (no habitual en los sistemas de medida convencionales) o una gran ventana de muestreo (condicionada por la desconexión de la línea por la falta).

En este sentido otros trabajos como[111], plantean una extensión de este método. Este también plantea el uso de un análisis temporal basado en el modelo de la línea, pero no despreciando en esta ocasión la resistencia serie de la línea. Dicho modelo es aplicado para el cálculo del perfil de tensión y corriente estimado a lo largo de la línea, hasta llegar a la sección afectada. La principal ventaja de este trabajo es que permite reducir la restricciones de frecuencia de muestreo hasta un valor de 20kHz, un valor frecuencia más próximo (aunque aún elevado) a las frecuencias de muestreo habituales de los sistemas de protección convencionales.

Otros ejemplos del uso de[110] lo encontramos en[112] donde se aplica esta técnica de localización, completando éste estudio con un algoritmo de clasificación de faltas, basado en un indicador que analiza el signo (o dirección) del flujo energético desde cada extremo de la línea durante la falta:

$$Psgn(t) = sgn(P_s(t)) - sgn(P_r(t))$$

$$sgn(x) = \begin{cases} -1 \Leftrightarrow x < 0 \\ 0 \Leftrightarrow x = 0 \\ 1 \Leftrightarrow x > 0 \end{cases} \quad \text{(III.186)}$$

Analizando la evolución temporal, durante la falta este indicador puede valer -2, 0 ó 2. Analizando el valor predominante de éstos tres valores, para cada fase, es posible determinar el tipo de falta según la Tabla III.7. No obstante hay que tener en cuenta que este planteamiento únicamente es válido, si existe generación en ambos extremos del segmento bajo análisis.

Basado a su vez en[110][112] encontramos[113], donde los autores presentan un procedimiento de análisis automático de faltas, capaz de detectar, clasificar y localizar averías, así como evitar falsos positivos de los relés de protecciones, asociados a fenómenos de perturbaciones, mitigándose rápidamente el problema y evitando el efecto cascada asociado a faltas en otras líneas.

Tipo de Falta	Psgn <sub>x</sub> *	Psgn <sub>y</sub> *	Psgn <sub>z</sub> *
<b>Faltas Monofásica,</b> línea-tierra fase "x"	=0	≠0	≠0
<b>Faltas Bifásicas</b> Línea-línea o línea-línea-tierra fases "x" e "y"	=0	=0	≠0
<b>Faltas Trifásica,</b> fases "a", "b" y "c"	=0	=0	=0

\*Nota: valor más frecuente dentro del intervalo de falta.

Tabla III.7: Clasificador de falta (mét. de Dutta et al.).

### III.2.2. Métodos basados en el análisis de las componentes frecuenciales

Esta familia de técnicas, como su nombre indica consiste en el análisis de los coeficientes asociados a las distintas componentes armónicas que conforman las señales registradas durante un fenómeno de falta. Tradicionalmente, en el ámbito de los sistemas de potencia, el análisis de las componentes frecuenciales ha estado asociado a análisis de armónicos, obtenidos mediante la aplicación de la transformada de Fourier. Sin embargo, esta herramienta matemática no provee ningún tipo de información temporal de las señales analizadas, dificultando su uso en el análisis de fenómenos transitorios. Por el contrario, la transformada de wavelet no solo proporciona información frecuencial sino que también permite caracterizar la dinámica de las señales, permitiendo el análisis de los fenómenos transitorios, entre los que destacan los análisis de perturbaciones (ej:[114]) y como se estudiará más adelante, su aplicación en la detección, clasificación y localización de faltas. En[115] los autores plantean una interesante comparativa entre las características de ambas transformadas y su aplicabilidad en sistemas de potencia.

El concepto básico de análisis wavelet es seleccionar una función wavelet apropiada llamada "*mother wavelet*" y luego realizar el análisis utilizando distintas versiones de señal patrón (aplicándole desplazamientos y dilataciones)[116]. Concretamente, una implementación habitual de la transformada discreta de wavelet se realiza mediante el análisis de resolución múltiple[117] (o "*multiresolution analysis*", MRA), donde mediante un conjunto de filtros se descompone la señal en una aproximación y un detalle, repitiéndose este procedimiento de forma iterativa con la aproximación resultante (ver Figura III.25). Cada etapa de la descomposición se identifica con niveles, siendo su resultado la aproximación  $a_x$  y el detalle  $d_x$ .

En el ámbito de la localización de faltas, el análisis de las características obtenidas de un MRA, no suele realizarse de forma analítica, recurriéndose habitualmente a técnicas basadas en inteligencia computacional, que favorecen la interpretación de esta información, facilitando así la estimación de la posición de la falta.

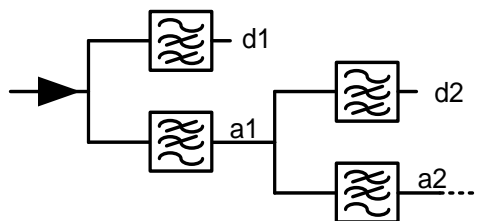


Figura III.25: Estructura del banco de filtros en un MRA.



Un ejemplo de la aplicación de este tipo de análisis combinado lo podemos encontrar en [24] donde se presenta un método de clasificación y localización basado en el análisis de las tensiones y corrientes en un terminal, aplicando un sistema de inferencia difuso para el análisis de las salidas del tercer nivel del MRA. La principal ventaja de este enfoque, es que no trabaja sobre un modelo de la línea, por lo que es menos sensible a error o imprecisiones en éste. Así pues, este estudio también demuestra que este enfoque presenta un buen resultado superando los problemas asociados a factores tales como el ángulo de aparición de la falta, impedancia de falta y posición de falta. Para este trabajo, la definición de los conjuntos difusos se ha realizado utilizando un set estándar triangular, y el motor de inferencia se basa en una descripción simple, obteniéndose con estos buenos resultados para una línea de transporte simple. Sin embargo, los mismos autores plantean la dificultad en la definición de dichos conjuntos y reglas, en especial si se aplica a topologías más complejas, plantando la utilización de algoritmos y sistemas neuro-difusos como una posible solución a este problema. En este sentido, el trabajo [69] plantea la utilización ANFIS (o *“adaptive-network-based fuzzy inference system”*) para la localización de falta, y dividiendo el problema en distintos subsistemas según el tipo de falta. Este enfoque plantea el problema de la necesidad de una base de conocimiento para el entrenamiento del sistema. Como habitualmente no se dispone de suficientes casos de falta registrados para dicho entrenamiento, este conocimiento suele ser generado a partir de simulaciones de modelos, que aunque presenten algunas diferencias con el sistema real, como ya se ha dicho anteriormente, estas serán mitigadas por el sistema de inferencia difuso.

Con la misma filosofía, destaca el trabajo [118] donde los autores proponen un método de localización de faltas basado en el uso de una ANN en el dominio complejo, planteando muy buenos resultados al combinarlo con un análisis de wavelets. En este sentido, también destaca el trabajo [119] donde los autores comparan los resultados obtenidos por dos sistemas mixtos; uno basado en wavelets más un sistema de lógica difusa (wavelets-FLS) y otro basado también en wavelets, pero aplicando luego una red neuronal (wavelets-ANN). Ambas estrategias han sido evaluadas ante distintas condiciones de fallo, topologías y ubicaciones de faltas. Finalmente, los autores de este trabajo concluyen que la mejor solución depende de la situación en la que éste se aplique. Concretamente, en los casos de mayor complejidad y en el que se disponga de una abundancia de datos, una ANN es más eficiente y proporciona mejores resultados en la localización, sin embargo cuando la ANN no dispone de suficientes patrones para su entrenamiento, un FLS siempre puede utilizarse en su lugar para resolver el problema.

### **III.2.3. Problemática típica asociada a esta familia de métodos**

A lo largo de los dos apartados anteriores, se puede observar distintos ejemplos de métodos que plantean un enfoque basado en el análisis de las medidas registradas en el sistema, utilizando una información más allá de sus componentes fundamentales (o fasores). Sin embargo, como es obvio, esto requiere que los registradores o equipos de medida tengan la suficiente tasa de muestreo para proporcionar dicha información (>20kHz), característica habitualmente no disponibles en los sistemas de distribución eléctrica tradicionales, requiriéndose si se opta por este tipo de técnicas de localización, la actualización de estos equipos.

Por otro lado, asociados a los sistemas basados en conocimiento que son utilizados para identificar la posición de la falta, es necesaria una base de conocimiento o conjunto de patrones previos que permitan su entrenamiento. La naturaleza esporádica de los fenómenos de falta, hace que muy frecuentemente no se disponga de suficiente información para esto. En este sentido la simulación de un modelo de la línea puede ayudar a generar esta base de conocimiento, que como es obvio, está condicionada por la calidad del modelo.

### **III.2.4. Resumen de los métodos basados en esta técnica**

Como se ha revisado a lo largo del apartado III.2, existen en la literatura muchos trabajos que resuelven el problema de la localización de faltas aplicando un análisis de la información de alta frecuencia, contenida en las señales de tensión y corriente, más allá del estudio de sus componentes fundamentales.

No obstante, analizando dichos trabajos, es fácil identificar que estos métodos están más orientados a resolver el problema de la localización en redes de transporte, donde la instrumentación es más precisa y las topologías de red son más simples (facilitando el análisis y la identificación del punto de falta). Así pues, su aplicación sobre redes de distribución se plantea como una interesante alternativa, en la que los sistemas de inteligencia computacional resuelvan el análisis de dicha complejidad, así como las imprecisiones asociadas al modelado de los elementos de la línea, quedando únicamente el inconveniente de la necesidad de una instrumentación con una tasa de muestreo más elevada (de mayor coste) que la tradicional en este tipo de redes. Obviamente, el elevado número de líneas que conforman un sistema de distribución (mucho mayor que el de transporte), es un importante escollo económico a la hora de plantear su implantación, optándose frecuentemente por la instalación de equipos menos costosos y la aplicación de técnicas menos exigentes, como la basadas en componentes fundamentales.

Referente a la evaluación o comparación de la bondad de estos métodos, entre ellos mismos y con los basados en otras técnicas, los distintos trabajos analizados siguen planteando el mismo inconveniente que los analizados anteriormente. Cada autor evalúa su método aplicándolo sobre un sistema distinto, imposibilitando esto una tarea de comparación coherente.

### III.3. Métodos basados en estudios de onda viajera

Los métodos de localización de faltas basados en el estudio de la onda viajera (o *travelling wave*) tiene como principio de funcionamiento el análisis de la propagación de las perturbaciones derivadas de una falta a lo largo de la línea, analizando su tiempo de llegada[120]. Este tipo de estudios suele denominarse de tiempo de llegada (o *Time of Arrival*, ToA), o también son conocidos como tiempo de vuelo (o *Time of Flight*, ToF). Un ejemplo simplificado del estudio de dicha propagación con sus reflexiones puede verse en la Figura III.26.

Los sistemas basados en onda viajera analizan las perturbaciones presentes en los registros de tensión y corriente. Concretamente, la aplicación de técnicas de onda viajera orientada a la detección de faltas fue presentada por primera vez en 1978[121]. Posteriormente, este concepto fue extendido también a la localización de falta[122][123], analizando mediante la correlación de las señales, las relaciones entre las perturbaciones directas y sus reflexiones de ambos extremos de la línea.

Con este planteamiento de análisis de tiempo, el cálculo de la distancia de la falta depende directamente de la velocidad de propagación de la onda, sin embargo hay que tener en cuenta que dicha velocidad de propagación en sistemas trifásicos, donde las líneas presentan un acoplamiento mutuo, no existe una única velocidad de propagación. En este sentido, con el objetivo de solventar este problema, y suponiendo que la línea analizada presenta una transposición de completa de las

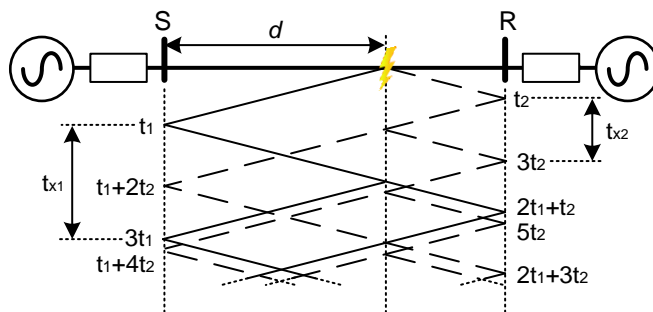


Figura III.26: Estudio de reflexiones asociadas a una falta en un modelo simple de línea.

líneas, es habitual aplicar la transformación de Clarke[124], aplicando (III.187) con el objetivos de descomponer una señal trifásica ( $S_3$ ) en sus componentes modales ( $S_M$ ).

$$S_M = T \cdot S_3 \quad (\text{III.187})$$

Donde:

$$S_M = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} ; \quad S_M = \begin{bmatrix} S_0 \\ S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} ; \quad T = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & -\sqrt{3} \end{bmatrix}$$

Aplicando dicha transformación se obtienen tres componentes modales o modos. La primera de estas, comúnmente ( $S_0$ ) conocida como “*gound mode*”, coincide con la componente de secuencia de cero y proporciona información únicamente cuando la falta presenta una derivación a tierra. Por el contrario, la segunda componente modal ( $S_\alpha$ ) es comúnmente conocida como “*aerial mode*”, y sí está presente en cualquier tipo de falta, razón por la cual la mayoría de los análisis de onda viajera se basan en esta componente.

Una vez determinada la velocidad de propagación, es posible analizar la posición de la falta utilizando las medidas en un terminal o en dos terminales:

#### Método con medidas en dos terminales:

Los métodos de onda viajera basados en medidas en dos puntos consisten básicamente en estudiar la diferencia que existe en los tiempos de detección, registrados desde ambos extremos de la línea. Concretamente, la posición de la falta viene definida por (III.188), donde  $t_1$  y  $t_2$ , son los tiempos de la primera detección vista desde cada uno de los extremos de la línea,  $L$  es la longitud total de la línea y  $v_m$  es la velocidad de propagación de la componente modal estudiada (ver Figura III.26).

$$d = \frac{L - v_m \cdot (t_2 - t_1)}{2} \quad (\text{III.188})$$

Obviamente para poder realizar este estudio, se ha de disponer de equipos con una tasa de muestreo muy alta, para evitar errores significativos en las medidas de tiempo. Así pues, también es necesario que ambos equipos de medida estén sincronizados de forma muy precisa (habitualmente basada en GPS[125]).

#### Método con medidas en un único terminal:

Los métodos basados en un único terminal presentan la principal ventaja de que únicamente analizan los registros desde un solo punto, no requiriendo la sincronización entre los distintos equipos de medida. Estos métodos se basan en el análisis del tiempo transcurrido entre la detección de los dos primeros picos (la

directa y la primer reflexión registrada). No obstante, hay que hacer una distinción ya que, dependiendo del tipo de falta las reflexiones pueden ser distintas. Concretamente, en el caso de una falta sin derivación a tierra, la reflexión debida al extremo opuesto de la línea es poco significativa, simplificándose el cálculo de la posición que quedaría definido según (III.189), donde  $t_x$  representa la diferencia de tiempo entre las dos primeras detenciones ( $t_{x1}$  si se analiza desde el nodo **S**) y  $v_m$  es la velocidad de propagación de la componente modal estudiada (ver Figura III.26).

$$d = \frac{v_m \cdot t_x}{2} \quad \text{(III.189)}$$

Por el contrario en el caso de una falta con derivación a tierra, dicha reflexión en el extremo opuesto si ha de ser tenida en cuenta. En este tipo de falta, el análisis vendrá definido según (III.190), donde  $t_x$  es el tiempo entre las dos primeras detecciones y  $\tau$  es el tiempo que tarda la onda en recorrer la longitud total de la línea ( $L$ ).

$$d = \frac{v_m \cdot (2 \cdot \tau - t_x)}{2} \quad \text{(III.190)}$$

Este tipo de métodos, al igual que ocurría con los de dos terminales, también presenta importantes restricciones temporales, requiriéndose equipos con una elevada tasa de muestreo, para evitar errores significativos en las medidas de tiempo.

### **III.3.1. Revisión de los métodos más destacados de onda viajera**

En este apartado se realizará una revisión de los trabajos de localización de faltas basados en el estudio de onda viajera, más significativos encontrados en la literatura.

En este sentido destaca el método[126] donde sus autores aplican la transformada de wavelet (WT) para mejorar la localización. Concretamente, plantea utilizar un análisis de las características temporales de los detalles de los dos primeros niveles (o escala) de un análisis de resolución múltiple (MRA)[117], realizado sobre las dos primeras componentes modales de la tensión o de la corriente en un único punto de medida. Concretamente este análisis permite identificar mediante la escala dos de la WT de la componente modal de cero, si dicha escala es nula, que es una falta sin derivación a tierra, planteándose la localización de la posición de la falta mediante (III.189), utilizando la escala uno de la componente modal  $\alpha$ . Por el contrario, si la escala dos de la WT de la componente modal de cero no es nula, se plantea utilizar un análisis sobre la escala uno, de forma que si ésta también es nula se aplicará para la localización la expresión (III.190) utilizando la escala uno de la componente modal  $\alpha$ . Si por el contrario la escala uno de la WT de la componente modal de cero no es

nula, se considerará una falta cercana, aplicarse (III.189) con la escala uno de la componente modal  $\alpha$ .

Otro interesante enfoque es planteado en [127], donde también se aplica un análisis combinado de las componentes modales de ceros y aérea ( $\alpha$ ) de la tensión. En este trabajo sus autores plantean un estudio por diferencia del tiempo de llegada (o *Difference Time of Arrival*, DToA) entre estas componentes. Este enfoque es únicamente válido para faltas con derivación a tierra, donde se cumple (III.191), donde  $t_x$  es el tiempo de la primera detección y  $v_x$  la velocidad, asociada a cada componente modal.

$$d = v_\alpha \cdot t_\alpha = v_0 \cdot t_0 \quad (\text{III.191})$$

Por tanto aplicando el análisis de DToA, es posible determinar la posición de la falta según:

$$d = \left( \frac{v_\alpha \cdot v_0}{v_\alpha - v_0} \right) \cdot \Delta t \quad (\text{III.192})$$
$$\Delta t = t_0 - t_\alpha$$

Basado también en un estudio de onda viajera sobre medidas en un único terminal, se proponen trabajos [128] donde su principal característica es que plantean un análisis sobre una línea mixta, combinando secciones aéreas con secciones subterráneas, y de las cuales los parámetros de la línea no son necesarios. Concretamente, en el algoritmo propuesto, analiza la tensión en un extremo de la línea, sin embargo no utiliza los transitorios derivados de la falta, sino analiza los asociados a la apertura del relé de protección, aplicando la transformada wavelet, e identificando las tres primeras detecciones (o picos). Este algoritmo identifica en primera instancia la sección afectada (aérea o subterránea), posteriormente calcula la velocidad de propagación de la onda y finalmente calcula la posición exacta de la falta.

En los últimos años, enfoques basados en inteligencia computacional aplicados sobre las características extraídas de los análisis de onda viajera, han sido propuestos en la literatura con el fin de mejorar la localización de las faltas. En este sentido, un ejemplo de esta tendencia la encontramos en [129], donde sus autores proponen un método de localización de faltas basado en el análisis de onda viajera registrada desde un único terminal, orientado a líneas mixtas. Este método utiliza la transformada de wavelet aplicada sobre las componentes modales de las tensiones transitorias registradas en el terminal de la línea. Posteriormente las energías normalizadas de estas componentes de la transformada de wavelet, junto con la

energía normalizada de la corriente, son utilizadas por una SVM para identificar la sección afectada. Finalmente un análisis tradicional de la componente modal  $\alpha$ , es utilizado para localizar la falta dentro de dicha sección afectada.

### **III.3.2. Problemática típica asociada a esta familia de métodos**

Los métodos basados en el análisis de la onda viajera, presentan unos muy buenos resultados en términos de localización de faltas. No obstante, como ya se ha mencionado a lo largo del apartado III.3, el principal inconveniente que plantea este tipo de métodos es la necesidad de un sistema de registro, con una tasa de muestreo muy elevada (>1MHz). Este tipo de equipos no es habitual en las instalaciones reales, y al igual que sucedía en los sistemas basados en el análisis de alta frecuencia (ver apartado III.2), suponiendo un importante desembolso económico (mayor aun al tener mayores restricciones temporales) para su despliegue.

### **III.3.3. Resumen de los métodos basados en esta técnica**

Como se ha podido observar a lo largo de la explicación de esta familia de técnicas, su aplicación básica es sencilla, obteniendo muy buenos resultados en términos de localización. Su único inconveniente radica la necesidad de disponer de equipos muy costosos, que puedan registrar de forma precisa las diferencias temporales entre las distintas reflexiones de la falta. Debido a esto, habitualmente este tipo de sistemas están más orientados a redes de transporte, donde el número de puntos de medida es menor, requiriéndose una menor inversión para su despliegue.

## **III.4. Resumen del capítulo**

En el presente capítulo se ha realizado una revisión de las tres familias de técnicas más comunes en el proceso de localización de falta. Para cada una de ellas se han estudiado sus principios básicos y se han revisado los trabajos más relevantes al respecto. Además, en este capítulo también se ha estudiado la problemática típica de cada una de familias, resaltando las soluciones propuestas en la literatura a cada una de ellas.

En este sentido, cada una de estas tres técnicas presenta sus ventajas e inconvenientes. Aunque a grandes rasgos, se pueden identificar los métodos de travelling wave, como los de mejor precisión, sin embargo otro factor muy importante, el económico, hace que su aplicabilidad en redes como la de distribución, donde el número de puntos de medidas es mucho mayor que en las redes de transporte, pueda ser inviable. En el otro extremo, encontramos los sistemas basados en las componentes fundamentales o fasores cuyos requerimientos

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

frecuenciales en la instrumentación son mucho menores, siendo por tanto más económicos, y pudiendo minimizar sus carencias, aumentando el número puntos de medida.

Bajo esta perspectiva, es donde se enmarca el presente trabajo de tesis, que plantea el uso de un sistema multi-terminal, basado en una red de sensores con procesando distribuido, que a partir únicamente de las medidas de las componentes fundamentales o fasores de las corriente y aprovechando las características propias de las redes subterráneas, permite determinar el punto donde se originó la falta dentro de este tipo de redes.



## IV. Sistema de localización distribuido

---

Una vez analizadas las distintas técnicas y métodos de localización de faltas más relevantes presentadas en la literatura científica, es fácil percibir que dichas técnicas o métodos aun presentan importantes limitaciones. En este sentido, en la mayoría de los casos, los métodos de localización de faltas abordan el problema desde una perspectiva de red genérica (independiente de su tipología), presentando la ventaja de resultar aplicables a cualquier tipo de red, pero que sin embargo frecuentemente, desaprovechan la posibilidad de explotar ciertas características útiles para mejorar los resultados en la localización de faltas o minimizar las necesidades de información para su aplicación.

Este hecho se pone de manifiesto en el análisis de las redes subterráneas, cada vez más presentes en entornos urbanos y las cuales presentan características específicas (distintas a las redes aéreas). Un ejemplo de estas características es la dificultad que presentan esta tipología de redes para realizar medidas de tensión, que únicamente pueden realizarse en puntos concretos de la red (generalmente puntos de consumo o generación), ya que en el resto del trazado sería necesario retirar el aislante para realizar dicha medida, quedando por tanto comprometido el aislamiento de la línea en dicho punto. Por otro lado, el cableado subterráneo también posee una vaina o malla protectora metálica, que como veremos a lo largo del presente capítulo, puede ser utilizada para mejorar los procedimientos de localización de la falta.

A lo largo del presente capítulo, se presentarán dos métodos complementarios orientados a la localización de faltas en redes de distribución subterránea. No

obstante es importante destacar que los métodos propuestos en este trabajo, no tienen como objetivo realizar la detección de las faltas (cuyas restricciones temporales son más exigente). Este trabajo se centra exclusivamente en la tarea de localización de la falta, una vez esta ha sido detectada por los relés de protección.

En este sentido, ambos métodos de localización presentan una filosofía multipunto, basada en la medida de armónicos fundamentales (ver apartado III.1.2). Sin embargo, destaca el hecho de que los dos métodos propuestos están basados únicamente en registros de la magnitud de corriente, no siendo necesaria en ningún caso los registros de la magnitud de tensión (difícil de acceder en este tipo de cableados), y que es esencial en los enfoques actualmente propuestos en la literatura (ver Capítulo III del presente trabajo). Este hecho permite mejorar enormemente su aplicabilidad en las redes de distribución subterráneas, frente a soluciones tradicionales que sí requieren este parámetro.

La razón principal de presentar dos métodos persigue combinar sus resultados, pues como vemos a lo largo de la explicación de cada uno de ellos, ambas soluciones permiten estimar la posición de una falta, frente a la mayoría de las posibles condiciones de falta típicas en este tipo de redes, pudiendo plantearse el combinar sus resultados para mejorar su estimación. Sin embargo, ambas soluciones presentan limitaciones ante algunas condiciones de falta típicas en este tipo de redes, siendo en esas situaciones donde al menos una de las dos alternativas propuestas permite obtener una solución válida, ya que dichas limitaciones no son comunes en ambos métodos.

## **IV.1. Métodos de localización propuestos**

En este apartado se detallan el planteamiento de los dos métodos de localización de faltas propuestos en el presente trabajo de tesis:

### **IV.1.1. Método de localización basado en el análisis de las corrientes de malla**

Este método propuesto, es un ejemplo claro de una técnica que explota características específicas de redes subterráneas. Concretamente, como su nombre indica, éste persigue estimar la posición de la falta empleando la información contenida en los registros de corriente que circula por la malla de los distintos tramos de cable utilizados en este tipo de redes.

En la Figura IV.1 podemos observar la estructura simplificada del cableado de una red trifásica de distribución subterránea, donde una sección "f" se ve afectada por una falta. Dicha sección o segmento se encuentra ubicado entre dos centros de

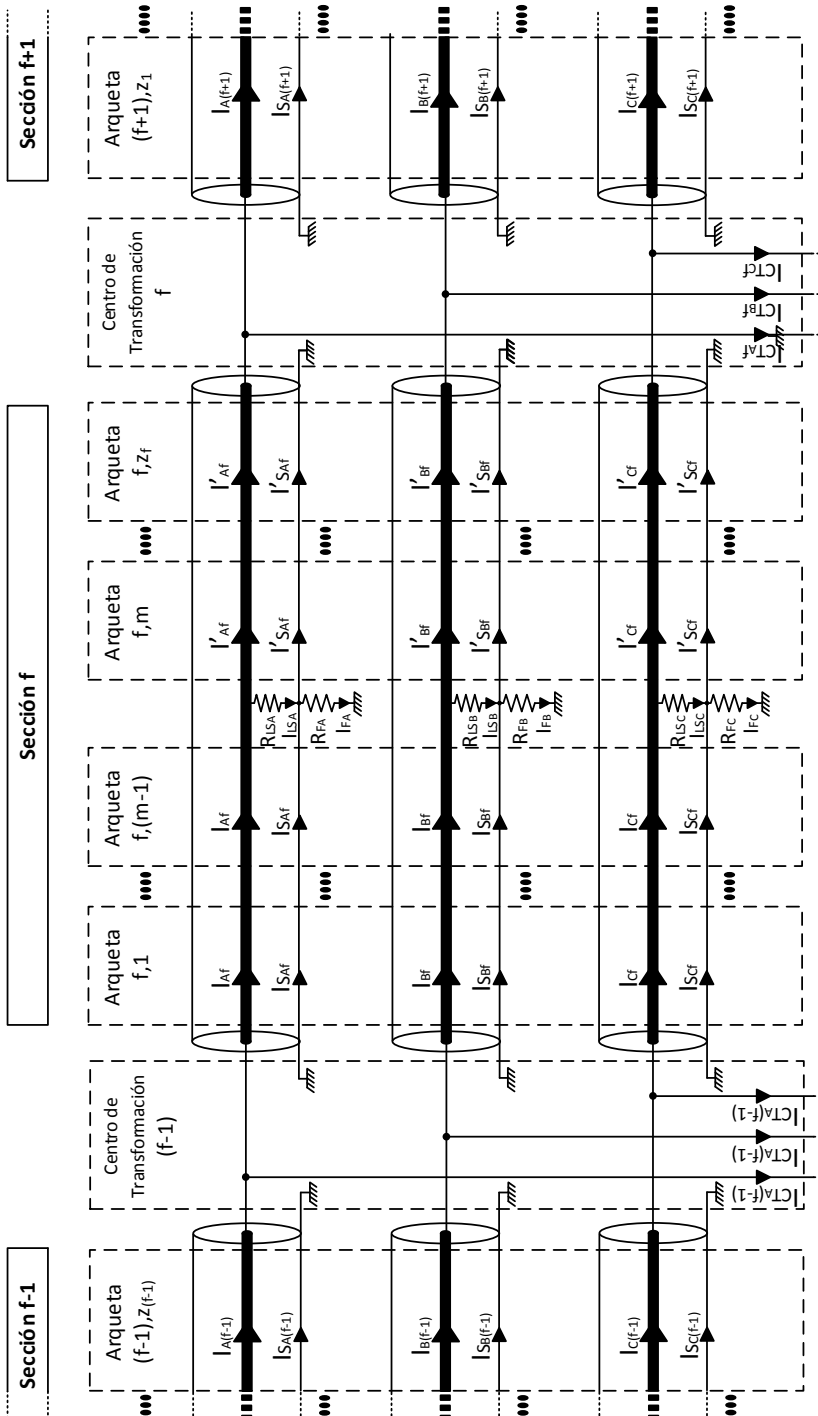


Figura IV.1: Esquema básico de una sección de línea subterránea afectada por una falla.

transformación (o puntos de consumo/generación), “CT<sub>t+1</sub>” y “CT<sub>t</sub>”, y las faltas son caracterizadas por los conjuntos de resistencias  $R_{LSx}$  (que modelan la posible falta de aislamiento entre el conductor y la malla en cada fase) y  $R_{Fx}$  (que modelan el posible contacto entre el punto de falta y tierra). Adicionalmente, en esta figura, también es interesante destacar características típicas de las topologías subterráneas, como son la presencia de arquetas de registro (ubicadas a lo largo del trazado de la línea) y la puesta a tierra de las mallas en los distintos centros de transformación de la misma.

Precisamente esta última característica es la que explota el método presentado en este apartado. Si se observa cada uno de los segmentos que componen la red, analizando de forma independiente cada una de las fases (ver Figura IV.2), es posible determinar la posición de la falta según la siguiente expresión (IV.1), propia en los planteamientos de localización multipunto típicos en la literatura (ver apartado III.1.2).

$$V_{F_x} = V_{i_x} - m \cdot I_{x_f} \cdot Z_l \cdot L_{sec} = V_{o_x} - (1 - m) \cdot I'_{x_f} \cdot Z_l \cdot L_{sec} \quad (IV.1)$$

Obviamente en este planteamiento para poder determinar la posición de la falta dentro del segmento, es necesario conocer la impedancia por unidad de longitud ( $Z_l$ ) y la longitud de la sección ( $L_{sec}$ ), las corrientes de entrada por ambos extremos ( $I_{x_f}$  y  $I'_{x_f}$ ), y las tensiones aplicadas en cada uno de estos. La principal ventaja de esta filosofía es la independencia del valor de resistencia de falta en el proceso de estimación, no influyendo su valor directamente en la precisión de la estimación de la posición, tal y como sucede en los métodos de un único terminal (ver apartado III.1.1)

Concretamente, en este método se propone utilizar un enfoque similar, pero en vez de emplear la corriente que circula por la línea, se propone utilizar la corriente que circula por la malla o vaina exterior del cable ( $I_{Sx_f}$  y  $I'_{Sx_f}$ ). Este enfoque presenta como principal ventaja el hecho de que al estar ambos extremos de la línea conectados a tierra, es posible asumir que su diferencia de potencial es nula. Esta hipótesis es habitual en los métodos multipunto convencionales, ya que las medidas de tensión

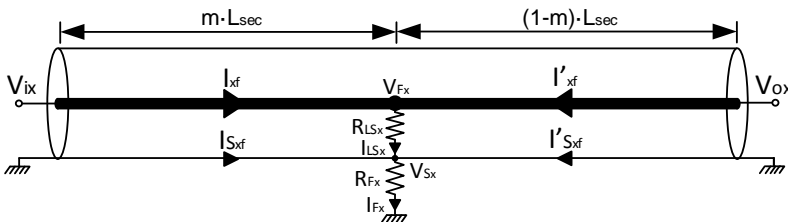


Figura IV.2: Análisis por fase de las ecuaciones de falta en un cableado subterráneo.

utilizadas en estos, se registran utilizando como referencia la tierra local cada punto del trazado. Gracias a esto, la tensión en  $V_{S_x}$ , quedaría descrita según:

$$V_{S_x} = -m \cdot I_{Sxf} \cdot Z_{lsh} \cdot L_{sec} = -(1-m) \cdot I'_{Sxf} \cdot Z_{lsh} \cdot L_{sec} \quad (IV.2)$$

Reescribiendo la expresión (IV.2), despejando la posición normalizada ( $m$ ), se obtiene:

$$m = \frac{I'_{Sxf} \cdot Z_{lsh} \cdot L_{sec}}{(I_{Sxf} + I'_{Sxf}) \cdot Z_{lsh} \cdot L_{sec}} = \frac{I'_{Sxf}}{I_{Sxf} + I'_{Sxf}} \quad (IV.3)$$

Otra ventaja del presente método propuesto, se puede extraer de la expresión (IV.3), en la que asumiendo que en esa sección de la línea, las características del cable ( $Z_{lsh}$ ) son homogéneas (se utiliza el mismo modelo de cable en toda la sección), el cálculo de la posición es independiente de dichas características, a diferencia de lo que sucede con los métodos multipunto tradicionales, que sí lo requieren.

Así pues, la expresión (IV.3) confirma el hecho de que el método propuesto únicamente requiere medidas de corriente para estimar la posición de la falta. Inicialmente, como sucede con los métodos de localización multipunto, para poder operar con ella de forma coherente, esta información ha de estar sincronizada (ver apartado III.1.2). Sin embargo, simplificando en (IV.2) los términos comunes en las dos partes de igualdad, según (IV.4), también es posible deducir otra característica muy interesante del presente método.

$$m \cdot I_{Sxf} = (1-m) \cdot I'_{Sxf} \quad (IV.4)$$

Analizando el comportamiento fasorial de (IV.4) y teniendo en cuenta que  $m$  es un número real puro, dicha igualdad solo se cumple si  $I_{Sxf}$  y  $I'_{Sxf}$  tiene la misma fase. Con lo que la expresión del cálculo de la posición de la falta ( $m$ ) puede ser reescrita según (IV.5) donde únicamente es necesario garantizar que ambas medidas de corriente correspondan a la situación de falta, condición mucho menos restrictiva que la necesidad de sincronización de los métodos de localización multipunto tradicionales.

$$m = \frac{|I'_{Sxf}|}{|I_{Sxf}| + |I'_{Sxf}|} \quad (IV.5)$$

Otra característica, que distingue a esta estrategia de las tradicionales, es que al utilizar la corriente de retorno de malla y no la corriente de la línea, en el cálculo de la posición no hay que realizar ningún tipo de compensación de la corriente de carga, debiendo ser dicha corriente teóricamente nula en un estado sin falta. Este hecho puede ser explotado incluso para realizar las tareas de detección, pudiendo aumentar la sensibilidad de la misma. Realmente esta corriente en funcionamiento

normal no es nula, existe una corriente asociada a las capacidades en derivación que dependen de la tensión aplicada, pero cuyo valor es habitualmente muy pequeño y despreciable frente a la corriente de falta.

Obviamente, la limitación de este método como es lógico vendrá impuesta por la imposibilidad de medir correctamente los parámetros utilizados en la estimación. Concretamente si la corriente de retorno por malla es muy pequeña (del orden de la corriente prefalta), la estimación no será fiable. Atendiendo al esquema de la Figura IV.2, se pueden identificar dos casos límite:

- Si  $R_{Fx}$  es muy pequeña en comparación con la resistencia de la malla. Por tanto el camino de retorno menos resistivo será a través de tierra, circulando muy poca corriente de falta por la malla.
- Si  $R_{LSx}$  es muy grande. El efecto de la alta es muy pequeño (falta de alta impedancia), llegando a no poder ser suficiente para su localización.

Adicionalmente también se ha barajado la posibilidad de otras topologías de red de distribución, que se analizarán en detalle en el siguiente apartado:

#### **IV.1.1.1. Variantes propuestas sobre el método**

Para este método se ha planteado el análisis de dos variantes de aplicación (asociadas a dos configuraciones distintas) que condicionarían el análisis anteriormente propuesto.

##### ***IV.1.1.1.1. Aplicación del método sobre una sección con bifurcación***

Esta variante responde a una topología en la que se analiza una sección de líneas que presenta una bifurcación a lo largo de la misma. No se debe confundir con una situación en la que un CT conecta con otros a través de distintas sesiones de la línea (utilizando una sección para cada uno de ellos). En este caso, un CT conecta con otros dos a través de una única sección que en una posición intermedia sufre una bifurcación para conectar varios CTs (no existiendo ningún registro intermedio de este hecho). Un ejemplo de este hecho lo encontramos en la Figura IV.3, donde se estudia una falta en la subsección 1, y de la cual se pueden extraer las siguientes expresiones:

$$V_{S_x} = -I_{Sxf1} \cdot m \cdot L_1 \cdot Z_{lsh} \quad (IV.6)$$

$$V_{S_x} = -(I_{Sxf2} + I_{Sxf3}) \cdot (1-m) \cdot L_1 \cdot Z_{lsh} - I_{Sxf2} \cdot L_2 \cdot Z_{lsh} \quad (IV.7)$$

$$V_{S_x} = -(I_{Sxf2} + I_{Sxf3}) \cdot (1-m) \cdot L_1 \cdot Z_{lsh} - I_{Sxf3} \cdot L_3 \cdot Z_{lsh} \quad (IV.8)$$

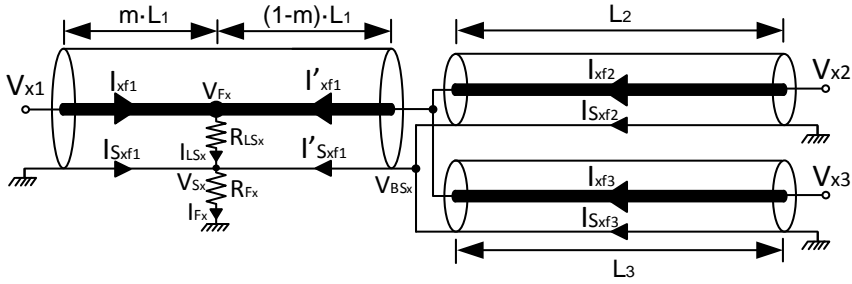


Figura IV.3: Análisis de un caso de falta en una sección con bifurcación.  
(falta en subsección 1)

Donde  $m$  es la posición normalizada dentro del segmento afectado,  $L_x$  es la longitud total de cada segmento y  $Z_{lsh}$  es la impedancia por unidad de longitud presentada por la malla (común para todos los segmentos, al ser el mismo tipo de cable). Finalmente, los fasores de corrientes  $I_{Sxf}$ , que representan las corrientes que circulan por las mallas de los distintos segmentos.

Así pues, igualando las expresiones (IV.7) y (IV.8), se obtiene la siguiente igualdad:

$$I_{Sxf3} \cdot L_3 = I_{Sxf2} \cdot L_2 \quad (IV.9)$$

De (IV.9) es posible sacar dos conclusiones:

- Esta igualdad ha de cumplirse si la falta se encuentra ubicada en el segmento 1. Por tanto, dicha igualdad puede ser utilizada para verificar dicha hipótesis.
- De un análisis fasorial de esta expresión, y teniendo en cuenta que  $L_2$  y  $L_3$  son números reales puros, se puede deducir que  $I_{Sxf2}$  y  $I_{Sxf3}$  tienen la misma fase.

Igualando ahora (IV.6) y (IV.7), o (IV.6) y (IV.8), se obtiene:

$$m \cdot L_1 \cdot I_{Sxf1} = [(1-m) \cdot L_1 + L_2] \cdot I_{Sxf2} + [(1-m) \cdot L_1] \cdot I_{Sxf3} \quad (IV.10)$$

$$m \cdot L_1 \cdot I_{Sxf1} = [(1-m) \cdot L_1 + L_3] \cdot I_{Sxf3} + [(1-m) \cdot L_1] \cdot I_{Sxf2} \quad (IV.11)$$

Pudiendo deducirse las siguientes dos expresiones para obtener la unitaria  $m$ :

$$m = \frac{L_1 \cdot I_{Sxf3} + (L_1 + L_2) \cdot I_{Sxf2}}{L_1 \cdot (I_{Sxf1} + I_{Sxf2} + I_{Sxf3})} \quad (IV.12)$$

$$m = \frac{L_1 \cdot I_{Sxf2} + (L_3 + L_1) \cdot I_{Sxf3}}{L_1 \cdot (I_{Sxf1} + I_{Sxf2} + I_{Sxf3})} \quad (IV.13)$$

En base a estas dos expresiones, teniendo en cuenta lo deducido anteriormente de (IV.9), donde se demostraba que  $I_{Sxf2}$  y  $I_{Sxf3}$  tienen la misma fase, y que en (IV.10) o en (IV.11) todos los términos que multiplican a  $I_{Sxf1}$ ,  $I_{Sxf2}$  y  $I_{Sxf3}$  son valores reales puros, es también posible asegurar, que estas tres corrientes tienen la misma fase,

con lo que sus módulos pueden agregarse de forma directa. Esto permite reescribir (IV.12) y (IV.13) utilizando únicamente los módulos de las tres corrientes de malla, eliminando la restricción de disponer de medidas sincronizadas (como sucedía en el análisis sin ninguna bifurcación). En este sentido, la posición normalizada  $m$ , quedaría descrita según las siguientes expresiones:

$$m = \frac{|I_{Sxf3}| + \left(1 + \frac{L_2}{L_1}\right) |I_{Sxf2}|}{|I_{Sxf1}| + |I_{Sxf2}| + |I_{Sxf3}|} = \frac{|I_{Sxf2}| + \left(1 + \frac{L_3}{L_1}\right) |I_{Sxf3}|}{|I_{Sxf1}| + |I_{Sxf2}| + |I_{Sxf3}|} \quad (IV.14)$$

Extrapolando todo lo anteriormente explicado a un caso general de una bifurcación con  $n$  segmentos implicados, se obtendrían  $n-1$  expresiones equivalentes (una para cada valor posible de  $j$ ), que permitirían obtener la posición unitaria ( $m$ ) dentro de la sección afectada  $k$ :

$$m = \frac{\frac{L_j}{L_k} |I_{Sxfj}| + \sum_{i \neq k}^n |I_{Sxfi}|}{\sum_{i=1}^n |I_{Sxfi}|} ; \quad \forall j \neq k \quad (IV.15)$$

Teniendo la siguiente condición para poder asegurar que  $k$  es el segmento afectado:

$$I_{Sxfi} \cdot L_i = I_{Sxfj} \cdot L_j ; \quad \begin{cases} \forall i \neq k \\ \forall j \neq k \end{cases} \quad (IV.16)$$

#### IV.1.1.1.2. Aplicación del método sobre una sección con distintos modelos de cable

Esta segunda variante responde a una topología en la que por algún motivo de mantenimiento o meramente constructivo, la sección de línea bajo análisis presenta dos tipologías de cable. La Figura IV.4 representa las dos posibilidades que pueden darse ante esta situación: a) falta en la subsección del modelo 1 de cable y b) falta en la subsección 2. Centrándonos en el primero de estos casos, se pueden plantear las siguientes expresiones:

$$V_{S_x} = -I_{Sxf} \cdot [Z_{lsh1} \cdot L_1 + (m \cdot L_2) \cdot Z_{lsh2}] = -I'_{Sxf} \cdot (1-m) \cdot Z_{lsh2} \cdot L_2 \quad (IV.17)$$

De esta expresión es posible despejar la posición  $m$ :

$$m = \frac{I'_{Sxf} \cdot Z_{lsh2} \cdot L_2 - I_{Sxf} \cdot Z_{lsh1} \cdot L_1}{(I_{Sxf} + I'_{Sxf}) \cdot Z_{lsh2} \cdot L_2} \quad (IV.18)$$

Si  $m$  se estima en un valor mayor que la unidad, esto implicará que la posición de la falta está fuera de la subsección, teniendo que evaluarse la otra alternativa.



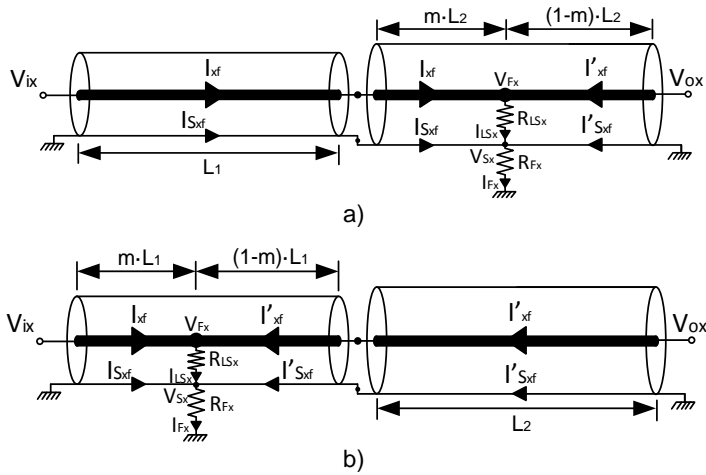


Figura IV.4: Análisis de sección con distintos modelos de cable.  
a) Falta en subsección 1, b) Falta en subsección 2

$$V_{S_x} = -I_{Sxf} \cdot m \cdot L_1 \cdot Z_{lsh1} = -I'_{Sxf} \cdot \left[ (1-m) \cdot Z_{lsh1} \cdot L_1 + Z_{lsh2} \cdot L_2 \right] \quad (IV.19)$$

De esta expresión es posible despejar  $m$ , quedando:

$$m = \frac{I'_{Sxf} \cdot Z_{lsh1} \cdot L_1 + I'_{Sxf} \cdot Z_{lsh2} \cdot L_2}{(I_{Sxf} + I'_{Sxf}) \cdot Z_{lsh1} \cdot L_1} \quad (IV.20)$$

Al igual que sucedía en el caso anterior, el valor de la posición  $m$  debe ser coherente con la hipótesis de que la falta se encuentra dentro del subsegmento evaluado. Si  $m$  es menor que cero, indicaría que la falta se encuentra en el segmento anterior.

En base a un análisis fasorial de las expresiones que definen la posición (IV.18) y (IV.20), es fácil identificar, a diferencia de lo que sucedía con el caso anterior, ahora no es posible garantizar que  $I_{Sxf}$  y  $I'_{Sxf}$  tengan la misma fase, con lo que para realizar el cálculo de la posición, en esta ocasión se requiere que los dos fasores de corriente ( $I_{Sxf}$  y  $I'_{Sxf}$ ) sí estén sincronizados.

Este análisis es extensible a topologías de secciones más complejas, con un número más elevado de subsecciones de cables, aumentando con esto el número de casos posibles a tener en cuenta.

#### IV.1.1.2. Descripción del entorno y necesidades para su aplicación

Una vez explicado y justificado el primero de los métodos de localización de faltas en líneas subterráneas propuestos en el presente trabajo de tesis, se realizará una breve descripción de la infraestructura de medida necesaria para su aplicación.

Como se ha podido ver a lo largo de su explicación, este método se basa únicamente en registros de la magnitud de la corriente que circula por la malla o vaina de protección del cableado subterráneo que confirman la línea de distribución de media tensión. En este sentido, esta filosofía se apoya sobre la estructura de conexionado típica presente en los CTs que se encuentran repartidos a lo largo de un sistema de distribución (ver Figura IV.5), y en los que la malla de dicho cableado de MT es conectada a tierra.

Para cada CT, inicialmente se podría plantear la necesidad de un registrador por cada cable que llega hasta éste. Sin embargo, si se asume que nunca se va a producir una falta que involucre simultáneamente distintos segmentos de línea (no confundir este hecho, con distintas fases de una misma sección), podemos utilizar un único sensor que registre la suma de las corrientes que circulan por todas ellas (en rojo, en Figura IV.5). Reduciendo el análisis a un dato de corriente por CT, identificando el segmento afectado mediante las dos medidas de corriente de malla en sus extremos.

Para esta filosofía se propone una estructura descentralizada, en la cual cada nodo sensor de corriente de masa de CT, funciona de forma autónoma, pudiendo preguntar a sus vecinos si han detectado alguna sobrecorriente, y en caso afirmativo cuál sería su magnitud, permitiendo con ambos valores obtener la posición de la falta según la expresión (IV.5), que será transmitido al OMS o centro de control pertinente. Obviamente, según este procedimiento obtendremos dos notificaciones, una por cada extremo de la sección afectada, solventándose con esto tanto el problema de identificación de la sección como de la posición dentro de esta.

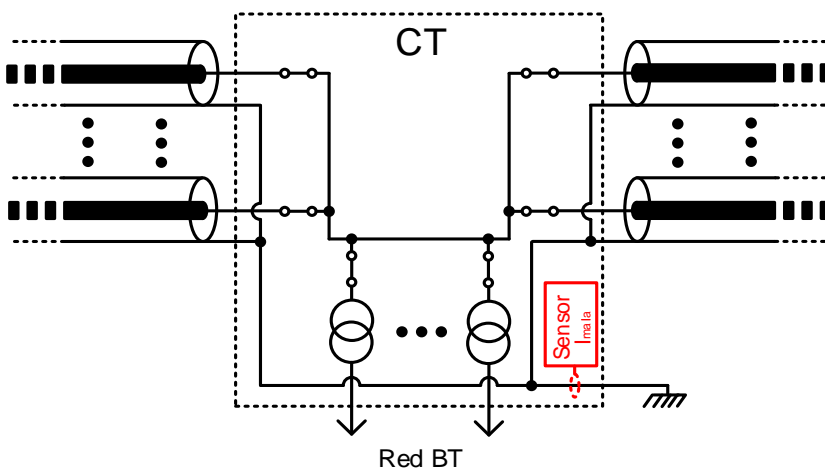


Figura IV.5: Esquema básico del conexionado típico en MT de CT genérico. (en rojo, el sensor propuesto para la implementación del método propuesto)

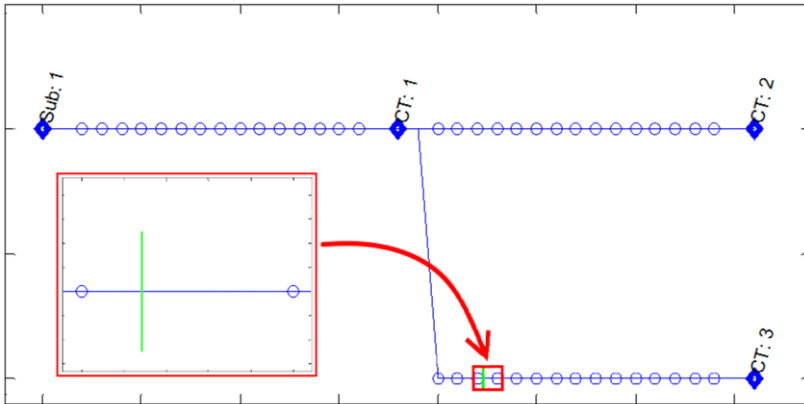


Figura IV.6: Ejemplo de localización en una red simple (1<sup>er</sup> método propuesto).

Un ejemplo de la aplicación del presente método puede observarse en la Figura IV.6, donde este ha determinado la posición de una falta que ha sido estimada en el 20% del segmento entre los CTs 1 y 3.

El funcionamiento que debe realizar cada sensor, puede expresarse en un algoritmo con las siguientes cuatro fases o etapas:

- 1) Cada sensor está continuamente monitorizando la corriente que se deriva a tierra en cada CT, detectando una posible situación de falta cuando esta eleva sensiblemente por encima de su valor habitual (muy pequeño en caso prefalta). Una vez estimada la presencia de una falta, tras un breve tiempo, el algoritmo pasa a la fase siguiente.
- 2) Cada sensor que ha detectado la falta, pregunta a los sensores de sus CTs vecinos si ellos han detectado una posible falta, en caso afirmativo estos le devolverán el módulo de la corriente detectada.
- 3) Una vez recogidos todos los datos de todos los sensores vecinos, cada sensor determinará la sección afectada y estimará, aplicando (IV.5), la posición del fallo dentro de ésta.
- 4) Tras estimar la posición de la falta, únicamente queda que el sensor (o los sensores) que ha localizado la falta, transmita esta información al centro de control o al OMS, para que este tome las medidas pertinentes.

Adicionalmente, cualquier nodo estará siempre preparado para responder en caso de ser interrogado acerca de si han identificado un caso de falta y en caso afirmativo, el valor de su corriente registrada.

Debido a la reducida cantidad de información intercambiada (módulo de la corriente, en caso de falta), el sistema puede apoyarse inicialmente sobre cualquiera de los sistemas de comunicación típicos presente en un CT, no requiriéndose infraestructura de comunicación adicional si esta existe.

### IV.1.1.3. Resumen de las ventajas e inconvenientes del método propuesto

Como se ha comentado anteriormente, el primero de los dos métodos propuestos permite estimar la localización de la falta dentro de una red de distribución subterránea de media tensión. Al estar basado en una filosofía multiterminal o multipunto, este método aprovecha sus principales ventajas; es compatible con sistemas con generación distribuida y los resultados de su estimación en la posición de la falta son mucho menos sensibles a valores elevados de la resistencia de falta.

Así pues, el presente método propuesto añade a estas las siguientes ventajas:

- Únicamente se requieren registros de corriente (no de tensión), reduciéndose con esto la instrumentación necesaria para su aplicabilidad.
- No se requieren medidas sincronizadas, puesto que el cálculo se realiza en base al módulo de los fasores de corriente, independientemente de su fase.
- El funcionamiento del sistema propuesto es compatible tanto con una filosofía de procesamiento distribuido (algoritmo propuesto) como con una filosofía centralizada, en el que toda la información es transmitida al centro de control, donde se implementa al cálculo de la posición.
- El sistema propuesto se apoya sobre el esquema de conexionado típico en un centro de transformación, no requiriendo llevar a cabo ningún cambio en ésta.
- El sistema propuesto no requiere un gran ancho de banda en las comunicaciones, por lo que puede aprovechar los sistemas de comunicación existentes.

Como limitaciones principales que posee el presente método, destacan:

- El sistema propuesto únicamente es aplicable a redes subterráneas (con cableado apantallado).
- El sistema propuesto únicamente puede estimar la posición de la falta si la resistencia entre conductor y malla no presenta un valor muy elevado, que se traduzca en una corriente de malla poco significativa.
- El sistema propuesto únicamente puede estimar la posición de la falta si la resistencia entre malla y tierra no presenta un valor muy reducido, que se traduzca en una corriente de malla poco significativa.

### IV.1.2. Método de localización basado en el balance neto de corrientes

El segundo de los métodos propuesto en el presente trabajo de tesis, como su nombre indica, consiste en realizar un balance neto de corriente a lo largo de la línea de distribución. Para esto, este método plantea realizar el análisis de corriente en dos puntos contiguos de un mismo conductor, de tal forma que en circunstancias normales (sin falta), al no existir ninguna derivación entre ambos puntos de medida, la diferencia neta entre ambos valores de corriente ha de ser nula. En caso contrario, dicha diferencia de corriente únicamente puede ser debida a una derivación asociada a algún tipo de falta.

Esta filosofía de análisis puede ser aplicada a cualquier tipo de red, aérea o subterránea, analizando cada conductor o fase por separado, permitiendo así identificar cualquier posible derivación a tierra, acotando su posición entre sendos puntos de medida. Sin embargo, en el caso de redes subterráneas como las que se abordan en el presente trabajo, estas medidas presentan algunas características especiales. Un ejemplo de estas podemos observarlas en la Figura IV.7, donde se representa un tramo tipo de cable subterráneo, monitorizado en dos puntos adyacentes. En esta figura, como ya se comentó en el apartado anterior, un cable subterráneo posee una malla o vaina protectora, por la que en condiciones normales no ha de circular corriente (o circula una corriente muy pequeña asociada a la propia capacidad del cable), pero que en caso de falta dicha corriente no es nula. Esto hace que las ecuaciones asociadas a este estudio sean:

$$I_{x(i)} = I_{x(j)} + I_{LSx} \quad (IV.21)$$

$$I_{Sx(i)} = I_{Sx(j)} - I_{LSx} + I_{Fx} \quad (IV.22)$$

En la Figura IV.7, también se pone de manifiesto otro hecho asociado a las características contractivas del cableado subterráneo, y es su imposibilidad de medir únicamente la corriente del conductor ( $I_x$ ), sin penetrar o cortar su aislante. Bajo esta

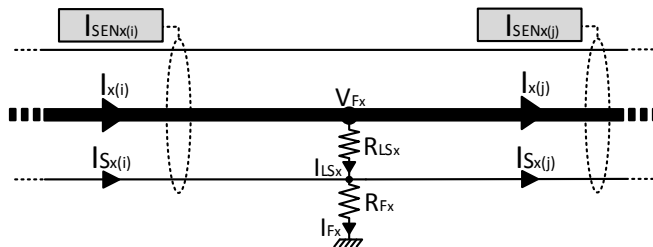


Figura IV.7: Balance neto de corriente a lo largo de un cable subterráneo.

premisa la única posibilidad es utilizar medidas por inducción magnéticas[130] (ej: transformadores de corriente o Bobina de Rogowski), asumiendo que dichos sensores miden la suma neta de corrientes que circulan por su interior, su expresión vendría definida según:

$$I_{SENx(i)} = I_{x(i)} + I_{Sx(i)} \quad (\text{IV.23})$$

Así pues, analizando (IV.21) y (IV.22) en base a la expresión de la corriente registrada por un sensor (IV.23), es posible reescribir dichas expresiones, en función de las corrientes registradas.

$$\left( I_{Sx(i)} + I_{x(i)} \right) - \left( I_{Sx(j)} + I_{x(j)} \right) = I_{Fx} \quad (\text{IV.24})$$

$$I_{SENx(i)} - I_{SENx(j)} = I_{Fx} \quad (\text{IV.25})$$

Se demuestra por tanto que la diferencia entre los registros de los dos sensores, permite caracterizar la corriente que se deriva a tierra, pudiendo utilizar este hecho para identificar el segmento de línea afectado. Sin embargo, la expresión del balance de corriente (IV.25), también pone de manifiesto el principal inconveniente que posee este método, en el cual, para su correcto funcionamiento debe existir una corriente mínima de derivación directa a tierra en el punto de fallo ( $I_{Fx} \neq 0$ ). Por tanto, si la falta se produce por un fallo de aislamiento interno del cable (ver Figura IV.8), donde la corriente de fallo circula únicamente a través de la malla ( $I_{LSx} \neq 0$  y  $I_{Fx} = 0$ ), el balance de corrientes registrado por los dos sensores es nulo (ver Figura IV.8b y Figura IV.8c), no pudiéndose obtener un resultado de posición de la falta correcto.

$$I_x(i) - I_x(j) = I_{Sx}(j) - I_{Sx}(i) = I_{RLSx} \quad (\text{IV.26})$$

$$I_x(i) + I_{Sx}(i) = I_{Sx}(j) + I_x(j) \quad (\text{IV.27})$$

Dada la expresión de cada sensor:

$$I_{SENx(i)} = I_x(i) + I_{Sx}(i) \quad (\text{IV.28})$$

$$I_{SENx(j)} = I_x(j) + I_{Sx}(j) \quad (\text{IV.29})$$

Sustituyendo en (IV.27), (IV.28) y (IV.29) se deduce que:

$$I_{SENx(i)} = I_{SENx(j)} \quad (\text{IV.30})$$

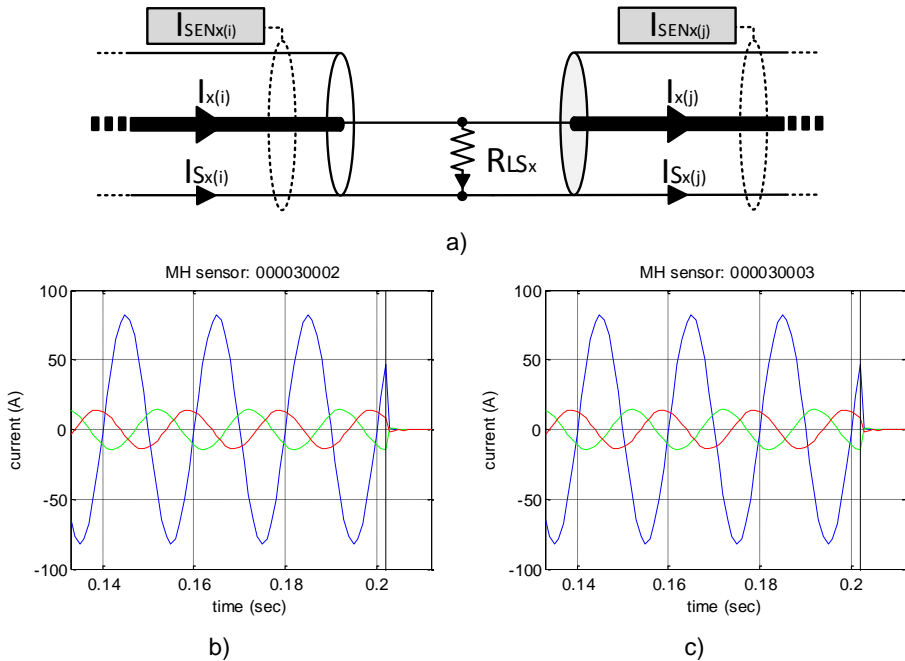


Figura IV.8: Análisis del flujo neto de corriente en un fallo de aislamiento interno.  
 a) Esquema, b) Ejemplo de corriente registrada del sensor anterior al punto de falta,  
 c) Ejemplo de corriente registrada del sensor posterior al punto de falta.

Adicionalmente, de la expresión (IV.25) también pueden extraerse dos características que han de tener los sensores utilizados en este método. Por un lado los sensores han de disponer de un canal de comunicación para intercambiar dicha información, y por otro, ambos sensores han de estar sincronizados, para poder realizarse dicho balance de corriente de forma coherente. Estas dos restricciones serán estudiadas más detalladamente en el apartado IV.1.2.2.1.

Hay que tener en cuenta que la filosofía de la localización de faltas en este método varía sustancialmente de lo propuesto, tanto en el método anterior como en los métodos descritos en el estado del arte. Concretamente, este método de localización de faltas, basa sus resultados en la cantidad y posición de los sensores desplegados, permitiendo identificar la posición de la falta como el segmento de línea formado entre los dos puntos de medidas que detectan el desbalance de corriente, no siendo posible determinar el punto exacto entre estos. Obviamente, esto se traduce en el hecho de que la precisión del método está fuertemente condicionada por la granularidad espacial de la medida, siendo ésta mayor cuanto mayor sea el número de sensores desplegados.

Así pues, en contrapartida, como principal ventaja de este método se destaca su capacidad de funcionar en sistemas con generación distribuida, ya que permite el análisis del flujo de corriente indistintamente de la dirección en la que esta fluye. También destaca por ser un método simple, que únicamente requiere la interacción de cada nodo con sus vecinos directos. En este sentido, el método propuesto también destaca por su elevada robustez, ya que su filosofía distribuida permite que si por cualquier motivo, alguno de los sensores deja de funcionar correctamente (por avería o fallos de comunicación), el sistema de localización sigue funcionando, estableciéndose ahora la comunicación con el siguiente vecino adyacente en esa dirección del trazado, aumentando la longitud del segmento analizado. Obviamente, este aumento de longitud se traduce en una merma puntual de la precisión del sistema, si dicho segmento es el afectado por la falta. No obstante, éste sigue dando una estimación de la misma.

Como una solución de compromiso entre funcionalidad y precisión, en este trabajo se propone el despliegue representado en la Figura IV.9. Concretamente, en ésta se plantea aprovechar las arquetas de registro, típicas en el trazado de una red de distribución subterránea, para ubicar un sensor en cada una. Como ejemplo se plantea una sección genérica  $f$ , que conecta los CTs  $f-1$  y  $f$ . Dicha sección  $f$  tiene repetido a lo largo de su trazado un número  $Z_f$  arquetas, en cada una de las cuales sería ubicado un sensor trifásico ( $I_{SENx f,i}$ ), donde  $i$  es el identificador de la arqueta ( $1...Z_f$ ) y  $x$  es la fase medida (A, B o C).

Esta estrategia se plantea siguiendo un procedimiento típico en las tareas de mantenimiento, en la que en caso de falta, se sustituye el segmento de cable afectado entre las dos arquetas que confinan a éste, utilizando dichas arquetas para realizar los empalmes con el nuevo tramo de cable.

Como característica adicional, se destaca el hecho de que esta nueva red de sensores no tiene que estar orientada únicamente a las magnitudes eléctricas utilizadas en el presente algoritmo de localización. Estos nuevos sensores podrían también registrar otras magnitudes físicas relacionadas con la degradación del cableado (como humedad o temperatura), permitiendo realizar estudios de mantenimiento predictivo. Por otro lado, también podrían ser interesantes otras magnitudes relacionadas con la seguridad e intrusismo (como iluminación o sonido), permitiendo así controlar el acceso en arquetas de registro.

#### **IV.1.2.1. Variantes propuestas sobre el método**

Siguiendo con el análisis realizado en el primero de los métodos del presente trabajo, en este segundo método también se ha optado por revisar las dos mismas variantes



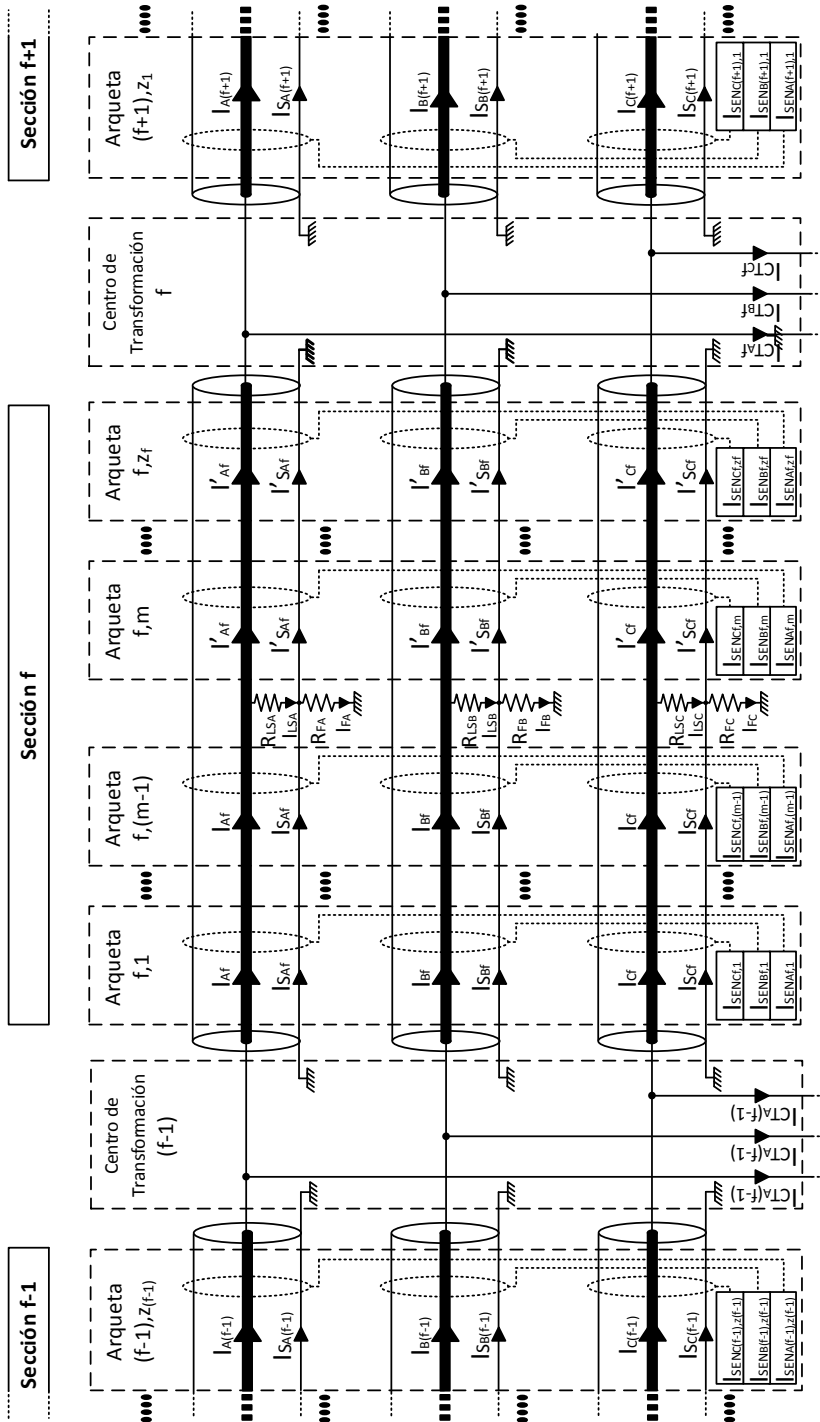


Figura IV.9: Despliegue de sensores de balance de corriente en una línea subterránea tipo.

o caso de aplicación (línea con bifurcación y o varios tipos de cable), identificando las diferencias asociadas a cada uno de ellos:

#### IV.1.2.1.1. Aplicación del método sobre una sección con bifurcación

Como en el método anterior, este apartado muestra el análisis cuando la sección afectada sufre algún tipo de bifurcación a lo largo de su trazado. En este sentido, el análisis del sensor será distinto según el sensor esté antes o después de ésta:

##### Balance del sensor anterior a la bifurcación

Atendiendo a la Figura IV.10a, y teniendo en cuenta la posición del sensor analizado, se puede demostrar que los términos implicados en el balance de corriente se describe según:

$$I_{SENSOR} = I_{SENx(f,i)} \quad (IV.31) \quad I_{VECINOS} = \sum_{k=1}^{np} I_{SENx(f,i+1,k)} \quad (IV.32)$$

##### Balance de cada sensor posterior a la bifurcación

Atendiendo ahora a la Figura IV.10b, y teniendo en cuenta la posición del sensor genérico analizado j, se puede demostrar que los términos implicados en el balance de corriente se describen según:

$$I_{SENSOR} = I_{SENx(f,ij+1,j)} \quad (IV.33) \quad I_{VECINOS} = I_{SENx(f,i)} - \sum_{k \neq 1} I_{SENx(f,i+1,k)} \quad (IV.34)$$

En ambos casos la condición para la detección de la falta vendrá definida según la expresión (IV.35), donde  $\Delta_{max}$  representa el umbral de detección:

$$|I_{SENSOR} - I_{VECINOS}| < \Delta_{max} \quad (IV.35)$$

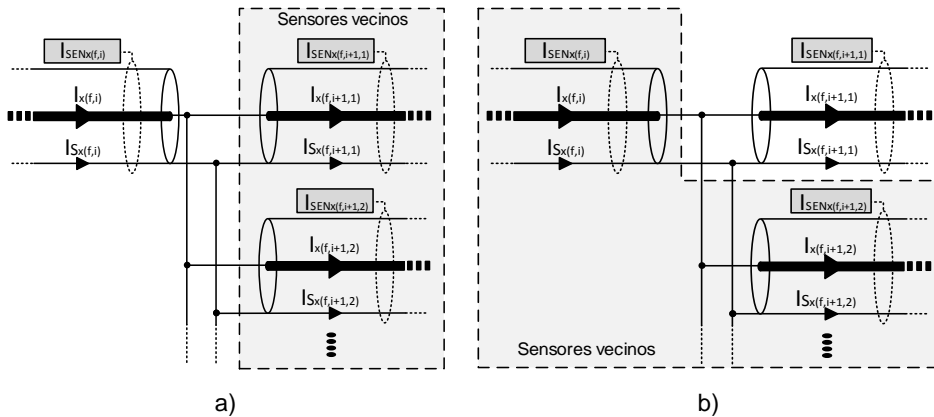


Figura IV.10: Balance neto de corriente en un cable subterráneo con bifurcación.

**IV.1.2.1.2. Aplicación del método sobre una sección con distintos modelos de cable.**

La segunda variante, representa la posibilidad de que existan distintas tipologías de cable a lo largo de la sección analizada. Sin embargo, debido al tipo de análisis aplicado en este método (balance neto de corriente), en el cual se analizan únicamente los flujos de corriente, se demuestra que los parámetros de línea no influyen en las expresiones involucradas en éste. Por tanto no es necesario realizar ninguna distinción ante esta variante.

**IV.1.2.2. Descripción del entorno y necesidades para su aplicación**

Una vez explicado y justificado el segundo de los métodos de localización de faltas en líneas subterráneas, propuestos en el presente trabajo de tesis, se realizará una breve descripción de la infraestructura de medida necesaria para la aplicación de éste.

Como se ha podido ver a lo largo de su explicación, este método se basa en el procesado colaborativo de los nodos ubicados a lo largo de la línea de distribución (en cada arqueta de registro). Concretamente, cada nodo intercambia información con sus nodos vecinos (nodos contiguos, de una misma sección de línea), realizando un balance neto de corriente, permitiendo así detectar una posible fuga de corriente entre las arquetas donde están ubicados sendos sensores. En la Figura IV.11 es posible observar un ejemplo de aplicación este método, para la localización de una falta, dentro de una red simple. En este caso el método estima la posición de la falta en el segmento de línea confinado entre las dos arquetas de registro, donde se encuentran los nodos sensores 10003 y 10004.

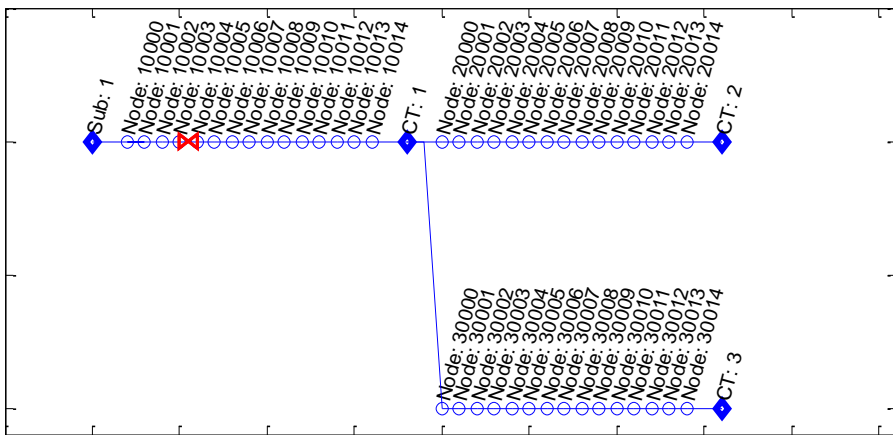


Figura IV.11: Ejemplo de localización en una red simple (2º método propuesto).

El funcionamiento que debe realizar cada sensor se implementa según un algoritmo de análisis que se realiza en tres etapas básicas:

- 1) Cada sensor está continuamente monitorizando la corriente neta de la línea que circula por el tramo de línea que monitoriza. Cuando la corriente por una fase (o varias) se desvía de su valor habitual (según un factor umbral), el sensor contempla una posible situación de falta. Esta situación de falta se confirma si pasado un tiempo definido (típicamente 100ms, 5 ciclos) la corriente se hace nula, debido a la desconexión del relé de cabecera (ver ejemplo en Figura IV.12a). Una vez confirmada la falta, en base a esto, el nodo sensor puede determinar el tipo de falta, y tras un breve tiempo, el algoritmo pasa a la fase siguiente.
- 2) Cada sensor que ha detectado la falta, pregunta a sus vecinos por el fasor de corriente que ellos han registrado, e implementa el balance neto de corriente con éste. Si se detecta un desbalance de corriente, se puede determinar que existe una derivación a tierra entre ambos sensores. Un ejemplo de este hecho puede verse en los ejemplos de las Figura IV.12b y Figura IV.12c.

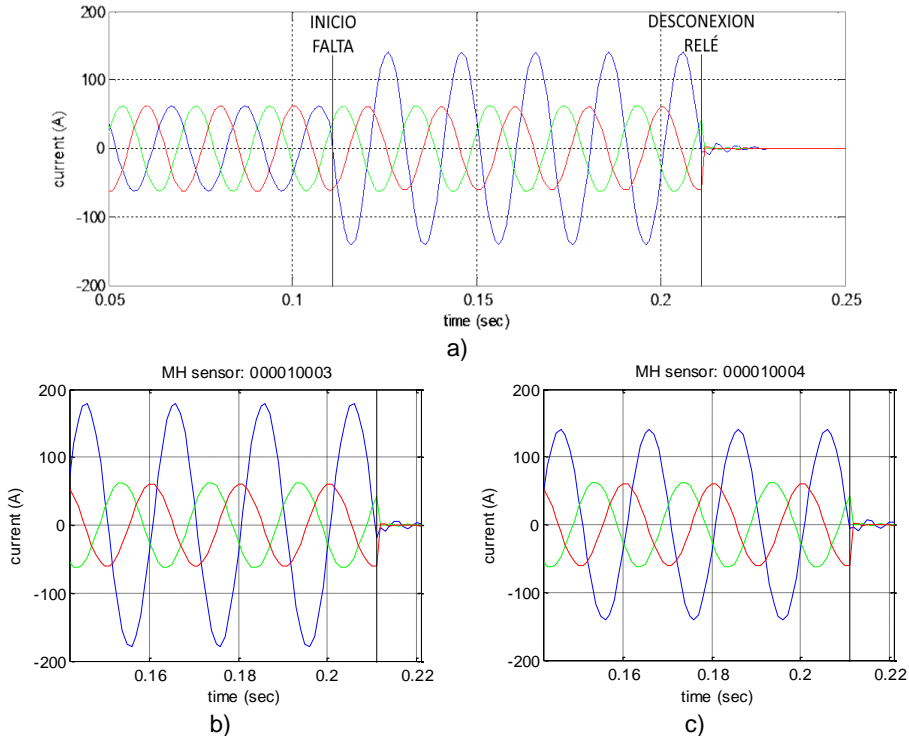


Figura IV.12: Oscilogramas asociados a los distintos nodos del 2º método propuesto.  
a) Detección de la falta, b) registro sensor anterior a la falta, c) registro sensor posterior a la falta.

- 3) Una vez identificado el segmento en el que se encuentra la falta, únicamente queda que el sensor (o los sensores) que ha localizado la falta, transmita esta información al centro de control. Para esta tarea se plantea el uso del canal de comunicaciones creado mediante la citada red de sensores.

Paralelamente al algoritmo de localización antes descrito, cualquier nodo estará siempre preparado para responder en caso de ser interrogado por el valor de su corriente registrada. Así pues, a diferencia de lo que ocurría con el primero de los métodos propuestos, en esta ocasión se requiere una infraestructura de medida específica, que posea una red de comunicación propia.

La presencia de esta nueva red, no tiene que reducirse a las aplicaciones de localización propuestas en el presente trabajo de tesis. La posibilidad de disponer de mayor información a lo largo de todo su trazado abre un nuevo horizonte de estudios y análisis (ej: la predicción del envejecimiento de cableado).

Aunque el presente trabajo de tesis se centra en el desarrollo de los algoritmos de localización, este segundo método, se basa en el despliegue de una red de sensores de corriente, por lo que se ha creído interesante esbozar sus características principales, descritas en los siguientes apartados:

#### **IV.1.2.2.1. Red de sensores de corriente**

Para poder entender las características del despliegue de la red de sensores propuesta, previamente analizaremos brevemente las características típicas en una red de sensores genérica.

##### **IV.1.2.2.1.1. Introducción a las redes de sensores**

Como se ha mencionado a lo largo del presente capítulo, para la aplicación de este método, es preciso el despliegue de un conjunto de sensores que permitan el registro y el análisis de corriente que circula por cada punto de medida, así como la posibilidad de intercambiar información ellos. Este tipo de estructuras de red descentralizadas, donde los nodos se comunican entre sí es lo que se conoce como redes de sensores. En los últimos años este tipo de redes han proliferado enormemente, en gran medida por versión inalámbrica, denominadas Redes de sensores Inalámbricos[131] (o *Wireless Sensor Networks*, WSNs), así pues la mayoría de sus características pueden ser extrapoladas a cualquier otra red de sensores que posea otro canal de comunicación.

Una red de sensores básicamente consiste en un conjunto de muchos pequeños dispositivos autónomos de bajo consumo y bajo costo desplegados en un entorno a monitorizar[132]. Cada uno de estos dispositivos se denominan nodos, y poseen la

capacidad de comunicar con los nodos que estén dentro su área de cobertura (nodos vecinos), tiene capacidades de interacción con el entorno (medición y/o actuación) y poseen una capacidad limitada de cómputo y almacenaje local de información[133], de tal forma que cada nodo posee una capacidad de monitorización local, de una pequeña parte del problema a resolver, y a través de su interacción pueden encontrar la solución global del problema.

A pesar de que las redes de sensores tienen muchas aplicaciones[131], a día de hoy la monitorización ambiental sigue siendo una de las más importantes[134], fundamentalmente porque permiten monitorizar un área extensa, con un bajo coste y con una mínima o nula intervención humana que perturbe el hábitat a estudiar, lo que resulta especialmente importante para los experimentos desarrollados por los biólogos[135][136].

Generalmente, cada nodo de una red de sensores posee la estructura básica descrita en la Figura IV.13, que está compuesta por los siguientes subsistemas:

- **Subsistema de alimentación:** Encargado de dotar de energía a todos los demás subsistemas que componen el nodo.
- **Subsistema de procesado:** Que se encarga de la ejecución de los algoritmos de monitorización.
- **Subsistema de comunicaciones:** Formado fundamentalmente por un transceptor de comunicaciones, que le dota de capacidad de comunicación con otros nodos.
- **Subsistema de entrada/salida:** Que le permite la monitorización del entorno mediante el uso de sensores externos.

Así pues, la aplicación de la tecnología de redes de sensores en el campo de las redes de distribución eléctrica es una alternativa emergente, con numerosas aportaciones en los últimos años, tanto de carácter general[137][138], como de aplicación en

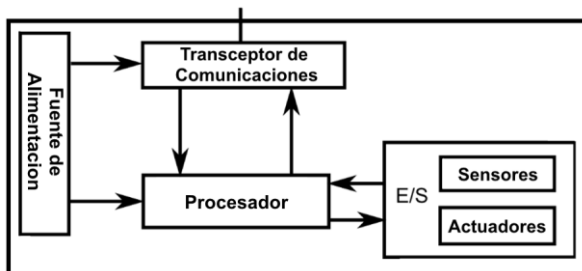


Figura IV.13: Estructura genérica de un nodo sensor.

aspectos específicos, como: vigilancia de líneas aéreas[139]; monitorización de sistemas de generación distribuida[140], o gestión de sistemas de carga de vehículos eléctricos híbridos, etc. Sin embargo, en ningún caso se ha aplicado a las redes de sensores a la localización de faltas en líneas eléctricas subterráneas, lo cual constituye una de las principales novedades del sistema propuesto.

#### IV.1.2.2.1.2. Red de sensores propuesta

Con el fin de cumplir los objetivos propuestos en el presente trabajo se ha planteado una arquitectura donde el sistema está compuesto por una red de sensores, denominados nodos, situados a lo largo del sistema de distribución a monitorizar (ubicados en las arquetas, ver Figura IV.14), de forma que cada nodo es capaz de monitorizar los flujos de corrientes que pasan por los conductores. Utilizando esto para permitir la localización (mediante un algoritmo colaborativo, ver apartado IV.1.2) de una posible falta, reportando esta información al centro de control.

Sin embargo, para llevar a cabo estas tareas los nodos han de ser capaces de resolver varios retos tales como:

- Tener un funcionamiento autónomo, extrayendo energía del propio sistema a monitorizar.
- Ser capaces de monitorizar el entorno y el sistema, mediante el uso de sensores externos.
- Ser capaces de realizar un procesamiento colaborativo, para lo cual los nodos requieren tener una cierta capacidad de procesamiento local, así como disponer de un sistema de comunicaciones que les permitan el intercambio de mensajes.

Para este fin cada nodo cuenta con diferentes subsistemas que se encargan de garantizar la realización de cada una de estas tareas:

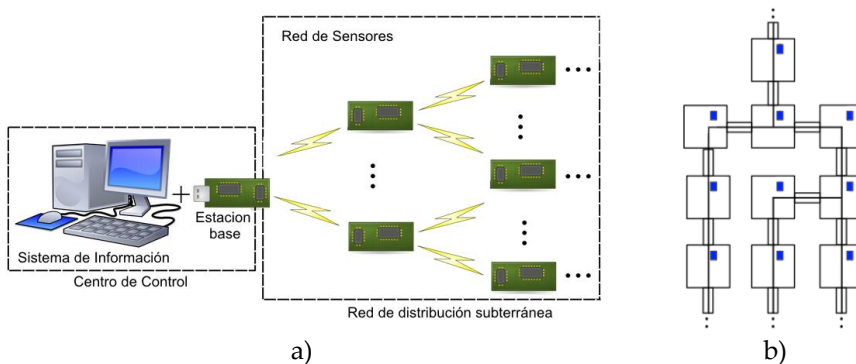


Figura IV.14: Arquitectura de red propuesta.  
a) Arquitectura , b) Despliegue de los nodos.

## **Subsistema de alimentación**

El subsistema de alimentación tiene como función la de proveer de energía al resto de subsistemas del equipo. Así pues, todo sistema de alimentación parte de una fuente de energía primaria, sin embargo en el cableado de MT, debido a sus elevados niveles de tensión, es inviable cualquier tipo de conexión directa o manipulación de sus conductores. Esto hace que para este subsistema se plantee el uso de técnicas de “cosechado de energía” [141] (o *Energy Harvesting, EH*) cuyo concepto consiste en extraer del propio entorno que rodea al equipo, aprovechando la disponibilidad de algún tipo de fuente energética (luz, calor, movimiento, campos electromagnéticos, etc.), la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento.

En este sentido, en el caso que nos ocupa (el interior de una arqueta subterránea) carece de luz, de objetos en movimiento. Sin embargo existe la posibilidad de extraer energía del campo magnético existente alrededor de los cables de MT generado por la circulación de corriente por los mismos. Así pues, la extracción energética mediante inducción ha sido empleada en gran cantidad de aplicaciones, existiendo ya soluciones comerciales para esto. No obstante, aunque la bobina puede ser diseñada y fabricada “*ex professo*” hemos considerado por cuestiones de disponibilidad y sobre todo de coste, el uso de transformadores de corriente estándar de núcleo partido (“*split core*”). Este tipo de dispositivos se instala rodeando al conductor a monitorizar, o del que se pretende extraer la energía, sin necesidad de hacer ningún tipo de incisión sobre el mismo.

Un inconveniente de este tipo de alimentación es que la energía extraída depende de la corriente primaria que pase en ese momento por el conductor sobre el que se encuentra la bobina. Esto se traduce en la existencia de una corriente mínima (o corriente umbral) por debajo de la cual el sistema no podrá “extraer” energía del mismo. Bajo estas condiciones el sistema plantea la necesidad de una batería recargable de respaldo que garantice el funcionamiento durante un periodo de tiempo suficiente si la corriente desciende por debajo de dicho umbral (o se desconecta completamente). En base a este hecho el sistema también debe de contar con una política de gestión energética adecuando su funcionamiento al nivel de carga (o *State-of-Charge, SoC*) de cada nodo. En la Figura IV.15 se muestra una alternativa de transformador de corriente, resumiéndose la Tabla IV.1 sus capacidades máximas de extracción de potencia. Adicionalmente, también se plantea un ejemplo de política de gestión energética (ver Figura IV.16), donde el nivel de carga de la batería condiciona el modo de funcionamiento de cada nodo. Es importante destacar que el método de localización propuesto es compatible con la inactividad puntual de algunos nodos, disminuyendo únicamente su presión.



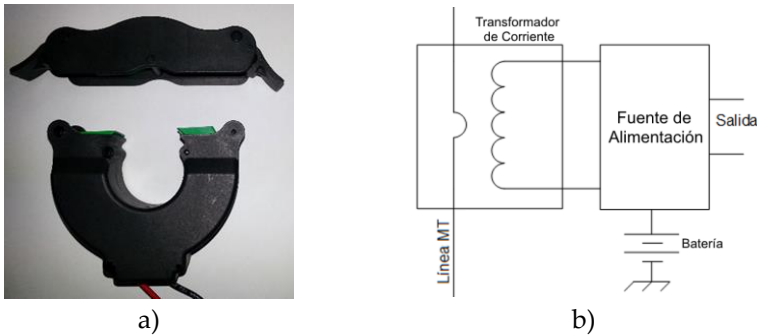


Figura IV.15: Ejemplo de subsistema de alimentación de un nodo.  
a) Transformador de corriente, b) Esquema de bloques.

Corriente Primario ( $I_p$ )	Potencia útil extraída (Monofásico)	Potencia útil extraída (Trifásico)
3 A	--	4 mW *
5 A	≈4 mW *	≈9 mW
10 A	≈30 mW	≈70 mW
30 A	≈350 mW	≈900 mW
60 A	≈1000 mW	>1500 mW

\* Nota: umbral mínimo de funcionamiento

Tabla IV.1: Ejemplo de extracción máxima de energía en un nodo, según acoplamiento. (monofásico o trifásico)

$I_p$ \ SoC	< 20%	> 20% < 80%	> 80%
	< 10 A		
> 10 A < 30 A			
> 30 A			

Verde: Funcionamiento continuo en comunicaciones y medida.  
Naranja: Limitaciones en comunicaciones.  
Rojo: El sistema disminuye el consumo al mínimo, comunicaciones muy limitadas.

Figura IV.16: Ejemplo de gestión energética de un nodo.

### Subsistema de medida

El subsistema de medida o de Entrada/Salida (E/S) es el encargado de adquirir las medidas requeridas por el subsistema de procesado. Concretamente, en este caso la magnitud a monitorizar del entorno es la corriente que circula por cada uno de los conductores. Siguiendo el mismo principio no invasivo aplicado en el subsistema de alimentación, para esto se plantea utilizar transformadores de corriente (situando uno por cada fase), que no requieren la perforación del aislante del cable.

Sin embargo, esta capacidad de registro no quedará restringida a medidas únicamente de corriente. El hecho de disponer de una red de sensores ubicada a lo largo de todo el trazado, plantea la posibilidad de desplegar otros sensores útiles para la empresa distribuidora (como podrían ser sensor de temperatura, humedad, intensidad lumínica, vibraciones, sonido, etc.), que proporcionen una información extra del entorno. Esta información será muy interesante para el desarrollo de nuevos algoritmos de mantenimiento preventivo, que permitan evaluar el envejecimiento del cableado, permitiendo predecir las faltas antes de que éstas se produzcan.

## Subsistema de procesado

El subsistema de procesado es el responsable de la ejecución de todos los algoritmos necesarios para poder realizar la monitorización de la red. Para cumplir estos requisitos se propone el uso de un subsistema basado en el empleo de un microcontrolador que se encargará de la gestión de las comunicaciones y del procesado de la información necesaria, realizando las siguientes tareas:

- **Algoritmo de medición de corriente:** es el encargado de la captura cíclica de los valores instantáneos de corriente de cada fase, calculando posteriormente el valor de sus fasores.
- **Algoritmo colaborativo para la localización de la falta:** es el encargado de, en caso de falta, estimar la posición de ésta según lo descrito en el apartado IV.1.2.
- **Algoritmos de monitorización:** es el encargado de informar bajo demanda el valor de los fasores de corriente, en cada punto de medida, permitiendo obtener un mapa del estado de cada punto de la red de distribución.

Como ya se ha comentado anteriormente, estos algoritmos se basan en el intercambio de mensajes entre nodos que contienen información referente a los fasores de corriente que cada nodo ha registrado. Sin embargo, para que esta información pueda agregarse de forma coherente, su referencia ha de ser común, o ha de establecerse algún mecanismo de corrección. Así pues, hay que tener en cuenta que los nodos de una red son dispositivos independientes los unos de los otros, teniendo cada uno de ellos su propio oscilador. Aunque todos tengan un hardware idéntico, siempre existen pequeñas diferencias entre los relojes, debidas a las tolerancias de fabricación y a las diferencias de temperatura, que producen diferencias en las frecuencias de oscilación entre los nodos.

Como ya se ha comentado, una solución típica de sincronización en redes eléctricas es utilizar GPS. Sin embargo, la ubicación de los nodos (bajo tierra) junto con el elevado coste de dotar a cada sensor con una solución de este tipo, obliga a plantear otras alternativas. Afortunadamente, la sincronización es un problema clásico en redes de sensores, pudiendo encontrarse gran cantidad literatura científica relacionada[142][143], obtenido precisiones del orden de  $10\mu\text{s}$ , pero que empeora considerablemente cuando ésta se propaga por la red (en función del número de saltos).

Sin embargo, para evitar el problema del incremento del error de sincronización como consecuencia de la propagación de ésta a través de la red, en el presente trabajo se propone utilizar la propia señal eléctrica (en condición prefalta) red como

elemento de coordinación entre los nodos. Concretamente, el mecanismo de sincronización propuesto, no se basa en modificar la referencia de reloj asociada a cada nodo, sino que en realidad cada nodo dispondrá de una tabla donde almacenará, el desfase de corriente existente con cada uno de sus nodos vecinos, pudiendo así corregir su medida a la hora de realizar el intercambio de información. El mecanismo para construir estas tablas de corrección consiste en:

- 1) Un nodo registra su vector de fasores de corriente.
- 2) Posteriormente solicita (en difusión) la sincronización con sus nodos. Este mensaje no se puede garantizar que se envíe instantáneamente, pero sí que todos los nodos lo recibirán al mismo tiempo (el tiempo de la propagación del mensaje, es despreciable frente a la información analizada).
- 3) Si es un nodo vecino registrará la fase en el que se recibió el mensaje (según su reloj interno), y enviará al nodo que realizó la solicitud su vector de medida fasorial de corriente, junto con la fase del instante de recepción.
- 4) Una vez recibidos los mensajes de todos los nodos anteriores y posteriores, se agregan las medidas en sendos grupos, previamente corrigiendo el desfase entre ellas (si hubiera), utilizado para esto la fase de recepción asociada a cada nodo.
- 5) Una vez agregados dichos dos grupos de fasores, se comparará con la medida fasorial de corriente que se registró al inicio de la sincronización determinado su desfase, que es debido al tiempo que se tardó enviar el mensaje en el paso 2. Este desfase debe ser el mismo para el conjunto de nodos anteriores y posteriores, con lo que se puede promediar los dos valores para obtener un mejor resultado.
- 6) Finalmente el nodo calculará su tabla de desfase con cada nodo vecino, agregando el desfase debido al envío, con el desfase registrado por cada nodo cuando recibió la solicitud de sincronización.

### **Subsistema de alimentación**

El subsistema de comunicaciones está compuesto fundamentalmente por un transceptor de bajo consumo que se conectará a los buses de comunicaciones del subsistema de procesado, junto con la electrónica de adaptación necesaria para su correcto funcionamiento. Dicho sistema debe garantizar la existencia de un canal que permita el intercambio de mensajes entre los nodos necesarios para la ejecución del algoritmo de localización colaborativo propuesto en el presente trabajo.

Para el diseño del subsistema de comunicaciones se han evaluado diferentes tecnologías que van desde las comunicaciones inalámbricas hasta las tecnologías de

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

comunicación a través de la línea eléctrica[144] (o *Power-Line Communication*, PLC), todas ellas empleando sistemas de modulación en los que la frecuencia de la señal portadora se elegirá en función de la topología de la red, buscando una minimización de las pérdidas de transmisión.

De estas pruebas, inicialmente se optó por comunicaciones inalámbricas (siguiendo los planteamiento definidos en la patente P201500072[145]), evaluándose las tecnologías inalámbricas ZigBee[146], banda ultra ancha [147] (o *Ultra-Wide Band*, UWB) y comunicaciones móviles (*Global System for Mobile*, GSM), sin embargo las condiciones encontradas en las arquetas (diámetro de tubo reducido, tubo completamente bloqueado por la posición del cable, etc. Ver Figura IV.17), impiden la aplicación de las dos primeras, siendo únicamente la comunicación GSM una solución viable.

Sin embargo, a pesar de obtener unos buenos resultados con la comunicación GSM (-83dBm, calificado como un nivel bueno para las comunicaciones de este tipo), el elevado número de arquetas que componen el sistema de distribución, hace que un despliegue de esta solución sea económicamente inviable en este tipo de instalaciones.

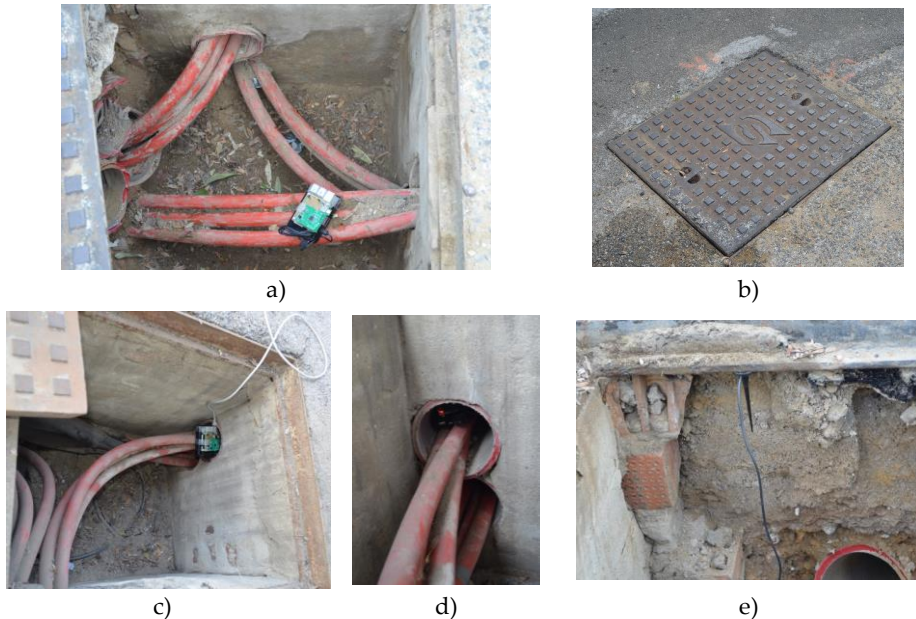


Figura IV.17: Pruebas de comunicación inalámbricas en arquetas.

- a) Detalle de la posición de los cables a la entrada del tubo, b) aspecto exterior de las arquetas cerradas, c) configuración de los parámetros de la prueba, d) posición del transceptor de radio, e) detalle de colocación de la antena GSM.

Por todo esto, la solución inalámbrica fue descartada para la comunicación entre nodos en una red subterránea, tomando como alternativa aprovechar el propio medio físico que se está analizado como canal de comunicación. El principio de funcionamiento de la tecnología PLC consiste en la superposición de una señal de alta frecuencia con bajos niveles de energía sobre la señal propia de la red eléctrica, siendo la señal transmitida común a todos receptores que se encuentren conectados en la misma red eléctrica. Sin embargo, el principal problema que presenta esta tecnología es que generan ruido electromagnético. Debido a esto el Comité Europeo para la Normalización Electrotécnica (o *European Committee for Electrotechnical Standardization*, CENELEC) ha definido en su norma EN 50065[148] una serie de bandas del espectro en las que ha limitado el uso de esta tecnología (ver Figura IV.18 y Tabla IV.2).

Si bien es cierto que estas tecnologías no resultan novedosas y están fuertemente estudiadas (especialmente para su uso en las Smart Grids[149]), es cierto que recientemente se están consiguiendo importantes avances en coste, velocidad de transferencia y fiabilidad[150], especialmente motivados por el impulso que están recibiendo por su aplicación en BT, tanto en aplicaciones dentro del hogar[151] (donde su rendimiento está muy estudiado) como en su uso en la red de contadores inteligentes[152][153], que se basan en este tipo de tecnologías.

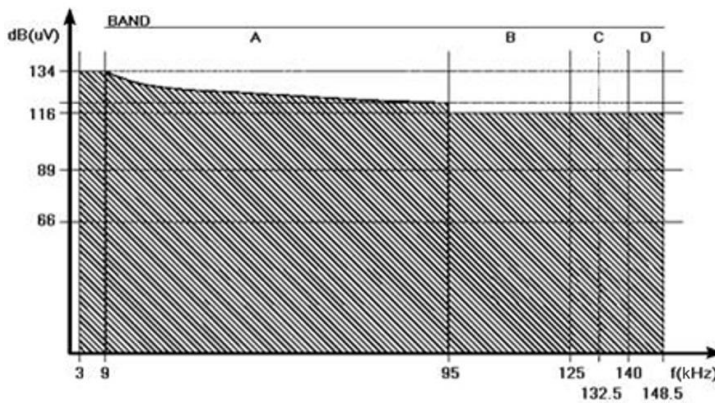


Figura IV.18: Bandas CENELEC.

Banda	Frecuencia	Uso
A	3 - 95kHz	Reservado para suministradores de energía
B	95 - 125kHz	Para uso en interiores
C	125 - 140kHz	Dispositivo con protocolos (ej.: KNX, LonWorks, X-10, etc.) Normalmente centrada en 132.5 kHz
D	140 – 148.5kHz	Dispositivos sin protocolo

Tabla IV.2: Bandas CENELEC.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que en BT, debido a su menor necesidad de aislamiento y protección, no existen tantas limitaciones como en MT y que impiden perforar o dañar los aislantes exteriores del cableado, no permitiendo inyectar la señal directamente sobre estos. Por tanto, en este tipo de casos se opta por realizar acoplamientos inductivos, menos extendidos que el acoplamiento capacitivo utilizado en BT, aunque también avalados por trabajos previos donde se simula el comportamiento de estos cables usando acoplamientos inductivos[154][155], o se muestran resultados experimentales[156] usando módems PLC sobre líneas subterráneas de media tensión.

Concretamente, para la solución propuesta para este método, se plantea el uso de tres transformadores de corriente (uno por fase) que permitan acoplar la señal sobre cada conductor de la línea de media tensión, mejorando la fiabilidad en caso de que se seccione la línea. Adicionalmente, es importante recordar que dichos cables están apantallados y que ésta es conectada a tierra en ambos extremos (ver Figura IV.19a). Así pues, este hecho no solo no perjudica a las comunicaciones, sino que presenta la ventaja de permitir un camino de baja impedancia para transmitir la señal. En esta solución, para realizar el acople se plantea utilizar el mismo núcleo que en el subsistema de medida, al que se le ha añadido un segundo bobinado secundario para las comunicaciones. Con el fin de realizar un acople óptimo, la bobina de comunicaciones debe tener un número reducido de espiras. Estimando mediante pruebas empíricas se determina tres espiras como una solución adecuada para el caso bajo estudio (ver Figura IV.19b, cable amarillo). En contrapartida, el circuito de medida debe presentar una alta impedancia, actuando de filtro paso de baja, no afectando por tanto a las comunicaciones.

El subsistema propuesto se ha probado de manera empírica en laboratorio sobre el banco de prueba de la Figura IV.19b. Dicho banco consiste en un cable de media tensión modelo RH5Z1 (XLPE150), definido según la norma GEDND001[6], igual a

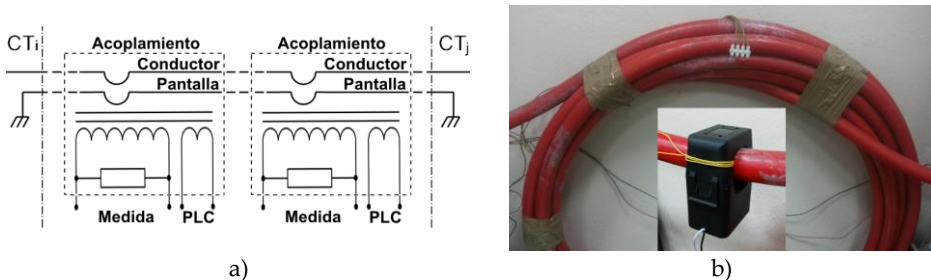


Figura IV.19: Esquema del circuito de comunicaciones.

a) Esquema del acoplamiento a lo largo de la línea, b) Banco de pruebas.

los utilizados para redes subterráneas de distribución eléctrica de media tensión. Dicho cable tiene una longitud total de 30 metros. Para simular la conexión a tierra y el resto de la línea, los extremos de ambos cables se han dispuesto sobre un bornero que permite interconectar tanto la malla como el núcleo conductor con diferentes cargas que permiten simular el acople resistivo-inductivo tanto de las cargas como de la malla.

Para comprobar el funcionamiento del sistema se han realizado pruebas con el modem PLC ST7540, con modulación FSK Half Duplex, en la banda CENELEC C y Tasa de bits programable de hasta 4800 bps. Analizando una conexión punto a punto entre los dos extremos del cable bajo prueba, estableciéndose la conexión entre ambos puntos y obtenidos los resultados reflejados en la Figura IV.20. En esta figura se aprecia: a) la forma de onda de la corriente de salida generada por el modem emisor con una carga de 1 ohmios, b) la forma de onda de la corriente que circula por el cable de media tensión, con una carga de 100 ohmios sobre la malla y c) la forma de onda de la tensión recibida por el modem receptor tras su filtro.

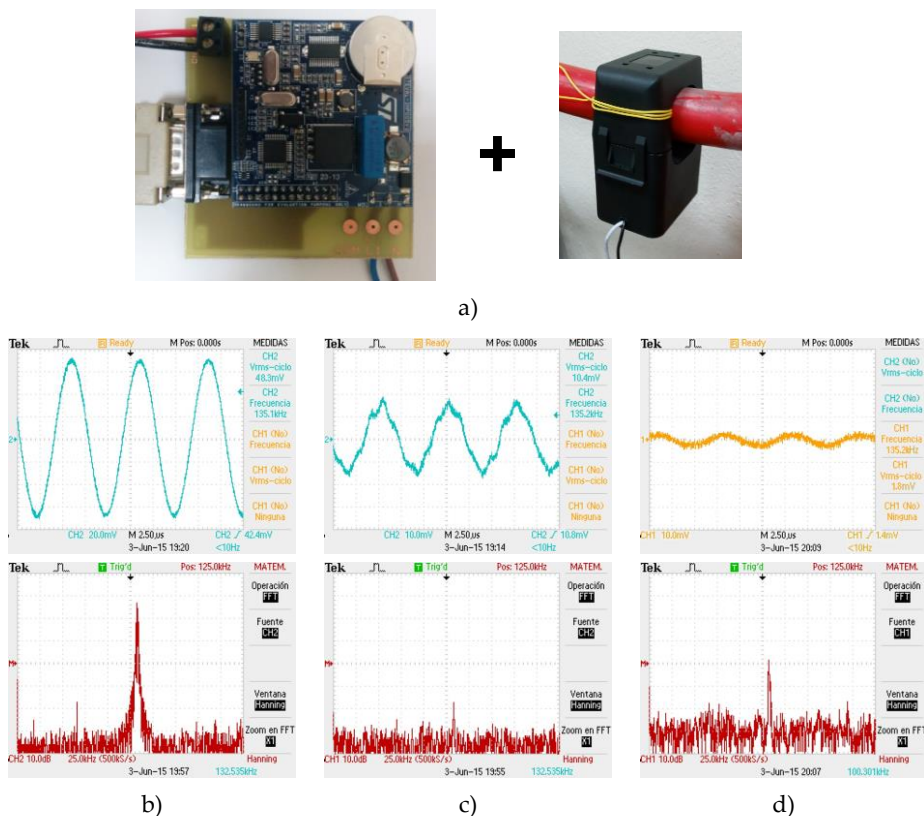


Figura IV.20: Prueba sobre el subsistema de comunicaciones.

Esta señal está muy por encima del mínimo requerido por el modem en su recepción para poder establecer las comunicaciones. Este resultado es especialmente relevante si se considera que todas las pruebas se han realizado añadiendo una resistencia en el lazo de conexión de la malla de  $100\Omega$ . Adicionalmente, se ha probado, incrementando la impedancia de lazo hasta encontrar el valor límite (para esa prueba el núcleo del cable se ha dejado sin conectar). Comprueba que en la configuración testada se obtenían comunicaciones robustas hasta con cargas de  $470\Omega$  y  $330\mu\text{H}$ . A partir de estos valores, suponiendo una resistencia de tierra de  $100\Omega$  (caso muy desfavorable) y conociendo que la impedancia de la malla es menor de  $5\Omega/\text{km}$ , se puede deducir que el sistema puede funcionar correctamente en líneas de hasta unos  $85\text{km}$ , que es una distancia mucho mayor de la esperada entre centros de transformación.

Por todo ello, tanto los resultados experimentales obtenidos, como las evidencias encontradas en la literatura demuestran la idoneidad de las comunicaciones PLC para establecer las comunicaciones punto a punto entre arquetas en el sistema propuesto.

#### **IV.1.2.3. Resumen de las ventajas e inconvenientes del método propuesto**

Como se ha comentado a lo largo del apartado IV.1.2, el segundo de los dos métodos propuestos también permite estimar la localización de la falta dentro de una red de distribución subterránea de media tensión. Al igual que ocurría con el primero de los métodos propuestos, éste también está basado en una filosofía multiterminal o multipunto, aprovechando sus ventajas así como su compatibilidad con sistemas con generación.

Así pues, el presente método propuesto añade a estas las siguientes ventajas:

- Únicamente se requiere registros de corriente (no de tensión), planteándose como un sistema no invasivo, al no necesitar acceder directamente al conductor para realizar medidas.
- El funcionamiento del sistema propuesto es compatible tanto con una filosofía de procesamiento distribuido (algoritmo propuesto) como con una filosofía centralizada, en el que toda la información es transmitida al centro de control, donde se implemente al cálculo de la posición.
- El sistema propuesto no requiere un gran ancho de banda en las comunicaciones, por lo que puede aprovechar los sistemas de comunicación existentes.



- El sistema propuesto se ha centrado en una aplicación sobre un sistema con cableado subterráneo, no obstante, su filosofía es también compatible con redes aéreas.
- El sistema propuesto se basa en una red de sensores comunicados, cuyo uso no tiene que quedar restringido a la aplicación de este algoritmo.
- El sistema propuesto es robusto. Si alguno de los nodos falla, el sistema global sigue funcionando, únicamente se disminuirá la precisión local del sistema.

Como limitaciones principales que posee el presente método destacan:

- El método propuesto no permite estimar la posición de la falta, únicamente identifica el segmento (entre dos sensores de medida) donde se encuentra ubicado el fallo. Esto implica que la precisión del método esté fuertemente condicionada por el número de sensores desplegados.
- El sistema propuesto únicamente puede estimar la posición de la falta si su resistencia entre conductor y malla no presenta un valor muy elevado, que se traduzca en una corriente de falta poco significativa.
- El sistema propuesto únicamente puede estimar la posición de la falta si su resistencia entre malla y tierra presenta un valor lo suficientemente pequeño para que la corriente de fallo derivada a tierra sea significativa, y no sea fundamentalmente la malla el camino de retorno utilizado por la corriente de falta.
- El sistema propuesto requiere una infraestructura no presente en los sistemas de distribución tradicionales, requiriéndose el despliegue adicional de dicha infraestructura para la aplicación.

### **IV.1.3. Método combinado**

Una vez analizadas las ventajas e inconvenientes de los dos métodos propuestos en los apartados anteriores, centrándonos en sus inconvenientes, es fácil identificar que ambos presentan alguna condición o caso particular de funcionamiento, bajo la cual estos métodos dejan de ser aplicables, no realizando correctamente su cometido de localización de faltas. Concretamente, el parámetro clave es la corriente de derivación a tierra ( $I_{Fx}$ , ver Figura IV.21) cuyo valor condiciona los principios en los que se basa cada método:

- Límite 1<sup>er</sup> método propuesto: Si  $I_{Fx}$  es muy grande, las corrientes que se retornen por los dos extremos de la malla serán prácticamente nulas, no siendo estas suficientemente significativas para la estimación de la posición.

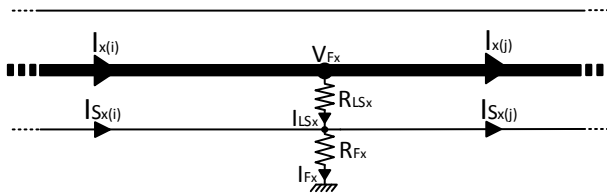


Figura IV.21: Diferencia principal entre los dos métodos propuestos.

- Límite 2º método propuesto: Si  $I_{Fx}$  es nulo, toda la corriente retornará a través de la malla, no pudiéndose determinar el segmento afectado, al no existir diferencias entre los registros de los nodos contiguos al punto de falta.

A pesar de que estos dos casos límite son poco probables, atendiendo a ellos es también fácil identificar que dichas condiciones límite, son opuestas en ambos métodos. Planteándose la posibilidad de utilizar ambos métodos conjuntamente, de forma que se garantice que alguno de ellos nos proporcione una solución válida al problema de localización de faltas en líneas subterráneas.

## IV.2. Resumen del capítulo

En el presente capítulo se describen dos nuevos métodos de localización de faltas orientados a resolver este problema en redes de distribución subterráneas, utilizando para ello únicamente los registros de corriente.

Concretamente, se detalla un primer método basado en los registros de las corrientes de retorno que circulan por las mallas del cableado de distribución subterráneas. Este método presenta la ventaja de su simplicidad al no requerir una instrumentación compleja, pero presenta el inconveniente, como es lógico de ser únicamente útil si existe dicha corriente de malla. La segunda opción propuesta consiste en la implementación de un balance neto de corriente, implementado a lo largo de toda la red de distribución. Este método presenta la ventaja de localizar el segmento afectado (entre dos sensores) donde se produce una derivación a tierra. Su principal inconveniente, radica en la necesidad de realizar un despliegue de dichos sensores (los cuales también se esbozan en el presente capítulo).

Analizando el funcionamiento de ambos métodos se identifican dos condiciones límite (una en cada método) en las que estos métodos presentan una anomalía en su funcionamiento. Aprovechando que esta condición es complementaria, se propone la posibilidad de utilizar ambos de forma conjunta.

## V. Resultados obtenidos

---

El presente capítulo tiene como objetivo poner de manifiesto los resultados obtenidos por los dos nuevos métodos de localización propuestos. Para este fin se han realizado diferentes análisis de rendimiento, comparando siempre los resultados con algunos de los distintos métodos tradicionales presentados en el Capítulo III. En el criterio de elección de estos métodos patrón sobre el resto de los estudiados en la literatura, han primado las características de la información necesaria para su aplicación, centrando el foco en los métodos que utilizan registros de las componentes fundamentales o fasores (ver apartado III.1), descartando por tanto, los métodos apoyados en componentes de mayor frecuencia (y que requieren una mayor tasa de muestreo), como son los basados en el análisis de componentes de alta frecuencia (ver apartado III.2) o en el estudio del comportamiento de la onda viajera (ver apartado III.3). Así pues dentro de los métodos basados en componentes fundamentales, con la intención de adaptarse mejor al análisis de sistemas desequilibrados, a excepción del método de la componente reactiva (que se ha mantenido por razones históricas y de simplicidad), se han descartado los métodos basados en el análisis por componentes simétricas, centrándonos en los basados en un análisis directo del sistema trifásico.

En resumen, los métodos que se han escogido como patrón han sido cuatro: tres métodos de un terminal (componente reactiva[71], ver apartado III.1.1.1.1, Salim et al.[80], ver apartado III.1.1.1.7 y Filomena et al.[81], ver apartado III.1.1.1.8), destacando este último por centrarse en líneas subterráneas, y un método multi-terminal (Jiang et al.[102], ver apartado III.1.2.1.5), con una filosofía similar a los métodos planteados. En el caso concreto de los métodos de un único terminal, en los cuales puede darse el problema de la múltiple estimación de la localización (ver

apartado III.1.1.2.2), éste se ha solucionado suponiendo conocida cuál de las posibles soluciones corresponde al segmento afectado.

En este sentido, sí es importante destacar el hecho de que todos estos métodos, se basan en registros de corriente y tensión, mientras que los dos métodos propuestos en este trabajo, únicamente requieren medidas de corriente, mucho más fáciles y seguras de obtener en redes de este tipo. Esta importante ventaja en sí misma, ya podría considerarse un resultado para estos métodos. Adicionalmente, también de destaca la aplicabilidad de ambos métodos en sistemas que cuenten con DG, ya que al tratarse ambos de métodos con múltiples puntos de medida, son compatibles con la posibilidad de que existan flujos bidireccionales de energía.

## **V.1. Descripción del entorno de prueba**

Como se ha comentado anteriormente la intención de este capítulo es evaluar el comportamiento que presentan los dos métodos de localización propuestos. Lo que implicaría someter al sistema que se utilice como banco de pruebas a una amplia batería de casos de falta, obteniéndose para cada uno de estos los registros de datos necesarios para su aplicación.

Sin embargo, no hay que perder de vista el tipo de fallos que se está evaluando, que son de naturaleza esporádica, por lo que es frecuente disponer solo de pequeños conjuntos de registros reales. Así pues, un caso de falta habitualmente está asociado a situaciones donde los elevados valores de energía implicados se traducen en una degradación de los elementos donde ésta se ha producido. Por último, no hay que olvidar que una línea de distribución real está suministrando energía a un importante número de usuarios, no siendo posible interrumpir éste de forma periódica para la realización de pruebas. Todos estos inconvenientes, hacen que las pruebas en campo queden restringidas a supuestos muy concretos, en los que se testen aspectos muy específicos o cuyos modelos sean desconocidos.

En este sentido, como alternativa, suele estar muy extendido en el ámbito de la localización de faltas, el uso de la simulación de transitorios electromagnéticos (o *Electromagnetic Transients*, EMT) para reproducir el comportamiento de una red bajo un caso de falta. Sin embargo, como ya se ha puesto de manifiesto a lo largo del Capítulo III, es muy común por parte de muchos autores realizar las simulaciones y pruebas de sus métodos basándose en modelos específicos de redes (habitualmente sobre las que han trabajado), y entre los que se identifican importantes diferencias (en topología, características y casos de fallos evaluados). Este hecho hace muy complicado realizar una comparativa entre los distintos métodos en base a sus resultados específicos.

Para evitar esto, en el presente trabajo se ha buscado utilizar la simulación de una red más o menos estándar, implementándose para ello en la herramienta comercial de simulación PSCAD™, un modelo de la red denominada *IEEE 37 Node Test Feeder*, (cuyo origen, características, e implementación realizada en el presente trabajo, se detallan ampliamente en el Anexo B). La elección de esta alternativa sobre el resto de redes *IEEE Node Test Feeder* se realizó en base a sus características, fundamentalmente por tratarse ésta de una línea completamente subterránea, acorde con el objetivo principal del presente trabajo de tesis. En base a este modelo, han sido caracterizadas las siguientes pruebas:

### V.1.1. Características de los casos simulados

Para las pruebas de rendimiento de los distintos métodos se ha generado un conjunto de datos de simulación en los que se ha ido variando la posición y resistencia del fallo dentro de las distintas secciones o tramos que conforman dicho modelo (ver Figura V.1), repitiendo estas configuraciones para distintos niveles de carga del circuito (modificando los valores de las carga definidas en la Tabla A3, según un porcentaje común para todas éstas). Concretamente se han simulado un total de 22500 casos, que corresponden a las siguientes variaciones en los distintos parámetros:

- Porcentaje de carga aplicada: tomando esta los valores de 0%, 25%, 50%, 75% y 100%. Esto nos permitirá observar cómo afecta el nivel de carga a los distintos resultados de los métodos evaluados.
- Sección de la red afectada: tomándose como conjunto de ensayo nueve posibilidades: 1, 5, 12, 14, 19, 21, 23, 28 y 34. Esto permitirá evaluar tanto el efecto de la distancia hasta el fallo como el de las cargas distribuidas.

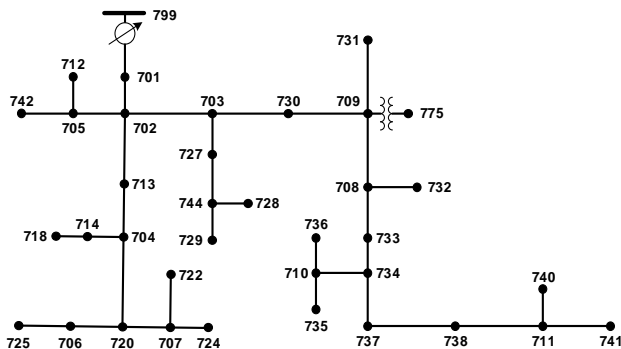


Figura V.1: Topología de la red de prueba (*IEEE 37 Node Test Feeder*).

- Posición del fallo dentro de la sección afectada: tomando éste valor entre las siguientes cinco posibilidades de posición normalizada a la longitud de dicha sección afectada: 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 y 0.9.
- Tipo de falta: contemplando las cuatro posibilidades típicas en red subterránea, tres para faltas simples a tierra (una por fase) y una para faltas trifásicas.
- Resistencia de fallo conductor-malla: representando ésta la variación de la corriente de falta entre estos dos elementos de cable, pudiendo tomar ésta cinco valores distintos (0.01 $\Omega$ , 0.1 $\Omega$ , 1 $\Omega$ , 10 $\Omega$  y 100 $\Omega$ ).
- Resistencia de fallo malla-tierra: representando ésta el valor de la resistencia de contacto con tierra, pudiendo tomar cinco valores distintos (0.01 $\Omega$ , 0.1 $\Omega$ , 1 $\Omega$ , 10 $\Omega$  y 100 $\Omega$ ).

Es importante destacar que para estas pruebas no se ha contemplado la variación en el ángulo de inserción de la falta, ya que este parámetro no es relevante para la localización, estando su análisis más orientado al estudio de la detección de faltas.

## **V.2. Análisis de los resultados obtenidos**

En base a los distintos casos de simulación anteriormente descritos, se han realizado distintos análisis, cuyos resultados serán expuestos a lo largo de los siguientes apartados. En adelante, los dos métodos propuestos por simplicidad se denominarán Personal(1) y Personal(2).

### **V.2.1. Análisis general de las capacidades de localización de los distintos métodos**

Como análisis inicial sobre los métodos, se ha realizado un estudio global de los resultados obtenidos de conjunto completo de simulación, analizando de forma global los resultados de cada uno de ellos. Concretamente, en este estudio se distingue entre tres posibilidades:

- Casos sin resultado: representan las situaciones en las que el método analizado, no es capaz de estimar una posición como resultado.
- Casos fuera de la sección: El método es capaz de estimar una posición de la falta, pero la estima fuera del segmento afectado. Para evitar que pequeños errores en los extremos de los segmentos se interpreten como grandes errores, se ha modificado el concepto de pertenencia, consistiendo ésta cierta, cuando el error de la estimación no supere la longitud total de la sección afectada.
- Casos válidos: hace referencia a todos los casos en los que el método analizado, da un resultado estimado, encontrándose éste dentro de la sección afectada.

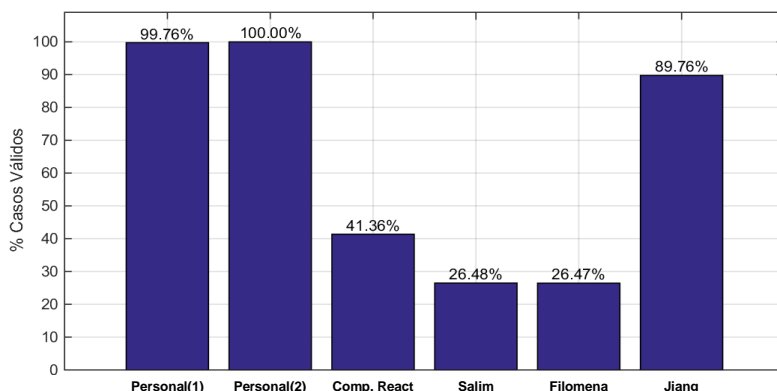


Figura V.2: Porcentajes de casos válidos para cada método.

En base a esto, la Figura V.2 muestra el porcentaje total de datos válidos de cada método, expresándose más detalladamente cada uno en la Tabla V.1.

De esta tabla destacan los 5626 (25%) casos en los que no se ha podido realizar la estimación con el método de la componente reactiva. Estos casos corresponden a las faltas trifásicas, que no pueden ser estimadas con este método. También destaca el elevado número de casos en que los métodos de un único terminal (componente reactiva 7569 (33.64%), Salim 16541 (73.52%) y Filomena 16545 (73.53%) han estimado la posición fuera de la sección afectada. Este hecho se debe en gran medida al error cometido en los casos con la falta más alejada del punto de medida (secciones más alejadas), en las que, como veremos más adelante, se comete un elevado error. Por otro lado queda patente la bondad de los métodos propuestos, que junto con el método de Jiang, son los que presentan un número más elevado de casos en los que el método es capaz de proporcionar un dato válido.

En la misma tabla, también se han expresado los datos de errores medios totales de cada método, los cuales también son mostrados en los gráficos de cajas y bigotes de

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	53 (0.24%)	0 (0%)	22447 (99.76%)	0.0084%	0.000056%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	22500 (100%)	6.13426%	0.286771%
Comp. Reactiva	5625 (25%)	7569 (33.64%)	9306 (41.36%)	29.8506%	7.60462%
Salim	0 (0%)	16541 (73.52%)	5959 (26.48%)	18.1375%	6.25307%
Filomena	0 (0%)	16545 (73.53%)	5955 (26.47%)	16.4679%	5.15775%
Jiang	0 (0%)	2305 (10.24%)	20195 (89.76%)	0.331892%	0.0180505%

Tabla V.1: Análisis del porcentaje de casos válidos de prueba.

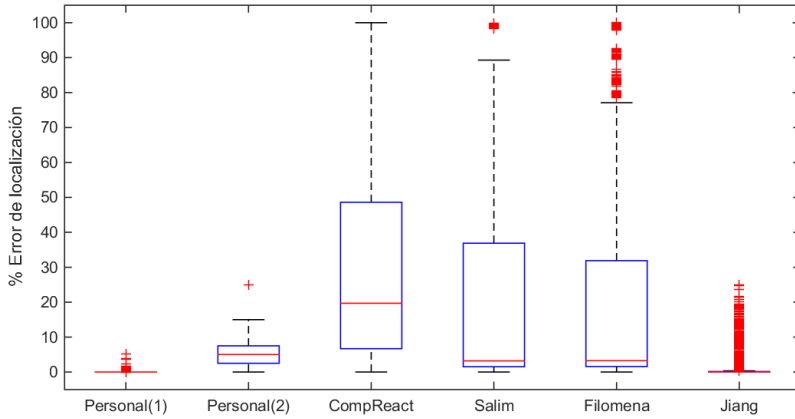


Figura V.3: Errores globales cometidos por los distintos métodos analizados.

la Figura V.3. Adicionalmente, la Figura V.4 muestra un detalle de los métodos que han obtenido mejores resultados, entre los que se encuentran los dos métodos propuestos en el presente trabajo de tesis.

De la Figura V.4 se destacan los buenos resultados obtenidos por Personal(1), que aunque presenta algunos casos con un error máximo del 5% aproximadamente. Comparativamente, el método de Jiang, presenta un error medio un poco más elevado que Personal(1), no obstante cuenta con algunos casos puntuales cuyo error se eleva hasta valores de aprox. 25%. De estos tres métodos, Personal(2) es el que presenta el peor resultado, sin embargo, como se ha comentado a lo largo de su explicación, este método no proporciona un resultado directo de la posición, únicamente nos identifica la subsección afectada, tomando la posición estimada en

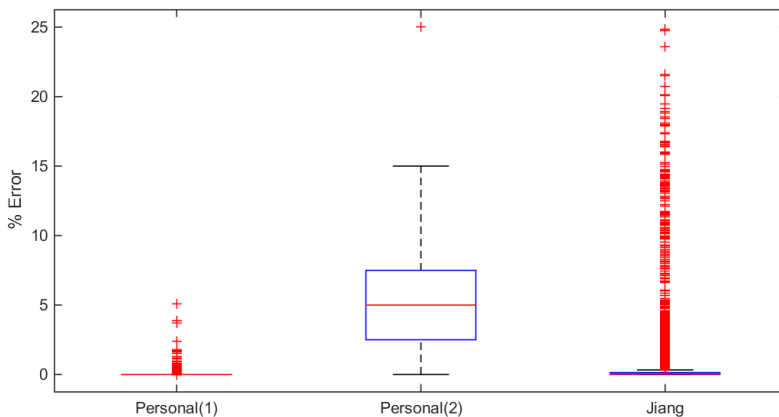


Figura V.4: Detalle del error cometido por los métodos con mejores resultados globales.



la mitad de ésta. Este hecho hace que la precisión del método esté condicionado por el despliegue de sensores (o números de subsecciones realizadas). En este sentido, el error normalizado máximo lo obtenemos para tramos que únicamente han sido divididos en dos subsecciones (ej.: sección 14, ver la estructura simulada, Tabla A1), obteniéndose un valor máximo del 25%. En este sentido, la información más relevante asociada a este método es su porcentaje de estimación válida, que como vemos en la Tabla V.1, presenta una elevada efectividad (100%), significativamente mayor que los métodos propuestos en la comparación.

Estos resultados demuestran, desde un punto de vista de funcionamiento global, la efectividad de ambos métodos propuestos, ante un amplio conjunto de situaciones de falta ensayadas. Estos resultados son comparativamente mejores que los obtenidos usando los métodos de referencia propuestos en la literatura. Así pues, basados en esto, es posible afirmar que ambas alternativas propuestas son una aportación válida para resolver el problema de localización de faltas en líneas subterráneas.

### V.2.2. Análisis de los métodos ante distintos tipos de falta

Una vez analizado el comportamiento global de los métodos propuestos, se procederá a analizar el comportamiento de estos frente a los distintos parámetros que definen una falta. Como primer análisis de sensibilidad, se estudiará el efecto que tiene el tipo de falta sobre éstos. En este sentido se han separado los resultados en cuatro grupos, según los cuatro tipos de falta estudiados (típicos en redes subterráneas). Dichos resultados se resumen en la Tabla V.2, Tabla V.3, Tabla V.4, Tabla V.5 (según el caso de falta). Por otro lado, la Figura V.5 muestra el porcentaje de casos válidos para cada tipo.

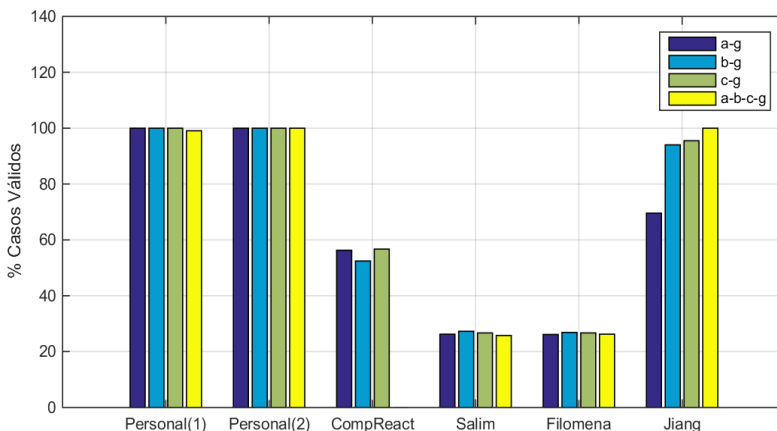


Figura V.5: Porcentaje de datos válidos según el tipo de falta.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	0 (0%)	0 (0%)	5625 (100%)	0.0115781%	1.98069e-05%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	5625 (100%)	6.13426%	0.286809%
Comp. Reactiva	0 (0%)	2459 (43.72%)	3166 (56.28%)	34.6709%	7.94201%
Salim	0 (0%)	4150 (73.78%)	1475 (26.22%)	26.8625%	6.59953%
Filomena	0 (0%)	4156 (73.88%)	1469 (26.12%)	25.2175%	5.82445%
Jiang	1713 (30.45%)	0 (0%)	3912 (69.55%)	0.983195%	0.0726813%

Tabla V.2: Análisis del error de localización ante una falta simple en la fase a.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	0 (0%)	0 (0%)	5625 (100%)	0.00485387%	4.37802e-06%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	5625 (100%)	6.13426%	0.286809%
Comp. Reactiva	0 (0%)	2675 (47.56%)	2950 (52.44%)	27.3722%	6.79969%
Salim	0 (0%)	4091 (72.73%)	1534 (27.27%)	19.655%	7.80325%
Filomena	0 (0%)	4114 (73.14%)	1511 (26.86%)	17.3735%	6.4972%
Jiang	337(5.99%)	0 (0%)	5288 (94.01%)	0.294772%	0.00314705%

Tabla V.3: Análisis del error de localización ante una falta simple en la fase b.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	0 (0%)	0 (0%)	5625 (100%)	0.00445333%	2.51201e-06%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	5625 (100%)	6.13426%	0.286809%
Comp. Reactiva	0 (0%)	2435 (43.29%)	3190 (56.71%)	27.3583%	7.66925%
Salim	0 (0%)	4125 (73.33%)	1500 (26.67%)	14.0475%	4.92645%
Filomena	0 (0%)	4125(73.33%)	1500 (26.67%)	12.3345%	3.7635%
Jiang	255 (4.53%)	0 (0%)	5370 (95.47%)	0.153087%	0.00686175%

Tabla V.4: Análisis del error de localización ante una falta simple en la fase c.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	53 (0.94%)	0 (0%)	5572 (99.06%)	0.0127848%	0.000198196%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	5625 (100%)	6.13426%	0.286809%
Comp. Reactiva	5625 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	---	---
Salim	0 (0%)	4175 (74.22%)	1450 (25.78%)	11.8877%	4.28261%
Filomena	0 (0%)	4150 (73.78%)	1475 (26.22%)	11.0298%	3.30883%
Jiang	0 (0%)	0 (0%)	5625 (100%)	0.0845274%	0.000880189%

Tabla V.5: Análisis del error de localización ante una falta trifásica.

Ante los resultados descritos se concluye que los dos métodos propuestos presentan una alta aplicabilidad indistintamente del tipo de falta ensayada. Únicamente se aprecia una leve variación en Personal(1), que ante faltas trifásicas, presenta algunos casos en los que el método no es capaz de estimar una posición. Este hecho es debido, en gran medida, a que en una falta trifásica, si el sistema está totalmente equilibrado (tanto en carga como en impedancia de líneas) la suma de corrientes de mallas es siempre cero, por lo que es probable que este método plantee algunos problemas en este caso. Sin embargo, esta situación es bastante improbable, y como se verá más adelante estos errores únicamente están asociados a casos en los que la carga es nula.

En este sentido, como posible solución a este problema, se plantea la posibilidad de registrar por separado las tres corrientes de malla, eliminando el problema de la agregación. Sin embargo esta alternativa no es muy práctica, ya que requeriría multiplicar por tres el número de sensores. Así pues, este problema no afecta a Personal(2), ante el cual las faltas trifásicas son detectadas fácilmente, ya que suponen una importante diferencia entre la corriente antes y después del punto de falta. El resto de métodos presenta pequeñas diferencias ante el tipo de falta. Destaca el aumento puntual del número de casos no válidos que presenta la fase “a” en el método de Jiang, y el comportamiento prácticamente estable de los métodos basados en medidas en un terminal (exceptuando comp. reactiva, que no es válido ante faltas trifásicas)

Por todo esto queda demostrado el hecho de que ambas alternativas propuestas presentan un buen comportamiento ante los distintos tipos de falta subterráneas.

### **V.2.3. Análisis de los métodos ante distinta posición de falta**

En lo referente a la posición de la falta se han estudiado dos parámetros que condicionan las características de la misma: la sección afectada (con las posibilidades: 1, 5, 12, 14, 19, 21, 23, 28 ó 34), y la posición normalizada dentro de cada una de éstas (con las posibilidades: 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 ó 0.9). Analizando cada variante se obtiene:

#### **V.2.3.1. Análisis de los métodos ante distintas secciones afectadas**

En este sentido la información de porcentaje de validez, relacionada con la sección afectada, la observamos en la Figura V.6. En esta figura es posible apreciar como en los métodos basados en medidas en un único terminal empeoran al aumentar la distancia entre la sección afectada y el punto de medida, obteniéndose buenos resultados únicamente en las secciones más cercanas (1, 5 y 23, ver esquema en Figura A1). Así pues, este error puede verse agravado por el efecto de una mala estimación de la carga. Por el contrario, los métodos propuestos y el de Jiang, presentan un buen índice de aplicabilidad, destacando los métodos propuestos como los de un mayor porcentaje.

En la Figura V.7 se ha reflejado la relación entre el error medio cometido para cada sección afectada. Como sucedía con el porcentaje de aplicabilidad, también el valor de localización presenta mejores resultados en los métodos multi-terminal, encontrándonos múltiples casos en los que los sistemas de un único terminal no son capaces de estimar ni un dato válido, con lo que no se dispone de ningún valor para estimar el error.

**Tesis Doctoral:**

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

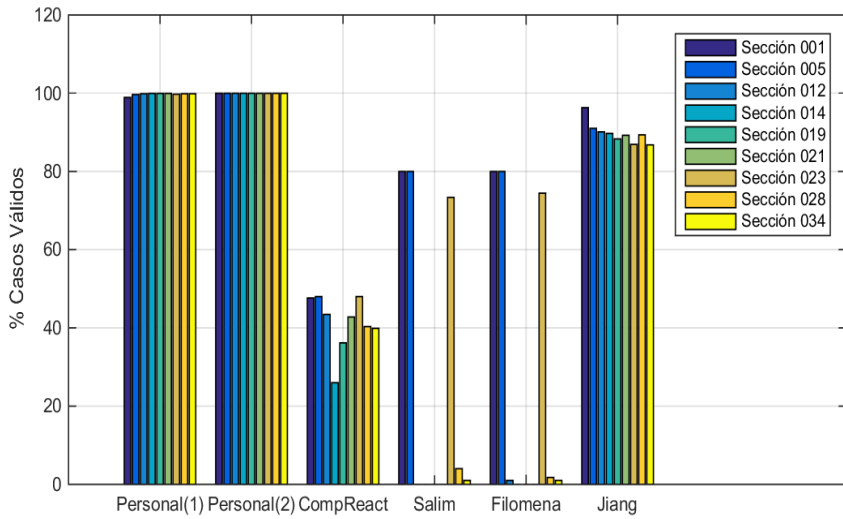


Figura V.6: Porcentaje de datos válidos según la sección afectada.

En este sentido, el método Personal(2), plantea el mayor porcentaje de error en la sección 14, que cuenta únicamente con dos subsecciones, pudiendo reducir su error aumentado este número. Toda la información asociada a este ensayo se resume en el conjunto de tablas siguiente (de la Tabla V.6 a la Tabla V.14).

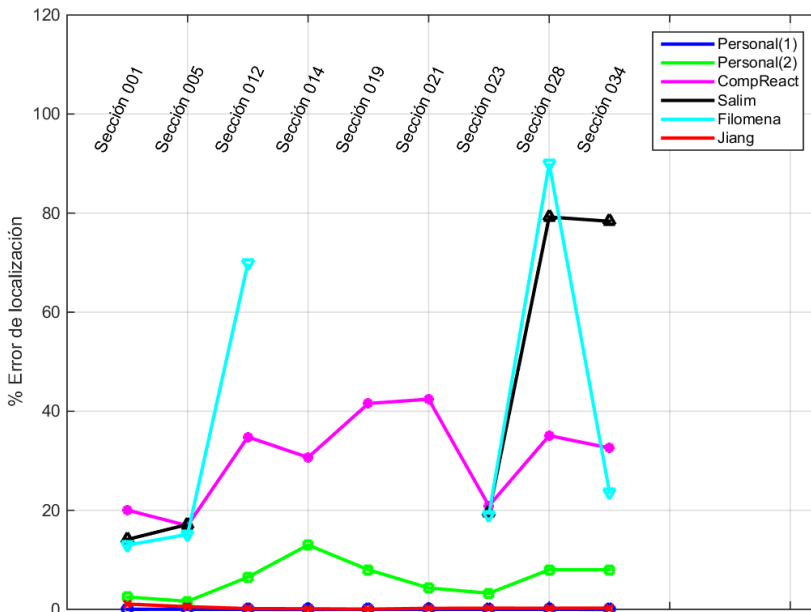


Figura V.7: Evolución del error medio según la sección afectada.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	27 (1.08%)	0 (0%)	2473 (98.92%)	0.0235017%	6.9306e-05%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	2500 (100%)	2.5%	0%
Comp. Reactiva	625 (25%)	684 (27.36%)	1191 (47.64%)	20.0357%	5.33808%
Salim	0 (0%)	500 (20%)	2000 (80%)	14.1162%	3.82744%
Filomena	0 (0%)	500 (20%)	2000 (80%)	12.9855%	3.15359%
Jiang	92 (3.68%)	0 (0%)	2408 (96.32%)	1.07871%	0.0599836%

Tabla V.6: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 001.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	8 (0.32%)	0 (0%)	2492 (99.68%)	0.0252975%	3.82375e-4%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	2500 (100%)	1.625%	0.0087535%
Comp. Reactiva	625 (25%)	675 (27%)	1200 (48%)	16.9069%	4.10718%
Salim	0 (0%)	500 (20%)	2000 (80%)	17.1354%	5.15366%
Filomena	0 (0%)	500 (20%)	2000 (80%)	15.1363%	3.84904%
Jiang	225 (9%)	0 (0%)	2275 (91%)	0.552572%	0.040802%

Tabla V.7: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 005.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	3 (0.12%)	0 (0%)	2497 (99.88%)	0.00103039%	1.38942e-07%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	2500 (100%)	6.5%	0.140056%
Comp. Reactiva	625 (25%)	789 (31.56%)	1086 (43.44%)	34.8053%	9.38407%
Salim	0 (0%)	2500 (100%)	0 (0%)	---	---
Filomena	0(0%)	2475 (99%)	25 (1%)	69.8466%	0.0752424%
Jiang	247 (9.88%)	0 (0%)	2253 (90.12%)	0.163774%	0.00189462%

Tabla V.8: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 012.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	1 (0.04%)	0 (0%)	2499 (99.96%)	0.0023624%	7.58355e-07%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	2500 (100%)	13%	0.560224%
Comp. Reactiva	625 (25%)	1225 (49%)	650 (26%)	30.6824%	6.10946%
Salim	0 (0%)	2500 (100%)	0 (0%)	---	---
Filomena	0 (0%)	2500 (100%)	0 (0%)	---	---
Jiang	257 (10.28%)	0 (0%)	2243 (89.72%)	0.125026%	0.000749107%

Tabla V.9: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 014.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	1 (0.04%)	0 (0%)	2499 (99.96%)	0.0064046%	1.47891e-05%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	2500 (100%)	8%	0.248988%
Comp. Reactiva	625 (25%)	971 (38.84%)	904 (36.16%)	41.5651%	8.53064%
Salim	0 (0%)	2500 (100%)	0 (0%)	---	---
Filomena	0 (0%)	2500 (100%)	0 (0%)	---	---
Jiang	292 (11.68%)	0 (0%)	2208 (88.32%)	0.0506027%	0.000282716%

Tabla V.10: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 019.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	1 (0.04%)	0 (0%)	2499 (99.96%)	0.00299065%	2.27629e-06%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	2500 (100%)	4.33333%	0.0622471%
Comp. Reactiva	625 (25%)	805 (32.2%)	1070 (42.8%)	42.4308%	6.10542%
Salim	0 (0%)	2500 (100%)	0 (0%)	---	---
Filomena	0 (0%)	2500 (100%)	0 (0%)	---	---
Jiang	269 (10.76%)	0 (0%)	2231 (89.24%)	0.209754%	0.0169973%

Tabla V.11: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 021.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	6 (0.24%)	0 (0%)	2494 (99.76%)	0.00718535%	1.19539e-05%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	2500 (100%)	3.25%	0.035014%
Comp. Reactiva	625 (25%)	675 (27%)	1200 (48%)	20.8972%	5.48371%
Salim	0 (0%)	666 (26.64%)	1834 (73.36%)	19.465%	7.75403%
Filomena	0 (0%)	639 (25.56%)	1861 (74.44%)	19.0891%	7.08233%
Jiang	327 (13.08%)	0 (0%)	2173 (86.92%)	0.243829%	0.00947557%

Tabla V.12: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 023.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	3 (0.12%)	0 (0%)	2497 (99.88%)	0.00558216%	1.51969e-05%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	2500 (100%)	8%	0.248988%
Comp. Reactiva	625 (25%)	867 (34.68%)	1008 (40.32%)	35.0804%	8.6249%
Salim	0 (0%)	2400 (96%)	100 (4%)	79.2071%	0.785721%
Filomena	0 (0%)	2456 (98.24%)	44 (1.76%)	90.0013%	0.597105%
Jiang	266 (10.64%)	0 (0%)	2234 (89.36%)	0.239466%	0.00806205%

Tabla V.13: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 028.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	3 (0.12%)	0 (0%)	2497 (99.88%)	0.0014985%	1.52954e-06%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	2500 (100%)	8%	0.248988%
Comp. Reactiva	625 (25%)	878 (35.12%)	997 (39.88%)	32.5805%	8.20533%
Salim	0 (0%)	2475 (99%)	25 (1%)	78.3467%	0.00327949%
Filomena	0 (0%)	2475 (99%)	25 (1%)	23.6788%	0.000512293%
Jiang	330 (13.2%)	0 (0%)	2170 (86.8%)	0.25531%	0.0117977%

Tabla V.14: Análisis del error de localización ante una falta en la sección 034.

En base a toda esta información, se puede decir que el resultado de los dos métodos propuestos no se ve afectado significativamente por la distancia a la que se encuentra ubicada la sección afectada.

### V.2.3.2. Análisis de los métodos ante distintas posiciones dentro de la sección afectada

Variando ahora el valor de la posición normalizada se obtiene una información muy distinta. Observando la Figura V.8, se deduce que la posición dentro del tramo no modifica significativamente al porcentaje de validez de los métodos. Únicamente el

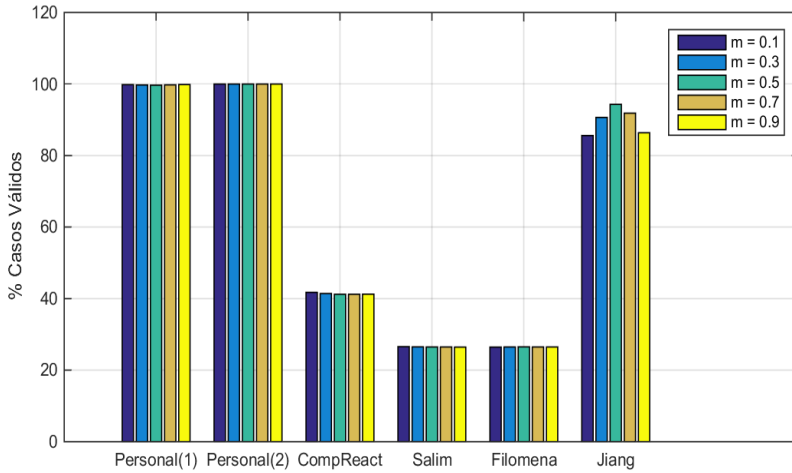


Figura V.8: Porcentaje de datos válidos según la posición normalizada.

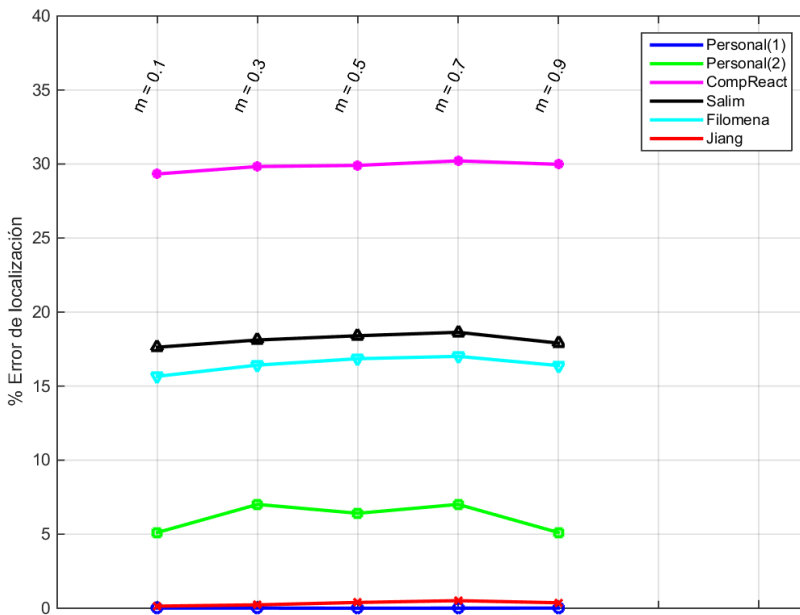


Figura V.9: Evolución del error medio según la posición normalizada.

método de Jiang varía levemente con la posición, obteniéndose el porcentaje máximo de datos válidos cuando la posición se encuentra en el centro del tramo. Un efecto parecido puede verse en la gráfica del porcentaje de error (ver Figura V.9). Toda la información asociada a este ensayo se resume en el conjunto de tablas siguientes (de la Tabla V.15 a la Tabla V.19).

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	8 (0.18%)	0 (0%)	4492 (99.82%)	0.013732%	0.000187792%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	5.11574%	0.169512%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	1497 (33.27%)	1878 (41.73%)	29.3302%	7.73672%
Salim	0 (0%)	3305 (73.44%)	1195 (26.56%)	17.6284%	6.35298%
Filomena	0 (0%)	3310 (73.56%)	1190 (26.44%)	15.664%	5.03665%
Jiang	648 (14.4%)	0 (0%)	3852 (85.6%)	0.142674%	0.00448366%

Tabla V.15: Análisis del error de localización ante una falta en  $m = 0.1$ .

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	12 (0.27%)	0 (0%)	4488 (99.73%)	0.00899815%	3.3133e-05%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	7.01389%	0.23134%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	1511 (33.58%)	1864 (41.42%)	29.8305%	7.7916%
Salim	0 (0%)	3308 (73.51%)	1192 (26.49%)	18.1156%	6.24873%
Filomena	0 (0%)	3309 (73.53%)	1191 (26.47%)	16.4209%	5.13635%
Jiang	421 (9.36%)	0 (0%)	4079 (90.64%)	0.229839%	0.00985599%

Tabla V.16: Análisis del error de localización ante una falta en  $m = 0.3$ .

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	15 (0.33%)	0 (0%)	4485 (99.67%)	0.00399706%	3.70677e-06%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	6.41204%	0.595404%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	1521 (33.8%)	1854 (41.2%)	29.9069%	7.50191%
Salim	0 (0%)	3309 (73.53%)	1191 (26.47%)	18.4025%	6.22711%
Filomena	0 (0%)	3308 (73.51%)	1192 (26.49%)	16.8526%	5.22512%
Jiang	256 (5.69%)	0 (0%)	4244 (94.31%)	0.391452%	0.0229592%

Tabla V.17: Análisis del error de localización ante una falta en  $m = 0.5$ .

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	11 (0.24%)	0 (0%)	4489 (99.76%)	0.00621271%	1.22813e-05%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	7.01389%	0.23134%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	1521 (33.8%)	1854 (41.2%)	30.2133%	7.51927%
Salim	0 (0%)	3309 (73.53%)	1191 (26.47%)	18.6359%	6.29001%
Filomena	0 (0%)	3309 (73.53%)	1191 (26.47%)	17.0108%	5.24513%
Jiang	367 (8.16%)	0 (0%)	4133 (91.84%)	0.511891%	0.0351098%

Tabla V.18: Análisis del error de localización ante una falta en  $m = 0.7$ .

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	7 (0.16%)	0 (0%)	4493 (99.84%)	0.00908828%	4.25949e-05%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	5.11574%	0.169512%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	1519 (33.76%)	1856 (41.24%)	29.9785%	7.48316%
Salim	0 (0%)	3310 (73.56%)	1190 (26.44%)	17.9068%	6.16082%
Filomena	0 (0%)	3309 (73.53%)	1191 (26.47%)	16.3905%	5.15169%
Jiang	613 (13.62%)	0 (0%)	3887 (86.38%)	0.37008%	0.0157522%

Tabla V.19: Análisis del error de localización ante una falta en  $m = 0.9$ .

En base a información obtenida de este set de casos simulados, se concluye que el resultado de los dos métodos propuestos tampoco se ven afectados significativamente por la posición que ocupa dentro de la sección afectada.



### V.2.4. Análisis de los métodos ante distintos valores de resistencia de falta

Otro interesante análisis que se plantea realizar sobre los métodos bajo prueba, consiste en estudiar su comportamiento ante distintos valores de resistencias de falta. Este parámetro, como ya se comentó en el Capítulo III, es uno de los principales problemas que plantean los métodos de un único terminal. Por el contrario, los métodos multi-terminal no deben verse afectados significativamente por este.

Según la topología planteada en el modelo, la resistencia de fallo en un cable subterráneo constaría de dos elementos: resistencia conductor-malla ( $R_f$ ) y resistencia malla-tierra ( $R_{fg}$ ). Así pues siguiendo la filosofía de estudio aplicada en los apartados anteriores, dividiremos este análisis en dos partes, analizando cada una de ellas por separado.

#### V.2.4.1. Análisis de los métodos ante distintos valores de resistencia conductor-malla

Observando la Figura V.10, es fácil apreciar como al ir aumentando este parámetro ( $R_f$ ), el método de la componente reactiva presenta una reducción significativa en el número de casos válidos. Por el contrario, el método de Jiang presenta un comportamiento similar en el rango de valores ensayado. Finalmente, destacan los métodos propuestos cuyo porcentaje de efectividad es muy superior a los demás métodos analizados. Salim y Filomena son también bastante insensibles a esta variación. Sin embargo, atendiendo a la Figura V.11, donde se refleja el valor de error medio obtenido con cada uno de los métodos, podemos observar como los basados

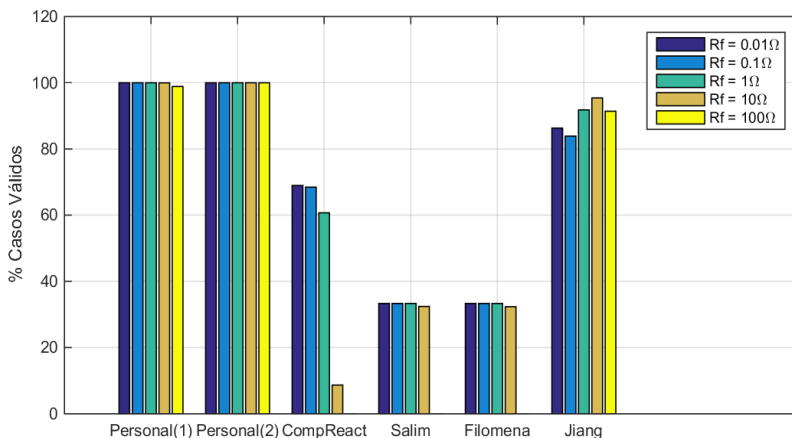


Figura V.10: Porcentaje de datos válidos según la resistencia conductor-malla.

**Tesis Doctoral:**

Sistema para Localización de Falta en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

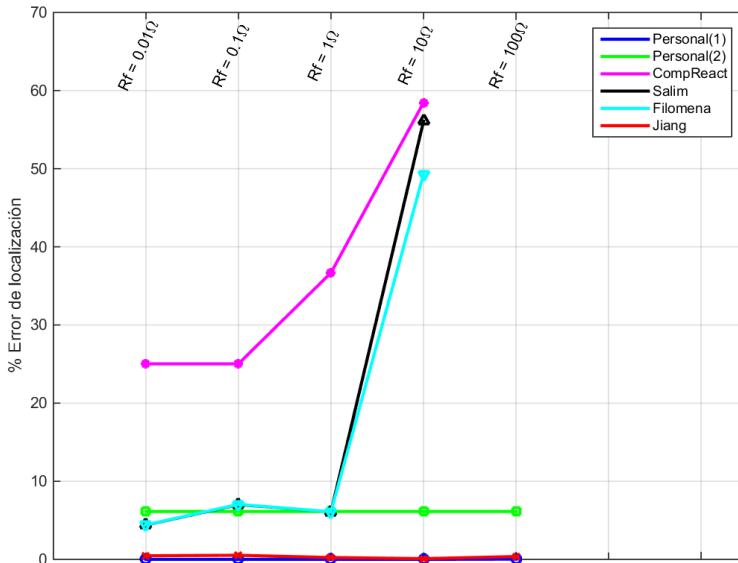


Figura V.11: Evolución del error medio según resistencia conductor-malla.

en medidas en un terminal, aumentando su error considerablemente con este valor, y llegando incluso a empeorar tanto que directamente se obtienen datos no válidos al obtenerse errores de más del 100%. Este comportamiento va en consonancia con la limitación de los métodos de un único terminal, que reflejan un resultado significativamente peor que el resto, al ir aumentando el valor de  $R_f$ . Por el contrario, los resultados obtenidos por los métodos propuestos, en gran medida por su filosofía multi-terminal, no se ven afectados significativamente por este parámetro, presentando además unos valores de error y aplicabilidad muy superior al resto. Bien es cierto, que Personal(2) presenta un porcentaje de error superior al del método de Jiang, sin embargo, como ya se comentó anteriormente, este error está asociado directamente al nivel de despliegue y puede reducirse aumentando el número de nodos.

Toda la información de los resultados de cada método puede ser vista en el conjunto de tablas siguiente (de la Tabla V.20 a la Tabla V.24).

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	0.00204488%	2.85862e-07%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	6.13426%	0.286822%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	272 (6.04%)	3103 (68.96%)	25.026%	6.7588%
Salim	0 (0%)	3000 (66.67%)	1500 (33.33%)	4.40609%	0.536867%
Filomena	0 (0%)	3000 (66.67%)	1500 (33.33%)	4.43246%	0.53578%
Jiang	616 (13.69%)	0 (0%)	3884 (86.31%)	0.4659%	0.0243976%

Tabla V.20: Análisis del error de localización ante una falta con  $R_f = 0.01\Omega$ .

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	0.00192897%	2.20038e-07%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	6.13426%	0.286822%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	294 (6.53%)	3081 (68.47%)	25.0306%	6.82979%
Salim	0 (0%)	3000 (66.67%)	1500 (33.33%)	7.00465%	1.51133%
Filomena	0 (0%)	3000 (66.67%)	1500 (33.33%)	7.03889%	1.50796%
Jiang	726 (16.13%)	0 (0%)	3774 (83.87%)	0.528452%	0.0438153%

Tabla V.21: Análisis del error de localización ante una falta con  $R_f = 0.1\Omega$ .

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	0.00196804%	3.22929e-07%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	6.13426%	0.286822%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	643 (14.29%)	2732 (60.71%)	36.6823%	7.79066%
Salim	0 (0%)	3000 (66.67%)	1500 (33.33%)	6.0972%	1.58176%
Filomena	0 (0%)	3000 (66.67%)	1500 (33.33%)	6.1005%	1.57867%
Jiang	369 (8.2%)	0 (0%)	4131 (91.8%)	0.238367%	0.00437659%

Tabla V.22: Análisis del error de localización ante una falta con  $R_f = 1\Omega$ .

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	2 (0.04%)	0 (0%)	4498 (99.96%)	0.00390517%	1.69683e-05%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	6.13426%	0.286822%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	2985 (66.33%)	390 (8.67%)	58.4569%	4.05784%
Salim	0 (0%)	3041 (67.58%)	1459 (32.42%)	56.0792%	2.70863%
Filomena	0 (0%)	3045 (67.67%)	1455 (32.33%)	49.2844%	3.08897%
Jiang	207 (4.6%)	0 (0%)	4293 (95.4%)	0.0951094%	0.000522325%

Tabla V.23: Análisis del error de localización ante una falta con  $R_f = 10\Omega$ .

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	51 (1.13%)	0 (0%)	4449 (98.87%)	0.0324597%	0.000257477%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	6.13426%	0.286822%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	3375 (75%)	0 (0%)	---	---
Salim	0 (0%)	4500 (100%)	0 (0%)	---	---
Filomena	0 (0%)	4500 (100%)	0 (0%)	---	---
Jiang	387 (8.6%)	0 (0%)	4113 (91.4%)	0.366066%	0.0192539%

Tabla V.24: Análisis del error de localización ante una falta con  $R_f = 100\Omega$ .

### V.2.4.2. Análisis de los métodos ante distintos valores de resistencia malla-tierra

La segunda parte que compone el análisis de la resistencia de fallo, plantea estudiar el comportamiento con la evolución de la resistencia malla-tierra ( $R_{fg}$ ). Así pues, en base a lo observado en la Figura V.12 se puede determinar que este parámetro no influye significativamente en la aplicabilidad de ninguno de los métodos estudiados. Esta afirmación se puede ratificar en base a lo mostrado en la Figura V.13, donde el error medio de localización de los casos válidos tampoco sufre una variación significativa en base al parámetro estudiado.

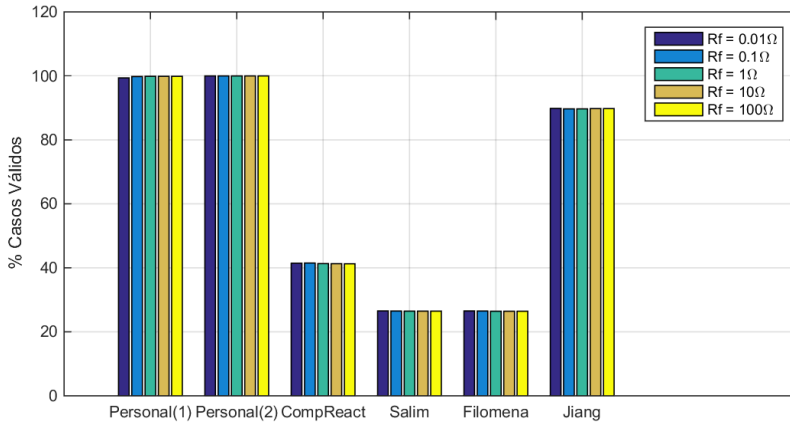


Figura V.12: Porcentaje de datos válidos según la resistencia malla-tierra.

Este hecho se debe fundamentalmente a la topología del cable subterráneo, que al contar con la malla protectora, posibilita un camino alternativo a tierra, resultando que la resistencia total a tierra entre el punto de fallos y masas, se define como la asociación en paralelo de tres resistencias: dos resistencias de malla (una hacia cada extremo del cable) y la propia resistencia de fallo ( $R_f$ ), acotándose su valor total por debajo siempre del menor de estos, no teniendo este por tanto un efecto significativo sobre el resultado de los distintos métodos.

Los resultados parciales de cada método se resumen en el conjunto de tablas siguiente (de la Tabla V.25 a la Tabla V.29).

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	29 (0.64%)	0 (0%)	4471 (99.36%)	0.0185717%	4.41483e-05%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	6.13426%	0.286822%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	1510 (33.56%)	1865 (41.44%)	29.3958%	7.49147%
Salim	0 (0%)	3306 (73.47%)	1194 (26.53%)	17.6453%	6.23881%
Filomena	0 (0%)	3307 (73.49%)	1193 (26.51%)	15.9801%	5.14213%
Jiang	457 (10.16%)	0 (0%)	4043 (89.84%)	0.295211%	0.0133937%

Tabla V.25: Análisis del error de localización ante una falta con  $R_{fg} = 0.01\Omega$ .

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	9 (0.2%)	0 (0%)	4491 (99.8%)	0.00709636%	8.27084e-05%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	6.13426%	0.286822%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	1508 (33.51%)	1867 (41.49%)	29.798%	7.65165%
Salim	0 (0%)	3308 (73.51%)	1192 (26.49%)	18.0226%	6.23131%
Filomena	0 (0%)	3308 (73.51%)	1192 (26.49%)	16.4154%	5.18159%
Jiang	464 (10.31%)	0 (0%)	4036 (89.69%)	0.332938%	0.017474%

Tabla V.26: Análisis del error de localización ante una falta con  $R_{fg} = 0.1\Omega$ .

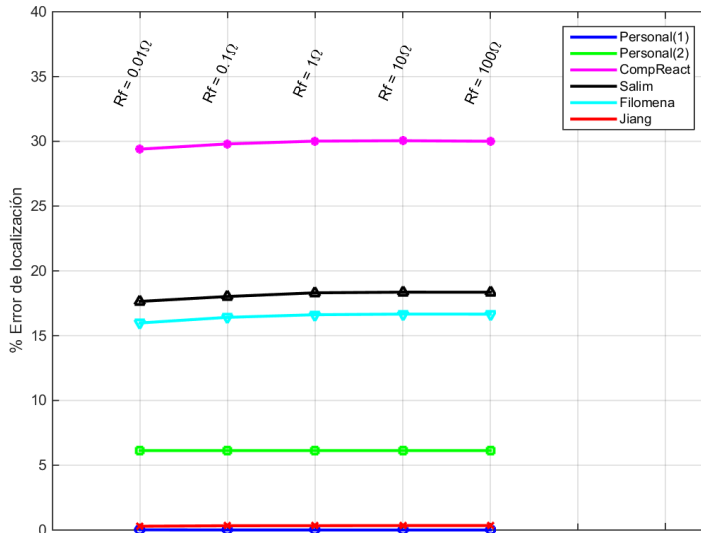


Figura V.13: Evolución del error medio según resistencia malla-tierra.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	5 (0.11%)	0 (0%)	4495 (99.89%)	0.00565957%	5.38867e-05%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	6.13426%	0.286822%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	1516 (33.69%)	1859 (41.31%)	30.0133%	7.61558%
Salim	0 (0%)	3309 (73.53%)	1191 (26.47%)	18.3083%	6.26209%
Filomena	0 (0%)	3310 (73.56%)	1190 (26.44%)	16.6174%	5.15194%
Jiang	464 (10.31%)	0 (0%)	4036 (89.69%)	0.338034%	0.0187762%

Tabla V.27: Análisis del error de localización ante una falta con  $R_{fg} = 1\Omega$ .

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	5 (0.11%)	0 (0%)	4495 (99.89%)	0.00539411%	4.92659e-05%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	6.13426%	0.286822%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	1517 (33.71%)	1858 (41.29%)	30.0437%	7.64811%
Salim	0 (0%)	3309 (73.53%)	1191 (26.47%)	18.3581%	6.27333%
Filomena	0 (0%)	3310 (73.56%)	1190 (26.44%)	16.6658%	5.16185%
Jiang	460 (10.22%)	0 (0%)	4040 (89.78%)	0.346637%	0.0203291%

Tabla V.28: Análisis del error de localización ante una falta con  $R_{fg} = 10\Omega$ .

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	5 (0.11%)	0 (0%)	4495 (99.89%)	0.00536752%	4.88179e-05%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	6.13426%	0.286822%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	1518 (33.73%)	1857 (41.27%)	30.0039%	7.62987%
Salim	0 (0%)	3309 (73.53%)	1191 (26.47%)	18.3548%	6.27709%
Filomena	0 (0%)	3310 (73.56%)	1190 (26.44%)	16.6623%	5.16518%
Jiang	460 (10.22%)	0 (0%)	4040 (89.78%)	0.346674%	0.0202829%

Tabla V.29: Análisis del error de localización ante una falta con  $R_{fg} = 100\Omega$ .

### V.2.5. Comportamiento de los métodos ante distintos porcentaje de carga

El último de los parámetros que se ha planteado analizar en el presente estudio es el porcentaje de carga al que está sometido el sistema de distribución sobre el que se aplican los métodos. El objetivo de esta prueba es evaluar la importancia que tiene dicho nivel de carga del sistema sobre los resultados de los distintos métodos.

A este respecto y atendiendo a la Figura V.14 y Figura V.15 se observa que, el método de componente reactiva es el que presenta una mayor dependencia, ya que como se

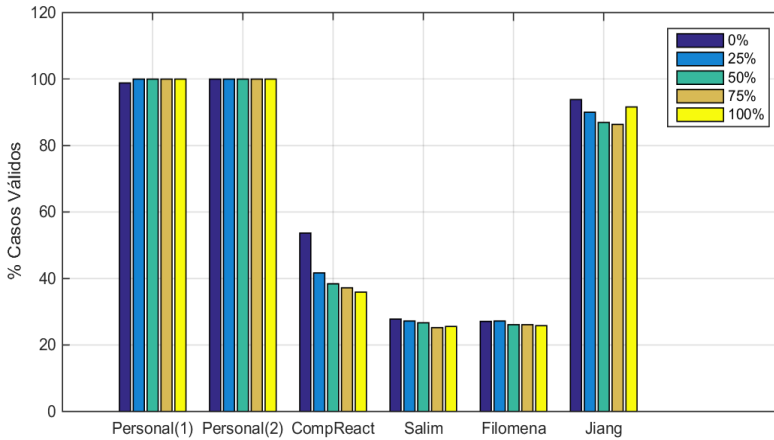


Figura V.14: Porcentaje de datos válidos según el porcentaje de carga.

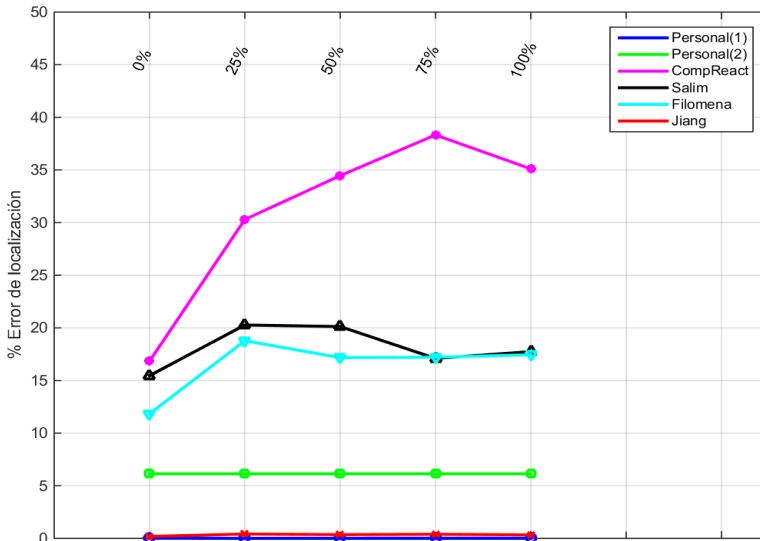


Figura V.15: Evolución del error medio según el porcentaje de carga.

explicó en el Capítulo III, dicho método asume que la corriente de falta es mucho mayor que la de carga, característica no válida en sistemas como el analizado.

Las características de los métodos multi-terminal destacan nuevamente, al no requerir una estimación de cargas (proceso que puede inducir a grandes errores). Así pues, vuelven a destacar los dos métodos propuestos, que junto con el método de Jiang presentan el mayor grado de inmunidad ante este parámetro.

Los resultados parciales de cada método se resumen en el conjunto de tablas siguiente (de la Tabla V.30 a la Tabla V.34).

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	53 (1.18%)	0 (0%)	4447 (98.82%)	0.013978%	0.0002443%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	6.13426%	0.286822%
Comp. Reactiva	1125(25%)	960 (21.33%)	2415 (53.67%)	16.8298%	4.37612%
Salim	0 (0%)	3250 (72.22%)	1250 (27.78%)	15.4549%	5.28781%
Filomena	0 (0%)	3281 (72.91%)	1219 (27.09%)	11.8275%	3.41644%
Jiang	277 (6.16%)	0 (0%)	4223 (93.84%)	0.183862%	0.00895808%

Tabla V.30: Análisis del error de localización ante una falta con carga al 0%.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	0.00499742%	4.17465e-06%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	6.13426%	0.286822%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	1500 (33.33%)	1875 (41.67%)	30.2899%	6.9786%
Salim	0 (0%)	3275 (72.78%)	1225 (27.22%)	20.2711%	7.07729%
Filomena	0 (0%)	3275 (72.78%)	1225 (27.22%)	18.7758%	6.24465%
Jiang	449 (9.98%)	0 (0%)	4051 (90.02%)	0.412095%	0.033989%

Tabla V.31: Análisis del error de localización ante una falta con carga al 25%.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	0.00683343%	8.14448e-06%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	6.13426%	0.286822%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	1647 (36.6%)	1728 (38.4%)	34.455%	7.47955%
Salim	0 (0%)	3300 (73.33%)	1200 (26.67%)	20.1193%	7.44306%
Filomena	0 (0%)	3325 (73.89%)	1175 (26.11%)	17.1717%	5.31574%
Jiang	588 (13.07%)	0 (0%)	3912 (86.93%)	0.352831%	0.0186334%

Tabla V.32: Análisis del error de localización ante una falta con carga al 50%.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	0.00783996%	1.14091e-05%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	6.13426%	0.286822%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	1702 (37.82%)	1673 (37.18%)	38.3232%	8.37599%
Salim	0 (0%)	3366 (74.8%)	1134 (25.2%)	17.0976%	5.29014%
Filomena	0 (0%)	3325 (73.89%)	1175 (26.11%)	17.2091%	5.00988%
Jiang	613 (13.62%)	0 (0%)	3887 (86.38%)	0.389278%	0.0209393%

Tabla V.33: Análisis del error de localización ante una falta con carga al 75%.

Método	Sin resultado	Fuera de la sección	Válidos	Error medio normalizado	$\sigma$ error normalizado
Personal(1)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	0.00845289%	1.3909e-05%
Personal(2)	0 (0%)	0 (0%)	4500 (100%)	6.13426%	0.286822%
Comp. Reactiva	1125 (25%)	1760 (39.11%)	1615 (35.89%)	35.1076%	8.72718%
Salim	0 (0%)	3350 (74.44%)	1150 (25.56%)	17.7382%	5.97375%
Filomena	0 (0%)	3339 (74.2%)	1161 (25.8%)	17.4429%	5.54415%
Jiang	378 (8.4%)	0 (0%)	4122 (91.6%)	0.330742%	0.00811915%

Tabla V.34: Análisis del error de localización ante una falta con carga al 100%.

### V.3. Resumen del capítulo

El presente capítulo se ha elaborado con el objetivo de validar la bondad de los dos nuevos métodos de localización de faltas para líneas subterráneas planteados en el Capítulo IV. Para llevar a cabo dicha prueba, se ha implantado un modelo de líneas de distribución subterránea basado en la red *IEEE 37 Node Test Feeder*, y se ha sometido a ésta en simulación, a un conjunto de 22500 casos de falta, obteniéndose para cada uno de ellos los registros asociados de corriente y tensión.

A partir de estos datos, en el presente apartado se realiza un estudio comparativo del comportamiento de seis métodos de localización: los dos propuestos en el presente trabajo (Personal(1) y Personal(2)) y tres basados en medidas en un único terminal (comp. reactiva, Salim y Filomena) y uno basado en medidas multi-terminal (Jiang). Todos estos han sido evaluados ante distintos parámetros (tales como: tipologías de fallo, posición de la falta, resistencia de fallo y porcentaje de carga del sistema), permitiendo evaluar su dependencia ante cada uno de estos.

Finalmente se quiere destacar los excelentes resultados obtenidos por los dos métodos propuestos ante el conjunto de datos de ensayo. Concretamente, al ser métodos multi-terminal no se ven apenas afectados por los efectos del aumento en la distancia del fallo, en la resistencia de fallo o en errores de estimación de las cargas, típicos en sistemas basados en un terminal. Los resultados obtenidos demuestran la bondad de los métodos propuestos, quedando demostrada la utilidad de estos para resolver el problema de la localización de faltas en redes de distribución subterráneas.



## VI. Conclusiones y Líneas futuras

---

En el presente trabajo de tesis se ha propuesto como aportación principal el desarrollo de dos nuevos métodos de localización de faltas, orientados principalmente a resolver este problema en redes de distribución subterráneas, los cuales han sido analizados en profundidad. Todo el trabajo realizado ha permitido obtener las siguientes conclusiones:

### VI.1. Conclusiones del trabajo de investigación

La principal conclusión del trabajo es en sí misma el desarrollo de los métodos propuestos, así como la validación de los mismos a través de los ensayos realizados. En este sentido, se han obtenido dos métodos, con las siguientes características, que los convierten en una importante aportación en su ámbito:

- Ambos métodos son técnicas multi-terminal: este hecho les permite beneficiarse de las ventajas típicas de esta filosofía como son: la independencia del valor de la resistencia de fallo, así como capacidad de localización sin tener que hacer una estimación de las cargas conectadas en la red. Esa última característica hace que estos métodos sean aplicables en sistemas con presencia de generación distribuida, típicos en las *Smart Grids*.
- Métodos basados en únicamente en medidas de corriente: esta es una de las principales características que distinguen a los métodos propuestos del resto de los analizados en la literatura. Este hecho facilita enormemente su despliegue, al no requerir la medida de tensión, básica en otros métodos, y habitualmente inaccesible en este tipo de redes.

Por otro lado una vez analizada la viabilidad tecnológica y la validez de ambos métodos propuestos, se puede plantear, cuál de las dos alternativas es la más adecuada para su implantación. En este sentido, el método de análisis de las corrientes de malla, Personal(1), presenta una mayor aplicabilidad a corto plazo, ya que requiere un despliegue mínimo (un sensor por centro de transformación). En contrapartida, el método basado en el balance neto de corrientes, Personal(2), requiere un mayor esfuerzo en el despliegue, pero sin embargo, permite dotar al sistema de una nueva infraestructura, que no ha de ceñirse exclusivamente a la aplicación propuesta, pudiendo añadir más sensores de distintos parámetros, abriendo un nuevo universo de información que puede ser explotado para futuros estudios.

## **VI.2. Líneas futuras de trabajo**

El presente trabajo de investigación a través de su desarrollo ha permitido al autor el desarrollo y estudio de los distintos ámbitos en los que se enmarca el presente trabajo de tesis. En este sentido, derivadas de este trabajo, se plantean distintas líneas e ideas que permitirían continuar el desarrollo iniciado. Ejemplo de estas serían:

- Explotación de los nuevos datos suministrados por los sensores: Como se ha mencionado a lo largo del presente trabajo, los métodos se basan en medidas exclusivamente de corriente. Sin embargo, aprovechando la infraestructura desplegada y siguiendo una filosofía de *Smart Grid*, se plantea la posibilidad de dotar a los nodos, con otros tipos de sensores que permiten aumentar el conjunto de datos disponibles (ej.: temperatura, humedad, nivel de iluminación, sonido, etc.).
- Análisis de la influencia de topologías más complejas de red: plantea el estudio de otras características de éstas que permitan mejorar o facilitar la localización de faltas. Un ejemplo de esto podía ser el *cross bonding*, que solucionaría el problema de la medida neta de corriente (malla+conductor) del cable apantallado.
- Extensión a otro tipo de redes: Los desarrollos realizados en el presente trabajo se enmarcan en el ámbito de las redes subterráneas, sin embargo algunas de las hipótesis y procedimientos propuestos pueden ser aportados a otro tipo de redes de distribución (aérea o mixta), planteándose como posibilidad el estudio de la extensión de estas ideas.

### VI.3. Aportaciones científicas relacionadas

A lo largo del tiempo en el que se ha llevado a cabo este trabajo, directamente relacionados con éste, se han realizado varias aportaciones científicas a través de artículos en revistas indexadas, artículos en congresos y patentes. Adicionalmente, también se ha completado la formación a través de la participación en distintos proyectos de investigación, que ha permitido adquirir una visión concreta del problema, el entorno, y la solución propuesta. Estos trabajos se resumen en los siguientes apartados:

#### VI.3.1. Artículos en revistas indexadas según JCR

- **E. Personal**, J. I. Guerrero, A. Garcia, M. Peña, and C. Leon, "Key performance indicators: A useful tool to assess Smart Grid goals," *Energy*, vol. 76, pp. 976-988, Nov. 2014. [JCR Impact Factor (2014): 4.844]
- D. F. Larios, J. M. Mora-Merchan, **E. Personal**, J. Barbancho, and C. Leon, "Implementing a Distributed WSN Based on IPv6 for Ambient Monitoring," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2013, pp. 1-14, 2013. [JCR Impact Factor (2013): 0.923]

#### Otros artículos:

- J.-C. Montano, C. Leon, A. Garcia, A. Lopez, I. Monedero, and **E. Personal**, "Random Generation of Arbitrary Waveforms for Emulating Three-Phase Systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, no. 11, pp. 4032-4040, Nov. 2012. [JCR Impact Factor (2012): 5.165]
- Menendez, A. Barbancho, **E. Personal**, and D. F. Larios, "Industrial Fieldbus Improvements in Power Distribution and Conducted Noise Immunity With No Extra Costs," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 7, pp. 2653-2661, Jul. 2011. [JCR Impact Factor (2011): 5.160]

#### VI.3.2. Patentes

- León de Mora, Carlos; García Delgado, Antonio; Biscarri Triviño, Félix; Elena Ortega, José Manuel; Molina Cantero, Francisco Javier; **Personal Vázquez, Enrique**; Guerrero Alonso, Juan Ignacio, "Dispositivo y Método para la Localización de Faltas en Líneas de Distribución Eléctrica", Número Patente: P201001211, Extensión Internacional: WO2012038564.
- León de Mora, Carlos; García Delgado, Antonio; Molina Cantero, Francisco Javier; Luque Rodríguez, Joaquín; Barbancho Concejero, Julio; **Personal Vázquez, Enrique**; Larios Marín, Diego Francisco, "Sistema inalámbrico distribuido y procedimiento para la clasificación y localización de faltas en una red de distribución eléctrica subterránea", Número Patente: P201500072.

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

### **VI.3.3. Congresos**

- Garcia, A.; Biscarri, F.; Leon, C.; **Personal, E.**, "Estimation of the line-to-line voltage phases in MV distribution faults using transformer inrush currents", *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE, Minneapolis, USA*. 25-29 July 2010.
- **Personal, E.**; Garcia, A.; Biscarri, F.; Leon, C., "Characterization of a Medium Voltage Line Adding the Transformer's Saturation Effects; a New Test Bench to Fault Location Methods", *12th Portuguese-Spanish Conference on Electrical Engineering, XIICLEEE, Ponta Delgada-Azores, Portugal*, 2011.

## VII. Referencias

---

- [1] *IEEE Std C37.114-2014: IEEE Guide for Determining Fault Location on AC Transmission and Distribution Lines*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2015.
- [2] R. E. . Brown, *Electric Power Distribution Reliability*, Second Edition. CRC Press, 2008.
- [3] R. Ciric, H. Nouri, and V. Terzija, "Impact of distributed generators on arcing faults in distribution networks," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 5, no. 5, p. 596, 2011.
- [4] *Capítulo V - Redes de Distribución en Media Tensión (Normas particulares y condiciones técnicas y de seguridad)*. Endesa, 2005.
- [5] *Norma GEAND010; Conductores desnudos para líneas eléctricas aéreas de alta tensión de tensión nominal hasta 30 kV*. Endesa Distribución, 1997.
- [6] *Norma GEDND001; Cables aislados para redes subterráneas de alta tensión hasta 30 kV*. Endesa Distribución, 1997.
- [7] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*. CRC Press, 2001.
- [8] T. A. Short, *Electric power distribution handbook*. CRC Press, 2003.
- [9] R. Patsch and J. Jung, "Water trees in cables: generation and detection," *IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology*, vol. 146, no. 5, pp. 253–259, Sep. 1999.
- [10] G. Chen and C. Tham, "Electrical treeing characteristics in XLPE power cable insulation in frequency range between 20 and 500 Hz," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 16, no. 1, pp. 179–188, Feb. 2009.
- [11] J. J. Grainger and W. D. Stevenson, *Power system analysis*. CRC Press, 1994.
- [12] M. S. Sachdev and M. A. Baribeau, "A New Algorithm for Digital Impedance Relays," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-98, no. 6, pp. 2232–2240, Nov. 1979.
- [13] A. Rahmati and R. Adhami, "A Fault Detection and Classification Technique Based on Sequential Components," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 50, no. 6, pp. 4202–4209, Nov. 2014.

- [14] S. M. Hashemi, M. T. Hagh, and H. Seyedi, "Transmission-Line Protection: A Directional Comparison Scheme Using the Average of Superimposed Components," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 28, no. 2, pp. 955–964, Apr. 2013.
- [15] Y. Sheng and S. M. Rovnyak, "Decision Tree-Based Methodology for High Impedance Fault Detection," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 533–536, Apr. 2004.
- [16] F. Liang and B. Jeyasurya, "Transmission Line Distance Protection Using Wavelet Transform Algorithm," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 545–553, Apr. 2004.
- [17] M. Michalik, W. Rebizant, M. Lukowicz, S.-J. Lee, and S.-H. Kang, "High-Impedance Fault Detection in Distribution Networks With Use of Wavelet-Based Algorithm," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 4, pp. 1793–1802, Oct. 2006.
- [18] *IEEE Std C37.111-1999: IEEE Standard Common Format for Transient Data Exchange (COMTRADE) for Power Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2013.
- [19] T. Adu, "An accurate fault classification technique for power system monitoring devices," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 3, pp. 684–690, Jul. 2002.
- [20] K. M. Silva, B. A. Souza, and N. S. D. Brito, "Fault Detection and Classification in Transmission Lines Based on Wavelet Transform and ANN," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 21, no. 4, pp. 2058–2063, Oct. 2006.
- [21] F. E. Perez, E. Ordun\fa, and G. Guidi, "Adaptive wavelets applied to fault classification on transmission lines," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 5, no. 7, pp. 694–702, 2011.
- [22] T. Dalstein and B. Kulicke, "Neural network approach to fault classification for high speed protective relaying," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, no. 2, pp. 1002–1011, Apr. 1995.
- [23] A. Yadav and A. Swetapadma, "Enhancing the performance of transmission line directional relaying, fault classification and fault location schemes using fuzzy inference system," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 9, no. 6, pp. 580–591, Apr. 2015.
- [24] M. Jayabharata Reddy and D. K. Mohanta, "A wavelet-fuzzy combined approach for classification and location of transmission line faults," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 29, no. 9, pp. 669–678, Nov. 2007.
- [25] A. Jamehbozorg and S. M. Shahrtash, "A Decision-Tree-Based Method for Fault Classification in Single-Circuit Transmission Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2190–2196, Oct. 2010.
- [26] B. Ravikumar, D. Thukaram, and H. P. Khincha, "Application of support vector machines for fault diagnosis in power transmission system," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 2, no. 1, pp. 119–130, 2008.
- [27] J.-A. Jiang, C.-L. Chuang, Y.-C. Wang, C.-H. Hung, J.-Y. Wang, C.-H. Lee, and Y.-T. Hsiao, "A Hybrid Framework for Fault Detection, Classification, and Location - Part I: Concept, Structure, and Methodology," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 1988–1998, Jul. 2011.
- [28] C. Rudin, R. J. Passonneau, A. Radeva, S. Ierome, and D. F. Isaac, "21st-Century Data Miners Meet 19th-Century Electrical Cables," *Computer*, vol. 44, no. 6, pp. 103–105, Jun. 2011.

- [29] *Real Decreto 1955/2000, de 1 de diciembre. BOE núm. 310, de 27 de diciembre de 2000, páginas 45988 a 46040 (53 págs.).* Ministerio de Economía, 2000.
- [30] *UNE-EN 50160: Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución (ver. traducida de la EN50160:2010).* Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR), 2011.
- [31] *IEEE Std P1159-2009: IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.* Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2009.
- [32] *Ley 54/1997, de 27 de noviembre. BOE núm. 285, de 28 de noviembre de 1997, páginas 35097 a 35126 (30 págs.).* Jefatura del Estado, 1997.
- [33] *Orden ECO/797/2002, de 22 de marzo. BOE núm. 89, de 13 de abril de 2002, páginas 14170 a 14176 (7 págs.).* Ministerio de Economía, 2002.
- [34] *Real Decreto 1634/2006, de 29 de diciembre. BOE núm. 312, de 30 de diciembre de 2006, páginas 46656 a 46679 (24 págs.).* Ministerio de Industria, Turismo y Comercio, 2006.
- [35] *IEEE Std 1366-2012: IEEE Guide for Electric Power Distribution Reliability Indices.* Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2012.
- [36] *Calidad eléctrica zonal - Datos Abiertos - SEDE-e: Sede electrónica del Ministerio. Ministerio de Industria, Energía y Turismo [ONLINE]* <https://sede.minetur.gob.es/es-ES/datosabiertos/catalogo/calidad-electrica>, 2015.
- [37] H. Farhangi, "The path of the smart grid," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 18–28, Jan. 2010.
- [38] M. Kezunovic, J. D. McCalley, and T. J. Overbye, "Smart Grids and Beyond: Achieving the Full Potential of Electricity Systems," *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. Special Centennial Issue, pp. 1329–1341, May 2012.
- [39] M. G. Simoes, R. Roche, E. Kyriakides, S. Suryanarayanan, B. Blunier, K. D. McBee, P. H. Nguyen, P. F. Ribeiro, and A. Miraoui, "A Comparison of Smart Grid Technologies and Progresses in Europe and the U.S.," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 48, no. 4, pp. 1154–1162, Jul. 2012.
- [40] A. Q. Huang, M. L. Crow, G. T. Heydt, J. P. Zheng, and S. J. Dale, "The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 1, pp. 133–148, Jan. 2011.
- [41] M. Wissner, "The Smart Grid - A saucerful of secrets?," *Applied Energy*, vol. 88, no. 7, pp. 2509–2518, Jul. 2011.
- [42] L. Ardito, G. Procaccianti, G. Menga, and M. Morisio, "Smart Grid Technologies in Europe: An Overview," *Energies*, vol. 6, no. 1, pp. 251–281, Jan. 2013.
- [43] B. B. Alagoz, A. Kaygusuz, and A. Karabiber, "A user-mode distributed energy management architecture for smart grid applications," *Energy*, vol. 44, no. 1, pp. 167–177, Aug. 2012.
- [44] R. H. Lasseter, "Smart Distribution: Coupled Microgrids," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 1074–1082, Jun. 2011.
- [45] H. L. Ferreira, R. Garde, G. Fulli, W. Kling, and J. P. Lopes, "Characterisation of electrical energy storage technologies," *Energy*, vol. 53, pp. 288–298, May 2013.
- [46] A. G. Boulanger, A. C. Chu, S. Maxx, and D. L. Waltz, "Vehicle Electrification: Status and Issues," *Proceedings of the IEEE*, vol. 99, no. 6, pp. 1116–1138, Jun. 2011.
- [47] K. Hedegaard, H. Ravn, N. Juul, and P. Meibom, "Effects of electric vehicles on power systems in Northern Europe," *Energy*, vol. 48, no. 1, pp. 356–368, Dec. 2012.

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

- [48] W. Kempton and J. Tomic, "Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue," *Journal of Power Sources*, vol. 144, no. 1, pp. 268–279, Jun. 2005.
- [49] P. Palensky and D. Dietrich, "Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 7, no. 3, pp. 381–388, Aug. 2011.
- [50] P. Zhang, F. Li, and N. Bhatt, "Next-Generation Monitoring, Analysis, and Control for the Future Smart Control Center," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 2, pp. 186–192, Sep. 2010.
- [51] E. Ancillotti, R. Bruno, and M. Conti, "The role of communication systems in smart grids: Architectures, technical solutions and research challenges," *Computer Communications*, vol. 36, no. 17–18, pp. 1665–1697, Nov. 2013.
- [52] R. Ma, H.-H. Chen, Y.-R. Huang, and W. Meng, "Smart Grid Communication: Its Challenges and Opportunities," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 36–46, Mar. 2013.
- [53] E. Personal, J. I. Guerrero, A. Garcia, M. Peña, and C. Leon, "Key performance indicators: A useful tool to assess Smart Grid goals," *Energy*, vol. 76, pp. 976–988, Nov. 2014.
- [54] "Grid 2030' A National Vision for Electricity's Second 100 Years, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, US Department of Energy," 2003.
- [55] I. Hwang, S. Kim, Y. Kim, and C. E. Seah, "A Survey of Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration Methods," *IEEE Transactions Control Systems Technology*, vol. 18, no. 3, pp. 636–653, May 2010.
- [56] S. M. Amin and A. M. Giacomoni, "Smart Grid - Safe, Secure, Self-Healing," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 10, no. 1, pp. 33–40, Jan. 2012.
- [57] R. A. Walling, R. Saint, R. C. Dugan, J. Burke, and L. A. Kojovic, "Summary of Distributed Resources Impact on Power Delivery Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 3, pp. 1636–1644, Jul. 2008.
- [58] S. M. Brahma, "Fault Location in Power Distribution System With Penetration of Distributed Generation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 3, pp. 1545–1553, Jul. 2011.
- [59] P.-C. Chen, V. Malbasa, Y. Dong, and M. Kezunovic, "Sensitivity Analysis of Voltage Sag Based Fault Location With Distributed Generation," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 2098–2106, Jul. 2015.
- [60] M. Kezunovic, "Intelligent Design," *IEEE Power and Energy Magazine*, vol. 8, no. 6, pp. 37–44, Nov. 2010.
- [61] R. Das, V. Madani, F. Aminifar, J. McDonald, S. S. Venkata, D. Novosel, A. Bose, and M. Shahidehpour, "Distribution Automation Strategies: Evolution of Technologies and the Business Case," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 2166–2175, Jul. 2015.
- [62] C. N. Lu, M. T. Tsay, Y. J. Hwang, and Y. C. Lin, "An artificial neural network based trouble call analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 9, no. 3, pp. 1663–1668, Jul. 1994.
- [63] E. Laverty and N. N. Schulz, "An improved algorithm to aid in post-heat storm restoration," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 2, pp. 446–451, May 1999.



- [64] T. W. Stringfield, D. J. Marihart, and R. F. Stevens, "Fault Location Methods for Overhead Lines," *Transactions AIEE, Part III: Power Apparatus Systems*, vol. 76, no. 3, pp. 518–529, Apr. 1957.
- [65] E. C. Bascom, D. W. Von Dollen, and H. W. Ng, "Computerized underground cable fault location expertise," *Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference*, 1994.
- [66] T. Kawai, N. Takinami, T. Chino, K. Amano, K. Watanabe, Y. Nakamura, and N. Shiseki, "A new approach to cable fault location using fiber optic technology.," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, no. 1, pp. 85–91, 1995.
- [67] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow, and T. Matsushima, "Development of a New Type Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-101, no. 8, pp. 2892–2898, Aug. 1982.
- [68] J. B. Lee, C. W. Ha, and C. H. Jung, "Development of digital distance relaying algorithm in combined transmission lines with underground power cables," *2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.01CH37262)*, 2001.
- [69] J. Sadeh and H. Afradi, "A new and accurate fault location algorithm for combined transmission lines using Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System," *Electric Power Systems Research*, vol. 79, no. 11, pp. 1538–1545, Nov. 2009.
- [70] S. Lotfifard, M. Kezunovic, and M. J. Mousavi, "A Systematic Approach for Ranking Distribution Systems Fault Location Algorithms and Eliminating False Estimates," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 28, no. 1, pp. 285–293, Jan. 2013.
- [71] A. R. van C. Warrington, *Protective Relays: Their Theory and Practice*, vol. 1. Springer, 1968.
- [72] A. A. Girgis, C. M. Fallon, and D. L. Lubkeman, "A fault location technique for rural distribution feeders," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, no. 6, pp. 1170–1175, 1993.
- [73] R. Das, M. S. Sachdev, and T. S. Sidhu, "A fault locator for radial subtransmission and distribution lines," *Power Engineering Society Summer Meeting*, 2000.
- [74] R. Das, "Determining the locations of faults in distribution systems," University of Saskatchewan, 1998.
- [75] J. M. David Hart Yi Hu Damir Novosel, "Patente US5839093A: System for locating faults and estimating fault resistance in distribution networks with tapped loads," 1998.
- [76] M.-S. Choi, S.-J. Lee, D.-S. Lee, and B.-G. Jin, "A New Fault Location Algorithm Using Direct Circuit Analysis for Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 35–41, Jan. 2004.
- [77] W. W. Hager, "Updating the Inverse of a Matrix," *SIAM Review*, vol. 31, no. 2, pp. 221–239, Jun. 1989.
- [78] S.-J. Lee, M.-S. Choi, S.-H. Kang, B.-G. Jin, D.-S. Lee, B.-S. Ahn, N.-S. Yoon, H.-Y. Kim, and S.-B. Wee, "An Intelligent and Efficient Fault Location and Diagnosis Scheme for Radial Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 524–532, Apr. 2004.

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

- [79] C. A. Reineri and C. Alvarez, "Load research for fault location in distribution feeders," *IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, vol. 146, no. 2, p. 115, 1999.
- [80] R. H. Salim, M. Resener, A. D. Filomena, K. Rezende Caino de Oliveira, and A. S. Bretas, "Extended Fault-Location Formulation for Power Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 2, pp. 508–516, Apr. 2009.
- [81] A. D. Filomena, M. Resener, R. H. Salim, and A. S. Bretas, "Fault Location for Underground Distribution Feeders: An Extended Impedance-Based Formulation with Capacitive Current Compensation," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 31, no. 9, pp. 489–496, 2009.
- [82] Y. Gong and A. Guzman, "Integrated Fault Location System for Power Distribution Feeders," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 3, pp. 1071–1078, May 2013.
- [83] M. C. de Almeida, F. F. Costa, S. Xavier-de-Souza, and F. Santana, "Optimal placement of faulted circuit indicators in power distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 81, no. 2, pp. 699–706, Feb. 2011.
- [84] J. Mora-Florez, V. Barrera-Nuez, and G. Carrillo-Caicedo, "Fault Location in Power Distribution Systems Using a Learning Algorithm for Multivariable Data Analysis," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1715–1721, Jul. 2007.
- [85] R. H. Salim, K. de Oliveira, A. D. Filomena, M. Resener, and A. S. Bretas, "Hybrid Fault Diagnosis Scheme Implementation for Power Distribution Systems Automation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 4, pp. 1846–1856, Oct. 2008.
- [86] J. Mora-Flórez, G. Morales-España, and S. Pérez-Londoño, "Learning-based strategy for reducing the multiple estimation problem of fault zone location in radial power systems," *IET Generation, Transmission and Distribution*, vol. 3, no. 4, p. 346, 2009.
- [87] H. Mokhlis, H. Y. Li, and A. R. Khalid, "The application of voltage sags pattern to locate a faulted section in distribution network," *International Review of Electrical Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 173–179, 2010.
- [88] H. Mokhlis, A. H. A. Bakar, D. N. A. Talib, and H. Mohamad, "The improvement of voltage sags pattern approach to locate a fault in distribution network," *International Review of Electrical Engineering*, vol. 5, no. 3, pp. 1159–1164, 2010.
- [89] H. Mokhlis, H. Mohamad, H. Li, and A. H. A. Bakar, "Voltage Sags Matching to Locate Faults for Underground Distribution Networks," *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 43–48, 2011.
- [90] G. Morales-Espana, J. Mora-Florez, and H. Vargas-Torres, "Elimination of Multiple Estimation for Fault Location in Radial Power Systems by Using Fundamental Single-End Measurements," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 3, pp. 1382–1389, Jul. 2009.
- [91] Y. Liao, "A novel method for locating faults on distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 117, pp. 21–26, Dec. 2014.
- [92] C. León de Mora, A. García Delgado, F. Biscarri Triviño, J. M. Elena Ortega, F. J. Molina Cantero, E. Personal Vázquez, and J. I. Guerrero Alonso, "Patente WO2012038564: Dispositivo y Método para la Localización de Faltas en Líneas de Distribución Eléctrica," 2010.

- [93] A. Garcia, F. Biscarri, C. Leon, and E. Personal, "Estimation of the line-to-line voltage phases in MV distribution faults using transformer inrush currents," *IEEE PES General Meeting*, Jul. 2010.
- [94] M. M. Saha, R. Das, P. Verho, and D. Novosel, "Review of fault location techniques for distribution systems," *Power Systems and Communications Infrastructures for the future, Beijing*, Sep. 2002.
- [95] J. Mora-Flórez, J. Meléndez, and G. Carrillo-Caicedo, "Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 4, pp. 657–666, Apr. 2008.
- [96] A. A. Girgis, D. G. Hart, and W. L. Peterson, "A new fault location technique for two- and three-terminal lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 7, no. 1, pp. 98–107, 1992.
- [97] D. Novosel, D. G. Hart, E. Udren, and J. Garitty, "Unsynchronized two-terminal fault location estimation," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 130–138, 1996.
- [98] C.-W. Liu, T.-C. Lin, C.-S. Yu, and J.-Z. Yang, "A Fault Location Technique for Two-Terminal Multisection Compound Transmission Lines Using Synchronized Phasor Measurements," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 113–121, Mar. 2012.
- [99] R. A. F. Pereira, L. G. W. da Silva, M. Kezunovic, and J. R. S. Mantovani, "Improved Fault Location on Distribution Feeders Based on Matching During-Fault Voltage Sags," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 24, no. 2, pp. 852–862, Apr. 2009.
- [100] C. S. Cheng and D. Shirmohammadi, "A three-phase power flow method for real-time distribution system analysis," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 671–679, May 1995.
- [101] M. Kezunovic, "Smart Fault Location for Smart Grids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 11–22, Mar. 2011.
- [102] Q. Jiang, B. Wang, and X. Li, "An Efficient PMU-Based Fault-Location Technique for Multiterminal Transmission Lines," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 4, pp. 1675–1682, Aug. 2014.
- [103] D. W. Allan and M. A. Weiss, "Accurate Time and Frequency Transfer During Common-View of a GPS Satellite," *34th Annual Frequency Control Symposium*, pp. 334–346, May 1980.
- [104] M. A. Lombardi, L. M. Nelson, A. N. Novick, and V. S. Zhang, "Time and Frequency Measurements Using the Global Positioning System," *Cal Lab: International Journal of Metrology*, vol. 8, no. 3, pp. 26–33, 2001.
- [105] S.-R. Nam, S.-H. Kang, S.-J. Ahn, and J.-H. Choi, "Single line-to-ground fault location based on unsynchronized phasors in automated ungrounded distribution systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 86, pp. 151–157, May 2012.
- [106] Y. Liao and M. Kezunovic, "Optimal Estimate of Transmission Line Fault Location Considering Measurement Errors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 22, no. 3, pp. 1335–1341, Jul. 2007.
- [107] A. H. Al-Mohammed and M. A. Abido, "Fault Location Based on Synchronized Measurements: A Comprehensive Survey," *The Scientific World Journal*, vol. 2014, pp. 1–10, 2014.
- [108] *IEEE Std C37.118.1-2011: IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems*. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2011.

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

- [109] S. Borlase, *Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions*. CRC Press, 2012.
- [110] M. Kezunovic, J. Mrkic, and B. Perunicic, "An Accurate Fault Location Algorithm using Synchronized Sampling," *Electric Power Systems Research*, vol. 29, no. 3, pp. 161–169, May 1994.
- [111] A. Gopalakrishnan, M. Kezunovic, S. M. McKenna, and D. M. Hamai, "Fault location using the distributed parameter transmission line model," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 4, pp. 1169–1174, 2000.
- [112] P. Dutta, A. Esmaeilian, and M. Kezunovic, "Transmission-Line Fault Analysis Using Synchronized Sampling," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 29, no. 2, pp. 942–950, Apr. 2014.
- [113] A. Esmaeilian, T. Popovic, and M. Kezunovic, "Transmission line relay mis-operation detection based on time-synchronized field data," *Electric Power Systems Research*, vol. 125, pp. 174–183, Aug. 2015.
- [114] D. Borrás, M. Castilla, N. Moreno, and J. C. Montano, "Wavelet and neural structure: a new tool for diagnostic of power system disturbances," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 1, pp. 184–190, 2001.
- [115] D. C. Robertson, O. I. Camps, J. S. Mayer, and W. B. Gish, "Wavelets and electromagnetic power system transients," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 2, pp. 1050–1058, Apr. 1996.
- [116] C. S. Burrus, R. A. Gopinath, and H. Guo, *Introduction to Wavelets and Wavelet Transforms: A Primer*. Prentice Hall, 1997.
- [117] S. G. Mallat, "A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 11, no. 7, pp. 674–693, Jul. 1989.
- [118] A. P. Alves da Silva, A. C. S. Lima, and S. M. Souza, "Fault location on transmission lines using complex-domain neural networks," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 43, no. 1, pp. 720–727, Dec. 2012.
- [119] A. Rafinia and J. Moshtagh, "A new approach to fault location in three-phase underground distribution system using combination of wavelet analysis with ANN and FLS," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 55, pp. 261–274, Feb. 2014.
- [120] Z. Q. Bo, G. Weller, and M. A. Redfern, "Accurate fault location technique for distribution system using fault-generated high-frequency transient voltage signals," *IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution*, vol. 146, no. 1, pp. 73–79, 1999.
- [121] H. Dommel and J. Michels, "High-speed relaying using traveling wave transient analysis," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 97, no. 4, p. 1011, 1978.
- [122] P. McLaren and S. Rajendra, "Travelling-Wave Techniques Applied to the Protection of Teed Circuits:- Principle of Travelling-Wave Techniques," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 12, pp. 3544–3550, Dec. 1985.
- [123] P. McLaren and S. Rajendra, "Travelling-Wave Techniques Applied to the Protection of Teed Circuits:- Multi-Phase/Multi-circuit System," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, no. 12, pp. 3551–3557, Dec. 1985.

- [124] W. C. Duesterhoeft, M. W. Schulz, and E. Clarke, "Determination of Instantaneous Currents and Voltages by Means of Alpha, Beta, and Zero Components," *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, vol. 70, no. 2, pp. 1248–1255, Jul. 1951.
- [125] W. Zhao, Y. . Song, and W. . Chen, "Improved GPS travelling wave fault locator for power cables by using wavelet analysis," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 23, no. 5, pp. 403–411, Jun. 2001.
- [126] F. H. Magnago and A. Abur, "Fault location using wavelets," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 4, pp. 1475–1480, 1998.
- [127] R. Mardiana, H. Al Motairy, and C. Q. Su, "Ground fault location on a transmission line using high-frequency transient voltages," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, pp. 1298–1299, 2011.
- [128] I. Niazy and J. Sadeh, "A new single ended fault location algorithm for combined transmission line considering fault clearing transients without using line parameters," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 816–823, 2013.
- [129] H. Livani and C. Y. Evrenosoglu, "A machine learning and wavelet-based fault location method for hybrid transmission lines," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 5, no. 1, pp. 51–59, 2014.
- [130] H. E. John G. Webster, *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook: Electromagnetic, Optical, Radiation, Chemical, and Biomedical Measurement*, Second Edition. CRC Press, 2014.
- [131] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci, "A survey on sensor networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 40, no. 8, pp. 102–114, Aug. 2002.
- [132] G. S. Rao and V. V. Kumari, "A Study on Various Deployment Schemes for Wireless Sensor Networks," *Advances in Computer Science and Information Technology. Computer Science and Information Technology*, pp. 495–505, 2012.
- [133] C.-Y. Chong and S. P. Kumar, "Sensor networks: Evolution, opportunities, and challenges," *Proc. IEEE*, vol. 91, no. 8, pp. 1247–1256, Aug. 2003.
- [134] L. Ruiz-Garcia, L. Lunadei, P. Barreiro, and I. Robla, "A Review of Wireless Sensor Technologies and Applications in Agriculture and Food Industry: State of the Art and Current Trends," *Sensors*, vol. 9, no. 6, pp. 4728–4750, Jun. 2009.
- [135] J. Kumagai, "Life of birds [wireless sensor network for bird study]," *IEEE Spectrum*, vol. 41, no. 4, pp. 42–49, Apr. 2004.
- [136] D. F. Larios, J. M. Mora-Merchan, E. Personal, J. Barbancho, and C. Leon, "Implementing a Distributed WSN Based on IPv6 for Ambient Monitoring," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2013, pp. 1–14, 2013.
- [137] V. C. Gungor, B. Lu, and G. P. Hancke, "Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 10, pp. 3557–3564, Oct. 2010.
- [138] M. Erol-Kantarci and H. T. Mouftah, "Wireless multimedia sensor and actor networks for the next generation power grid," *Ad Hoc Networks*, vol. 9, no. 4, pp. 542–551, Jun. 2011.
- [139] Y. Yang, D. Divan, R. G. Harley, and T. G. Habetler, "Design and implementation of power line sensor network for overhead transmission lines," *2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Jul. 2009.

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

- [140] I. S. Al-Anbagi, H. T. Mouftah, and M. Erol-Kantarci, "Design of a delay-sensitive WSN for wind generation monitoring in the smart grid," *2011 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, May 2011.
- [141] D. J. I. Shashank Priya, *Energy Harvesting Technologies*. Springer, 2009.
- [142] Y.-W. Hong and A. Scaglione, "A scalable synchronization protocol for large scale sensor networks and its applications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 5, p. 1085/1099, May 2005.
- [143] A. Marco, R. Casas, J. L. Sevillano, V. Coarasa, J. L. Falco, and M. S. Obaidat, "Multi-Hop Synchronization at the Application Layer of Wireless and Satellite Networks," *IEEE GLOBECOM 2008 - 2008 IEEE Global Telecommunications Conference*, 2008.
- [144] H. C. Ferreira, L. Lampe, J. Newbury, and T. G. Swart, *Power Line Communications: Theory and Applications for Narrowband and Broadband Communications over Power Lines*. WILEY, 2010.
- [145] C. León de Mora, A. García Delgado, M. Cantero, F. Javier, J. Luque Rodríguez, J. Barbancho Concejero, E. Personal Vázquez, and D. F. Larios Marín, "Patente P201500072: Sistema inalámbrico distribuido y procedimiento para la clasificación y localización de faltas en una red de distribución eléctrica subterránea," 2015.
- [146] D. Gislason, *Zigbee Wireless Networking*. Newnes, 2008.
- [147] M.-G. Di Benedetto and B. R. Vojcic, "Ultra wide band wireless communications: A tutorial," *J. Commun. Netw.*, vol. 5, no. 4, pp. 290–302, Dec. 2003.
- [148] *UNE-EN 50065-1:2002, Transmisión de señales por la red eléctrica de baja tensión en la banda de frecuencias de 3 kHz a 148,5 kHz*. 2002.
- [149] A. Usman and S. H. Shami, "Evolution of Communication Technologies for Smart Grid applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 19, pp. 191–199, Mar. 2013.
- [150] E. Kabalci, Y. Kabalci, and I. Develi, "Modelling and analysis of a power line communication system with QPSK modem for renewable smart grids," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 19–28, Jan. 2012.
- [151] H. Gassara, F. Rouissi, and A. Ghazel, "Statistical Characterization of the Indoor Low-Voltage Narrowband Power Line Communication Channel," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 56, no. 1, pp. 123–131, Feb. 2014.
- [152] A. Sendin, I. Berganza, A. Arzuaga, A. Pulkkinen, and I. H. Kim, "Performance results from 100,000+ PRIME smart meters deployment in Spain," *2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Nov. 2012.
- [153] J. Barzola and L. Rubini, "The telegestore system evolved according OSI model and its performance compared with the new IEEE 1901.2 standard," *2014 IEEE Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXIV)*, Nov. 2014.
- [154] Lazaropoulos and P. G. Cottis, "Broadband Transmission via Underground Medium-Voltage Power Lines-Part I: Transmission Characteristics," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2414–2424, Oct. 2010.
- [155] T. A. Papadopoulos, B. D. Batalas, A. Radis, and G. K. Papagiannis, "Medium Voltage Network PLC Modeling and Signal Propagation Analysis," *2007 IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications*, 2007.
- [156] A. Cataliotti, V. Cosentino, D. Di Cara, and G. Tine, "Simulation and Laboratory Experimental Tests of a Line to Shield Medium-Voltage Power-Line Communication System," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 26, no. 4, pp. 2829–2836, Oct. 2011.

- [157] *PSCAD User's Guide*. Manitoba HVDC Research Centre, 2010.
- [158] W. H. Kersting, "Radial distribution test feeders," *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 3, pp. 975–985, 1991.
- [159] *IEEE 37 Node Test Feeder Report*. Distribution System Analysis Subcommittee [ONLINE] <http://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/index.html>, 2015.
- [160] *Capítulo IV - Centros de Transformación, Seccionamiento y Entrega (Normas particulares y condiciones técnicas y de seguridad)*. Endesa, 2005.
- [161] C. L. Fortescue, "Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks," *AIEE Transactions*, vol. 37, no. II, pp. 1027–1140, 1918.

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente



# Anexos

---

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

## Anexo A Listado de abreviaturas

- **AICT:** Tecnologías avanzadas de información y comunicaciones (*o Advanced Information and Communications Technology*)
- **ANFIS:** Red adaptativa basada en sistema de inferencia difusa (*o adaptive-network-based fuzzy inference system*)
- **ANN:** Redes Neuronales (*o Artificial Neural Networks*)
- **BI:** Inteligencia empresarial (*o Bussiness Intelligence*)
- **BT:** Baja Tensión
- **CAIDI:** Customer Average Interruption Duration Index
- **CENELEC:** Comité Europeo para para la Normalización Electrotécnica (*o European Committee for Electrotechnical Standardization*)
- **CIM:** Modelo de información común (*o Common Information Model*)
- **CT:** Centro de Transformación
- **DFR:** Registradores digitales de falta (*o Digital Fault Recorder*)
- **DG:** Generación distribuida (*Distributed Generation*)
- **DMS:** Sistema de gestión de la distribución (*o Distribution Management System*)
- **DPR:** Relés digitales de protección (*o Digital Protective Relay*)
- **DSM:** Control activo de la demanda (*o Demand-Side Management*)
- **DSO:** Operador del Sistema (*o Distribution System Operator*)
- **DT:** Árboles de decisión (*o Decision Trees*)
- **DToA:** Diferencia del tiempo de llegada (*o Difference Time of Arrival*)
- **DWT:** Transformada discreta de Wavelet (*o Discrete Wavelet Transform*)
- **E/S:** Entrada/Salida
- **EH:** Cosechado de energía (*o Energy Harvosting*)
- **EMS:** Sistema de gestión energética (*o Energy Management System*)
- **EMT:** Transitorios electromagnéticos (*o Electromagnetic Transients*)

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

- **ESS:** Almacenamiento de energía (*o Energy Storage Systems*)
- **EV:** Vehículo Eléctrico (*o Electric Vehicle*)
- **FACTS:** Sistema flexible de corriente alterna (*o Flexible Alternating Current Transmission Systems*)
- **FCI:** Indicadores de circuito de falta (*o Faulted-Circuit Indicators*)
- **FDI:** Detección y aislamiento de faltas (*o Fault Detection and Isolation*)
- **FDIR:** Aislamiento y reconfiguración ante faltas(*o Fault Detection, Isolation, and Reconfiguration*)
- **FFT:** Transformada rápida de Fourier (*o Fast Fourier Transform*)
- **FL:** Lógica Difusa (*o Fuzzy Logic*)
- **FLS:** Sistema de lógica difusa (*o fuzzy logic systems*)
- **GPS:** Sistema de posicionamiento global (*o Global Positioning System*)
- **GSM:** Comunicaciones móviles (*o Global System for Mobile*)
- **IED:** Dispositivos electrónicos inteligentes (*o intelligent Electronic Devices*)
- **IEEE:** *Institute of Electrical and Electronics Engineers*
- **k-NN:** Vecinos más cercanos (*o k-nearest neighbours*)
- **KPIs:** Indicadores clave de desempeño (*o Key Performance Indicators, KPIs*)
- **LAMDA:** Algoritmos de aprendizaje para análisis de datos multivariante (*o Learning Algorithm for Multivariate Data Analysis*)
- **LES:** Algoritmo de mínimos cuadrados (*o Least Error Squares*)
- **MRA:** Análisis de resolución múltiple (*o multiresolution analysis*)
- **MT:** Media Tensión
- **NIEPI:** Número de Interrupciones Equivalente de la Potencia Instalada
- **OMS:** Subsistema de gestión de cortes de energía (*o Outage Management Systems*)
- **PES:** *Power and Energy Society*
- **PF:** Punto Frontera

- **PLC:** Comunicación a través de la línea eléctrica (*o Power-Line Communication*)
- **PM:** Punto de maniobra
- **PMU:** Unidad de medida de fasores (*o Phasor Measurement Units*)
- **PPFP:** Camino posible de flujo energético (*o possible power flow path*)
- **PSCAD:** *Power Systems Computer Aided Design*
- **SAIFI:** *System Average Interruption Frequency Index*
- **SCADA:** Supervisión, control y adquisición de datos (*o Advanced Supervisory Control and Data Acquisition*)
- **SoC:** Estado de la carga (*o State of Charge*)
- **SVM:** Máquina de soporte de vectores (*o Support Vector Machines*)
- **T&D:** Transporte y Distribución (*o Transport & Distribution*)
- **TIEPI:** Tiempo de Interrupción Equivalente de la Potencia Instalada
- **ToA:** Tiempo de llegada (*o Time of Arrival*)
- **ToF:** Tiempo de vuelo (*o Time of Flight*)
- **UWB:** Banda ultra ancha (*o Ultra-Wide Band*)
- **V2G:** *Vehicle-to-Grid*
- **WAMPAC:** *Wide Area Monitoring, Protection and Control*
- **WSN:** Redes de sensores Inalámbricos (*o Wireless Sensor Network*)
- **WT:** Transformada discreta de wavelet (*o Discrete Wavelet Transform*)

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

# **Anexo B Implementación de la red IEEE 37 Node Test Feeder**

En este anexo se describe el modelo utilizado como banco de pruebas para evaluar los distintos métodos descritos en el presente trabajo de tesis. Concretamente el modelo implementado responde a una caracterización sobre la herramienta de simulación de transitorios electromagnéticos PSCAD (*Power Systems Computer Aided Design*)[157] de la *IEEE 37 Node Test Feeder*. Esta línea forma parte de un conjunto de cuatro casos tipo de red de distribución[158], orientados inicialmente al estudio de conexión y operación de transformadores. Sin embargo, con dicho trabajo se puso de manifiesto la utilidad de disponer de un conjunto de bancos de prueba que permitan comparar y evaluar procedimientos o métodos relacionados con los distintos ámbitos de la distribución eléctrica (ej.: la localización de falta). Con ese objetivo, desde entonces, el *Distribution System Analysis Subcommittee* asociado a la *Power and Energy Society (PES)* del *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, ha abanderado la tarea de recopilación y caracterización de un amplio número de líneas de distribución tipo, con distintas topologías y tamaños, que van desde la *IEEE 4 Node Test Feeder* (con 4 nodos) hasta la *IEEE 8500 Node Test Feeder* (con 8500 nodos).

Como ya se ha comentado anteriormente, concretamente en este trabajo nos centraremos en una implementación de la *IEEE 37 Node Test Feeder* (ver Figura A1), basada en línea de distribución primaria real ubicada en California y cuyas características son descritas detalladamente en su reporte[159] elaborado por dicho comité, y entre las que destacan:

- Red de distribución trifásica a tres hilos (sin neutro), con una tensión nominal de 4.8kV.
- Todos los tramos de las líneas son subterráneos.
- Todas las cargas o puntos de consumo se caracterizan por una impedancia constante, caracterizada cada una de ellas por su potencia activa y reactiva.
- Cargas fuertemente desbalanceadas.

La elección de esta línea tipo sobre el resto de alternativas *IEEE Node Test Feeder* se ha realizado en base a un criterio en el que ha primado el hecho que todos los tramos de la variante *IEEE 37 Node Test Feeder* son subterráneos, así como el hecho de ser

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

una línea de distribución trifásica a tres hilos, configuración típica en redes de distribución europeas.

En la Figura A1 se representa el modelo implementado en PSCAD, donde es fácil identificar los 35 segmentos subterráneos, marcados con un número. En este sentido se ha añadido un segmento más, identificado como "Fault", que representa el tramo afectado por la falta, y que remplazará (tal y como se observa en la topología del submodelo, ver apartado B.4) según el caso, al segmento de líneas afectado, y cuya estructura la podemos ver en el apartado B.2.

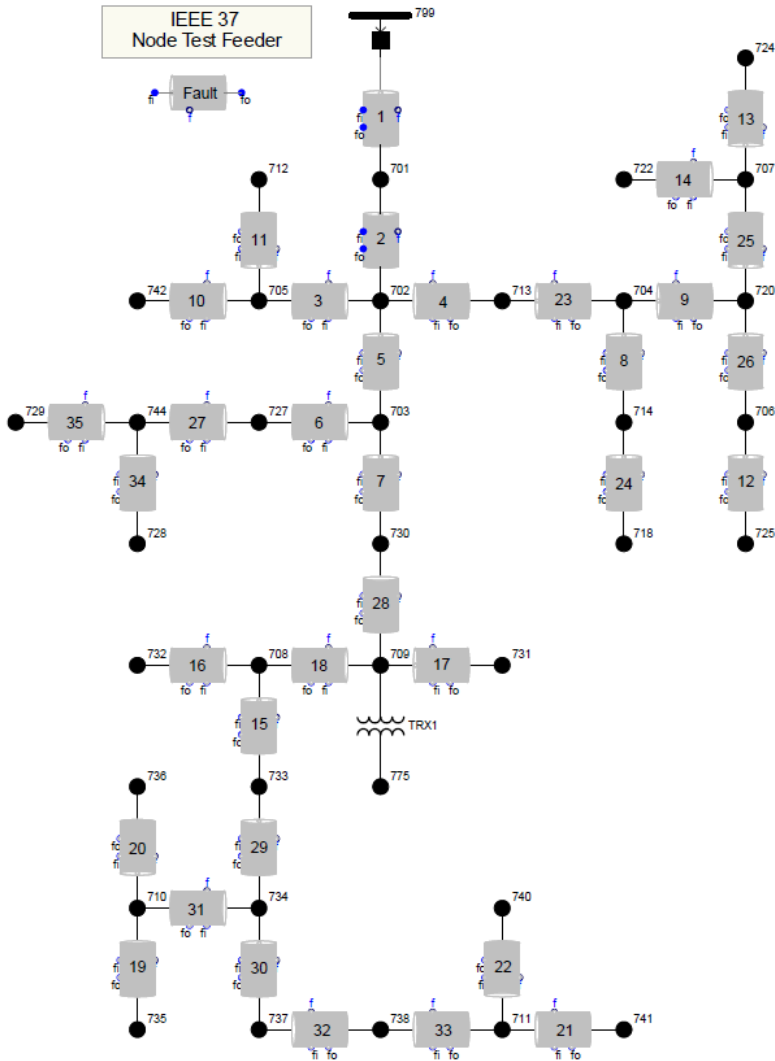


Figura A1: Modelo implementado en PSCAD de la IEEE 37 Node Test Feeder.



Adicionalmente, en la anterior también se identifican los 37 nodos presentes en la línea, representados mediante los 36 puntos de consumo (cuya estructura se describe en el apartado B.6) y la subestación (identificada por 799, y donde también se encuentra ubicado el relé de protección, ver apartado B.5).

## B.1 Submodelo de segmento de línea.

Este submodelo representa cada uno de los segmentos que componen la línea de distribución. Sin embargo para poder verificar el funcionamiento de los métodos presentados en este trabajo de tesis, cada segmento se ha subdividido a su vez en distintos subtramos, separados mediante las arquetas de la línea (ver ejemplo en Figura A2). El número de subsegmentos en los que se ha dividido cada tramo se ha escogido de forma aleatoria, cumpliendo siempre el criterio definido en la normativa Endesa[4], donde se especifica la distancia entre arquetas en 40m como máximo. Los detalles de cada línea y el número de subsegmentos se definen en la Tabla A1.

Id	Nodo Ini.	Nodo Fin	Tipo de línea.	Longitud (m)	Número de subsegmentos	Longitud de los Subsegmentos (m)
1	799	701	721	563,88	20	28,194
2	701	702	722	292,611	11	26,601
3	702	705	724	121,92	6	20,32
4	702	713	723	109,728	6	18,288
5	702	703	722	402,336	16	25,146
6	703	727	724	73,152	3	24,384
7	703	730	723	182,88	8	22,86
8	704	714	724	24,384	2	12,192
9	704	720	723	243,84	10	24,384
10	705	742	724	97,536	6	16,256
11	705	712	724	73,152	4	18,288
12	706	725	724	85,344	4	21,336
13	707	724	724	231,648	8	28,956
14	707	722	724	36,576	2	18,288
15	708	733	723	97,536	4	24,384
16	708	732	724	97,536	4	24,384
17	709	731	723	182,88	8	22,86
18	709	708	723	97,536	4	24,384
19	710	735	724	60,96	3	20,32
20	710	736	724	390,144	16	24,384
21	711	741	723	121,92	6	20,32
22	711	740	724	60,96	3	20,32
23	713	704	723	158,496	8	19,812
24	714	718	724	158,496	8	19,812
25	720	707	724	280,41	13	21,57
26	720	706	723	182,88	8	22,86
27	727	744	723	85,344	4	21,336
28	730	709	723	60,96	3	20,32
29	733	734	723	170,688	8	21,336
30	734	737	723	195,072	8	24,384
31	734	710	724	158,496	6	26,416
32	737	738	723	121,92	6	20,32
33	738	711	723	121,92	6	20,32
34	744	728	724	60,96	3	20,32
35	744	729	724	85,344	4	21,336

Tabla A1: Características de los tramos de línea implementados en el modelo.

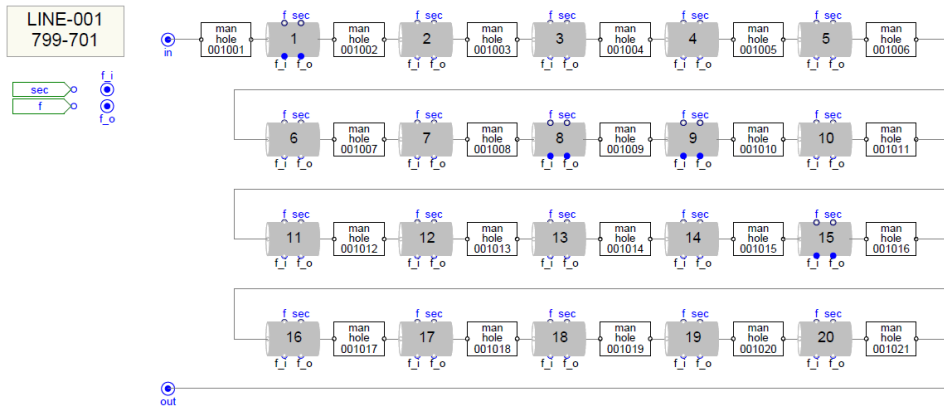


Figura A2: Submodelo del tramo 001 de la línea, implementado en PSCAD.

## B.2 Submodelo de subsegmento de línea

Este submodelo representa cada uno de los subsegmentos que componen los segmentos de la línea, que estarán separados por las distintas arquetas. En la Figura A2 puede verse un ejemplo de la topología interna de un subsegmento del segmento 001, en la que destacan: el modelo que caracteriza el cable en cada subsegmentos (ver apartado B.3) y el conjunto de interruptores (“Bk” y “BkF”) que conecta dicho modelo o en su defecto conecta el modelo subsegmento bajo falta (ver apartado B.4), en caso de ser el subsegmento afectado. El esquema de la parte inferior permite definir el estado de los interruptores, comparando la identificación del subsegmento caracterizado (“secId” y “subsecId”) con la identificación del segmento bajo falta.

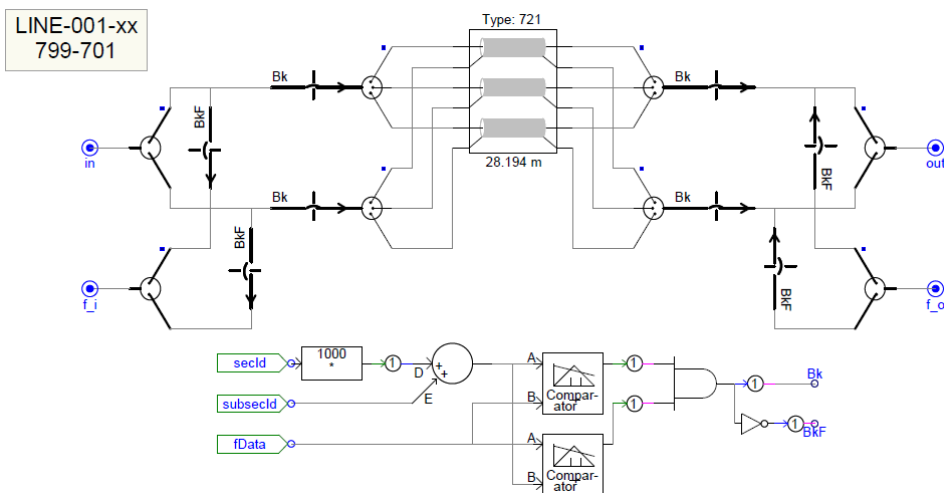


Figura A3: Submodelo de un subsegmento del tramo 001, implementado en PSCAD.

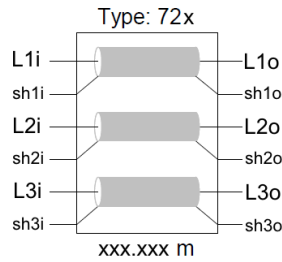


Figura A4: Símbolo de la caracterización de cableado.

### B.3 Caracterización de las tipologías de cable

Los distintos tipos de cable utilizados en este modelo han sido cuatro, cuya caracterización responde al símbolo de la Figura A4, que consiste en una implementación de una línea trifásica con acoplamiento mutuo entre sus tres conductores (definidos mediante  $R_{xx}$ ,  $L_{xx}$ ,  $R_{xy}$  y  $L_{xy}$ ), una capacidad parásita en derivación hacia la malla ( $C_{xg}$ , repartida al 50% entre el comienzo y el final del tramo) y una resistencia de malla ( $R_{shx}$ ).

La caracterización de cada uno de los cuatro tipos de cable utilizados en el presente modelo se resumen en la Tabla A2.

	Tipo 721	Tipo 722	Tipo 723	Tipo 724
$R_{11}$ ( $\Omega/m$ )	$1.8181 \cdot 10^{-4}$	$2.9521 \cdot 10^{-4}$	$8.0381 \cdot 10^{-4}$	$1.3019 \cdot 10^{-3}$
$L_{11}^*$ (H/m)	$3.2520 \cdot 10^{-7}$	$4.9002 \cdot 10^{-7}$	$1.1065 \cdot 10^{-6}$	$1.2787 \cdot 10^{-6}$
$R_{21}$ ( $\Omega/m$ )	$4.1818 \cdot 10^{-5}$	$1.0122 \cdot 10^{-4}$	$3.0267 \cdot 10^{-4}$	$3.2336 \cdot 10^{-4}$
$L_{21}^*$ (H/m)	$-6.0655 \cdot 10^{-8}$	$-5.3733 \cdot 10^{-8}$	$3.4794 \cdot 10^{-7}$	$4.5129 \cdot 10^{-7}$
$R_{22}$ ( $\Omega/m$ )	$1.6441 \cdot 10^{-4}$	$2.7887 \cdot 10^{-4}$	$8.0915 \cdot 10^{-4}$	$1.3091 \cdot 10^{-3}$
$L_{22}^*$ (H/m)	$3.1317 \cdot 10^{-7}$	$4.4140 \cdot 10^{-7}$	$1.0427 \cdot 10^{-6}$	$1.2194 \cdot 10^{-6}$
$R_{31}$ ( $\Omega/m$ )	$2.0940 \cdot 10^{-5}$	$7.6677 \cdot 10^{-5}$	$2.8490 \cdot 10^{-4}$	$3.0609 \cdot 10^{-4}$
$L_{31}^*$ (H/m)	$-6.8732 \cdot 10^{-8}$	$-1.0005 \cdot 10^{-7}$	$2.5070 \cdot 10^{-7}$	$3.4992 \cdot 10^{-7}$
$R_{32}$ ( $\Omega/m$ )	$4.1818 \cdot 10^{-5}$	$1.0122 \cdot 10^{-4}$	$3.0267 \cdot 10^{-4}$	$3.2336 \cdot 10^{-4}$
$L_{32}^*$ (H/m)	$-6.0655 \cdot 10^{-8}$	$-5.3733 \cdot 10^{-8}$	$3.4794 \cdot 10^{-7}$	$4.5129 \cdot 10^{-7}$
$R_{33}$ ( $\Omega/m$ )	$1.8181 \cdot 10^{-4}$	$2.9521 \cdot 10^{-4}$	$8.0381 \cdot 10^{-4}$	$1.3019 \cdot 10^{-3}$
$L_{33}^*$ (H/m)	$3.2520 \cdot 10^{-7}$	$4.9002 \cdot 10^{-7}$	$1.1065 \cdot 10^{-6}$	$1.2787 \cdot 10^{-6}$
$C_{1g}$ ( $\mu F/m$ )	$2.6338 \cdot 10^{-4}$	$2.1070 \cdot 10^{-4}$	$1.2335 \cdot 10^{-4}$	$9.9304 \cdot 10^{-5}$
$C_{2g}$ ( $\mu F/m$ )	$2.6338 \cdot 10^{-4}$	$2.1070 \cdot 10^{-4}$	$1.2335 \cdot 10^{-4}$	$9.9304 \cdot 10^{-5}$
$C_{3g}$ ( $\mu F/m$ )	$2.6338 \cdot 10^{-4}$	$2.1070 \cdot 10^{-4}$	$1.2335 \cdot 10^{-4}$	$9.9304 \cdot 10^{-5}$
$R_{sh1}$ ( $\Omega/m$ )	$6.3635 \cdot 10^{-4}$	$1.0332 \cdot 10^{-3}$	$2.8133 \cdot 10^{-3}$	$2.8133 \cdot 10^{-3}$
$R_{sh2}$ ( $\Omega/m$ )	$6.3635 \cdot 10^{-4}$	$1.0332 \cdot 10^{-3}$	$2.8133 \cdot 10^{-3}$	$2.8133 \cdot 10^{-3}$
$R_{sh3}$ ( $\Omega/m$ )	$6.3635 \cdot 10^{-4}$	$1.0332 \cdot 10^{-3}$	$2.8133 \cdot 10^{-3}$	$2.8133 \cdot 10^{-3}$

\*Nota: el símbolo negativo representa un acoplamiento en el que se invierte el sentido del acoplamiento.

Tabla A2: Caracterización de las cuatro tipologías de cable utilizadas.

**Tesis Doctoral:**

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

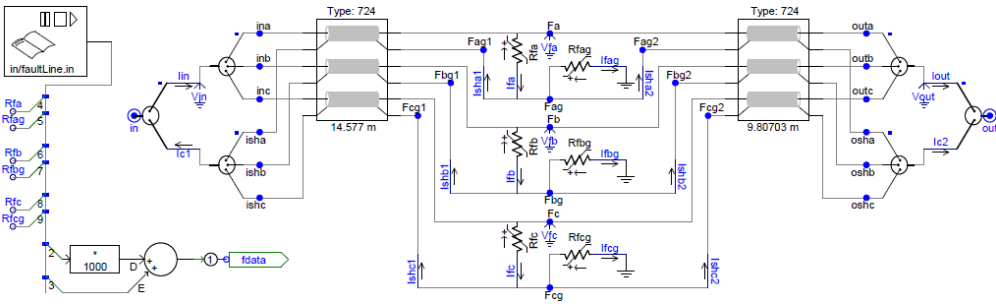


Figura A5: Submodelo de subsegmento bajo falta, implementado en PSCAD.

### B.4 Submodelo de línea bajo falta

Este submodelo es el encargado de simular los efectos de las falta sustituyendo (mediante los interruptores presentes en cada subsegmento, ver apartado B.2) al subsegmento afectado en cada caso de falta. La estructura interna de este submodelo puede observarse en la Figura A5, donde destacan los dos modelos de cable que representan las dos partes del segmento (anterior y posterior al punto de falta), y cuya longitud ha de sumar la total del segmento.

La falta se caracteriza mediante dos resistencias por fase ( $R_{fx}$  y  $R_{fxg}$ ). Las resistencias  $R_{fa}$ ,  $R_{fb}$  y  $R_{fc}$  permiten simular los fallos de aislamiento existentes entre el conductor y la malla, mientras que las resistencias  $R_{fag}$ ,  $R_{fbg}$  y  $R_{fcg}$  simulan el contacto con el potencial de tierra. Modulando el valor de estas seis resistencias es posible simular los distintos tipos de falta que pueden originarse en un sistema trifásico. La evolución de sus valores son definidos mediante un fichero externo, permitiendo así definir el instante en el que se originó la falta.

### B.5 Submodelo básico de subestación

Este submodelo responde a un modelo básico de subestación, y cuya estructura interna puede verse en la Figura A6. Principalmente, este submodelo se ha obtenido

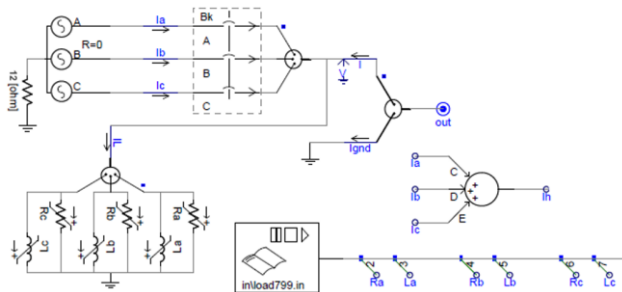


Figura A6: Submodelo básico de subestación, implementado en PSCAD.

mediante un generador trifásico de la tensión nominal del sistema (4.8kV en este caso). El neutro de dicho sistema trifásico se ha conectado a tierra mediante una resistencia (*Resistance earthed systems*) de  $12\Omega$  (valor típico para instalaciones subterráneas[160] para minimizar la corriente a 1kA máximo en caso de una falta simple), minimizando la corriente en caso de falta. Adicionalmente se han añadido los contactos del relé de protección y las medidas de corrientes típicas asociadas a este. También por mantener el modelo de nodo (ver apartado B.6), se ha añadido una carga inductiva trifásica variable, que caracteriza un posible consumo en dicho punto, y cuyos valores de resistencia e inductancia se definen mediante un fichero externo, permitiendo así analizar el comportamiento ante distintos valores de carga. No obstante según lo definido para esta línea tipo, el valor de esta carga vendrá definido según la Tabla A3. Adicionalmente, es interesante destacar que esta misma topología debería ser repetida en caso de querer simular generación distribuida en alguno de los nodos.

## B.6 Submodelo de carga

Este submodelo (ver Figura A7) permite caracterizar los distintos puntos de consumo (o nodos), asociados cada uno a un centro de transformación (CT) repartido a lo largo de la línea de distribución. El valor de las distintas cargas vendrá definido a través de una asociación (R/L), cuyos valores serán definidos a su vez mediante un fichero externo, definido según la Tabla A3.

Adicionalmente, destaca la presencia de los terminales t1, t2, t3 y t4 (opcionales según los números de entradas y salidas de cada nodo), y sobre los cuales se puede observar por un lado, la conexión directa entre la carga y los conductores de cada fase y por otro, la conexión de todas las mallas a tierra, simulando el conexionado típico en los CTs[160], y cuya corriente será registrada para

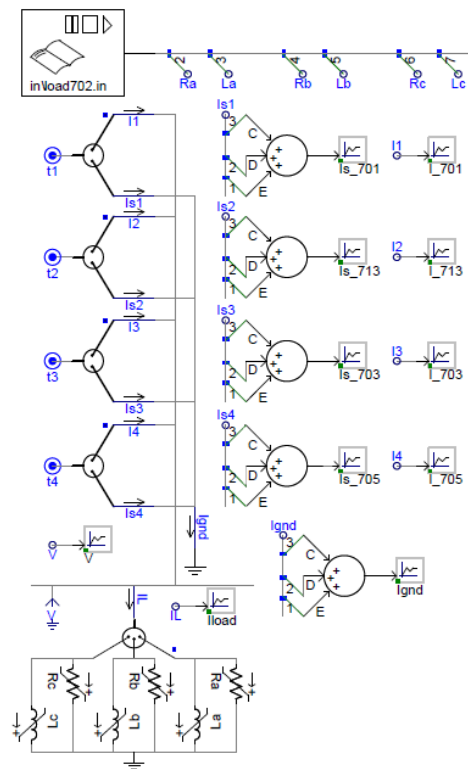


Figura A7: Submodelo de carga, implementado en PSCAD.

**Tesis Doctoral:**

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente

Id Nodo	Fase a		Fase b		Fase c	
	P(kW)	Q(kVAr)	P(kW)	Q(kVAr)	P(kW)	Q(kVAr)
701	140	70	140	70	350	175
702	0	0	0	0	0	0
703	0	0	0	0	0	0
704	0	0	0	0	0	0
705	0	0	0	0	0	0
706	0	0	0	0	0	0
707	0	0	0	0	0	0
708	0	0	0	0	0	0
709	0	0	0	0	0	0
710	0	0	0	0	0	0
711	0	0	0	0	0	0
712	0	0	0	0	85	40
713	0	0	0	0	85	40
714	17	8	21	10	0	0
718	85	40	0	0	0	0
720	0	0	0	0	85	40
722	0	0	140	70	21	10
724	0	0	42	21	0	0
725	0	0	42	21	0	0
727	0	0	0	0	42	21
728	42	21	42	21	42	21
729	42	21	0	0	0	0
730	0	0	0	0	85	40
731	0	0	85	40	0	0
732	0	0	0	0	42	21
733	85	40	0	0	0	0
734	0	0	0	0	42	21
735	0	0	0	0	85	40
736	0	0	42	21	0	0
737	140	70	0	0	0	0
738	126	62	0	0	0	0
740	0	0	0	0	85	40
741	0	0	0	0	42	21
742	8	4	85	40	0	0
744	42	21	0	0	0	0
775	0	0	0	0	0	0
0799	0	0	0	0	0	0

	Fase a		Fase b		Fase c	
	P(kW)	Q(kVAr)	P(kW)	Q(kVAr)	P(kW)	Q(kVAr)
Total	727	357	639	314	1091	530

Tabla A3: Distribución de cargas en los distintos nodos de la línea.

posteriormente ser analizada mediante los distintos métodos expuestos en el presente documento de tesis.

### B.7 Submodelo de arqueta.

Este submodelo representa las arquetas de mantenimiento que suelen estar repartidas a lo largo de los distintos tramos que componen una línea de distribución subterránea. Básicamente, para este tipo de submodelo de arqueta (ver Figura A8) se ha supuesto la presencia de un equipo registrador que permita almacenar los valores de corriente neta (corriente del conductor más corriente de malla) que circulan por cada uno de los cables.

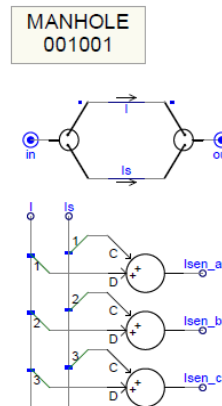


Figura A8: Submodelo de arqueta, implementado en PSCAD. (ejemplo Arqueta 001001)

# Anexo C Análisis de una falta por componentes simétricas

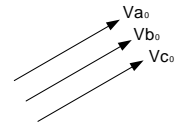
El análisis de un circuito polifásico a través de sus componentes simétricas fue propuesto por primera vez en 1918, por C. L. Fortescue[161], convirtiéndose desde entonces en una útil herramienta para el análisis de sistemas trifásicos desbalanceados.

Basicamente, el análisis de componentes simétricas consiste en una transformación lineal que a partir de las componenetes trifásicas de un sistema equilibrado permite obtener las componentes simétricas que tienen la peculiaridad de formar tres redes de secuencia desacopladas. Si por el contrario ese sistema está desequilibrado, dichas tres redes de secuencia estarán conectadas únicamente en los puntos de desequilibrio.

En un sistema trifásico, el análisis por componentes simétricas consiste en descomponer un sistema de tensión ( $V_a$ ,  $V_b$  y  $V_c$ ), en tres conjuntos de componentes de secuencia.

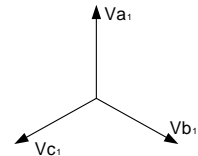
- Componentes de secuencia cero: sistema de tres fasores con magnitudes iguales y con desplazamiento nulo entre sus fases.

$$|V_{a_0}| = |V_{b_0}| = |V_{c_0}| = V_0 \quad ; \quad \angle V_{a_0} = \angle V_{b_0} = \angle V_{c_0}$$



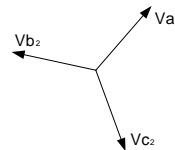
- Componentes de secuencia positiva: sistema de tres fasores con magnitudes iguales, desplazamiento de fase de  $\pm 120^\circ$  y secuencia positiva

$$|V_{a_1}| = |V_{b_1}| = |V_{c_1}| = V_1 \quad ; \quad \angle V_{a_1} = \angle V_{b_1} + 120^\circ = \angle V_{c_1} - 120^\circ$$



- Componentes de secuencia negativa: sistema de tres fasores con magnitudes iguales, desplazamiento de fase de  $\pm 120^\circ$  y secuencia negativa

$$|V_{a_2}| = |V_{b_2}| = |V_{c_2}| = V_2 \quad ; \quad \angle V_{a_2} = \angle V_{b_2} - 120^\circ = \angle V_{c_2} + 120^\circ$$



Habitualmente se trabaja tomado como referencia la fase "a", suprimiendo este índice y trabajando directamente con los términos de las componentes  $V_0$ ,  $V_1$  y  $V_2$ , para hace referencia a sus componentes de cero, positiva y negativa respectivamente.

Así pues, si se define la constante  $a$ , según:

$$a = 1 \angle 120^\circ = \frac{-1 + j\sqrt{3}}{2} \quad (\text{A.1})$$

La relación existente entre ambos sistemas se define según:

$$\begin{aligned} V_a &= V_0 + V_1 + V_2 \\ V_b &= V_0 + a^2 \cdot V_1 + a \cdot V_2 \quad (\text{A.2}) \\ V_c &= V_0 + a \cdot V_1 + a^2 \cdot V_2 \end{aligned}$$

O su relación inversa, según:

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{1}{3} \cdot (V_a + V_b + V_c) \\ V_1 &= \frac{1}{3} \cdot (V_a + a \cdot V_b + a^2 \cdot V_c) \quad (\text{A.3}) \\ V_2 &= \frac{1}{3} \cdot (V_a + a^2 \cdot V_b + a \cdot V_c) \end{aligned}$$

Al expresar (A.2) y (A.3) de forma matricial quedaría:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = A^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.5})$$

Donde:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.6})$$

$$A^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad (\text{A.7})$$

Esta transformación para obtener las componentes simétricas también puede ser aplicada a la corriente:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = A^{-1} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.8})$$

O también puede ser utilizada para determinar la matriz de impedancia:

$$\begin{bmatrix} Z_0 & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_1 & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot A^{-1} \cdot \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \cdot A \quad (\text{A.9})$$

Donde si  $Z_{aa}=Z_{bb}=Z_{cc}$  y  $Z_{ab}=Z_{ac}=Z_{bc}$ , se considera una carga simétrica, obteniéndose tras su transformación una matriz diagonal, y quedando las tres redes de secuencia desacopladas entre sí, pudiendo resolver cada uno de ellos por separado.



Aplicando esta transformación en componentes simétricas es posible simplificar el análisis de una falta, distinguiéndose las siguientes variantes:

### C.1 Falta simple línea-tierra:

Este caso tiene tres variantes, dependiendo de la línea trifásica afectada:

- Falta de Fase A a tierra
- Falta de Fase B a tierra
- Falta de Fase C a tierra

Respondiendo el modelo en redes de secuencia de este tipo de falta al diagrama de la Figura A9, según la expresión siguiente, donde  $R_F$  es la resistencia de falta:

$$V_{F,0} + V_{F,1} + V_{F,2} = I_{F,0} \cdot 3 \cdot R_F \quad (\text{A.10})$$

### C.2 Falta línea-línea:

Este caso tiene también tres variantes, en función del par de líneas involucradas:

- Falta de Fase A a Fase B
- Falta de Fase B a Fase C
- Falta de Fase C a Fase A

Respondiendo el modelo en redes de secuencia de este tipo de falta al diagrama de la Figura A10, según la expresión siguiente, donde  $R_F$  es la resistencia de falta:

$$V_{F,1} - I_{F,1} \cdot \frac{R_F}{2} = V_{F,2} - I_{F,2} \cdot \frac{R_F}{2} \quad (\text{A.11})$$

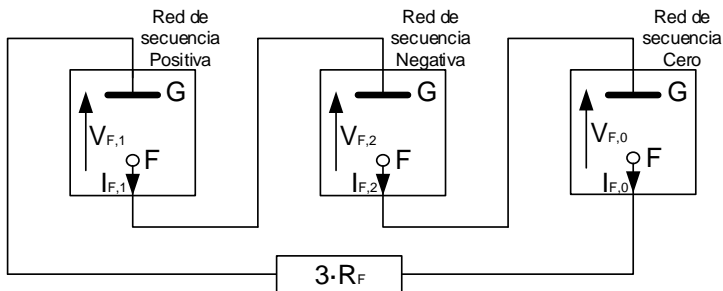


Figura A9: Diagrama en red de secuencia de una falta simple línea-tierra.

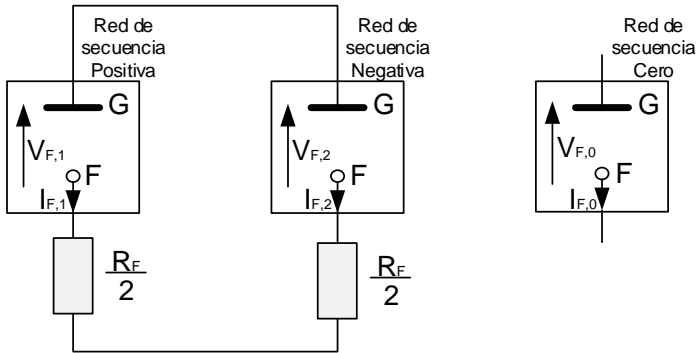


Figura A10: Diagrama en red de secuencia de una falta línea-línea.

### C.3 Falta línea-línea-tierra:

Este caso tiene también tres variantes, en función del par de líneas involucradas:

- Fallos Fase A y Fase B a tierra
- Fallos Fase B y Fase C a tierra
- Fallos Fase C y Fase A a tierra

Respondiendo el modelo en redes de secuencia de este tipo de falta al diagrama de la Figura A11, y según la expresión siguiente, donde  $R_F$  es la resistencia de falta y  $R_G$  la resistencia a tierra:

$$V_{F,1} - I_{F,1} \cdot R_F = V_{F,2} - I_{F,2} \cdot R_F = V_{F,0} - I_{F,0} \cdot (R_F + 3R_G) \quad (\text{A.12})$$

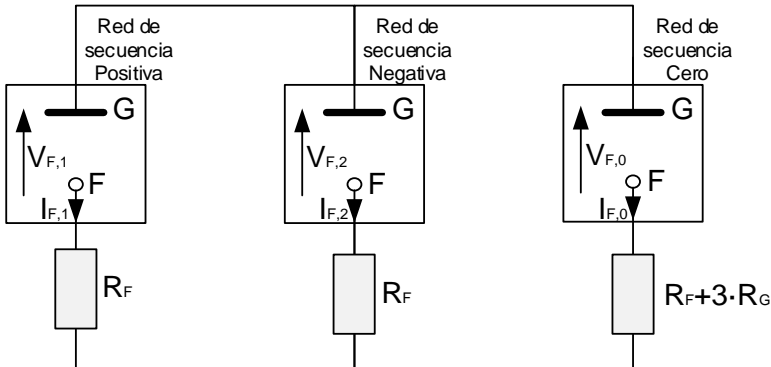


Figura A11: Diagrama en red de secuencia de una falta línea-línea-tierra.

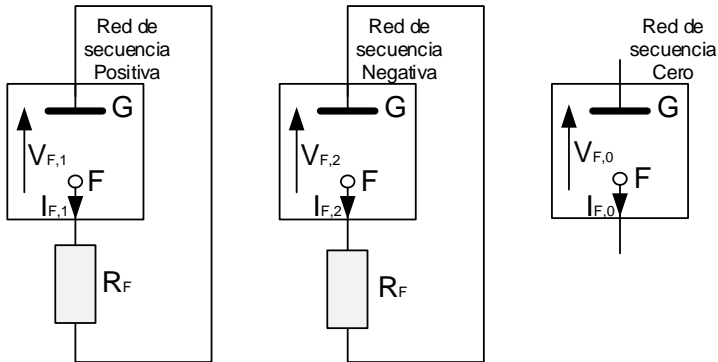


Figura A12: Diagrama en red de secuencia de una falta trifásica.

### C.4 Falta trifásica:

Respondiendo el modelo en redes de secuencia de este tipo de falta al diagrama de la Figura A12, y según la expresión siguiente:

$$V_{F,1} - I_{F,1} \cdot R_F = V_{F,2} - I_{F,2} \cdot R_F = I_{F,0} = 0 \quad (\text{A.13})$$

### C.5 Falta trifásica a tierra:

Respondiendo el modelo en redes de secuencia de este tipo de falta al diagrama de la Figura A13, y según la expresión siguiente, donde  $R_F$  es la resistencia de falta y  $R_G$  la resistencia a tierra:

$$V_{F,1} - I_{F,1} \cdot R_F = V_{F,2} - I_{F,2} \cdot R_F = V_{F,0} - I_{F,0} \cdot (R_F + 3 \cdot R_G) = 0 \quad (\text{A.14})$$

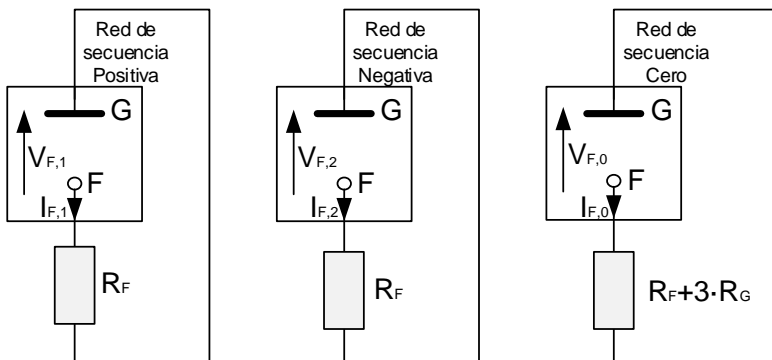


Figura A13: Diagrama en red de secuencia de una falta trifásica a tierra.

Tesis Doctoral:

Sistema para Localización de Faltas en Líneas Subterráneas de Distribución Eléctrica de Media Tensión, mediante una Red Distribuida de Sensores de Corriente