UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

RELEVADOR NEURONAL PARA PROTECCION DE LINEAS DE TRANSMISION

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERIA ELECTRICA

PRESENTA

VICTOR HUGO ORTIZ MURO

MONTERREY, N. L. FEBRERO, 2004

VHOM

RELEVADOR NEURONAL PARA PROTECCION DE LINEAS DE TRANSMISION

TD
Z5853
.M2
FIME
2004
.07

2004

1020131316

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

RELEVADOR NEURONAL PARA PROTECCION DE LINEAS DE TRANSMISION

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERIA ELECTRICA

PRESENTA

VICTOR HUGO ORTIZ MURO

MONTERREY, N. L. FEBRERO, 2004

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

RELEVADOR NEURONAL PARA PROTECCION DE LINEAS DE TRANSMISION

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERIA ELECTRICA

PRESENTA

VICTOR HUGO ORTIZ MURO

MONTERREY, N. L. FEBRERO, 2004

780089

TD
75853
.M2
FIME
2004
.07

FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis han aprobado que la tesis RELEVADOR NEURONAL PARA PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN, realizada por el M.C. Víctor Hugo Ortiz Muro, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica.

El comité de tesis

Asesor
Dr. Héctor Jorge Altuve Ferrer

Secretario
Dr. Ernesto Vázquez Martínez

Vocal
Dr. José Luis Naredo Villagrán

Vocal
Dr. Oscar Leonel Chacón Mondragón

Vocal
Dr. Alberto Cavazos González

Vo. Bo.
Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
Subdirector de posgrado

San Nicolás de los Garza, N.L., Febrero del 2004

Agradecimientos . . . . . .

Cuando una persona observa la muerte de cercas, se da cuenta que la vida es una oportunidad única, por ello se debe vivir intensa, felizmente y, tratando de dejar huella. Ahora que siento alcanzar otra meta planeada, quiero agradecer a Dios que me permitió en estos años contar con la suficiente salud y seguir haciendo más planes con mi vida.

Con estas insuficientes palabras, quiero manifestar mi eterno agradecimiento a mis Padres. Uds., más el gran amor de mi Esposa, Paty e Hijos, Paloma y Huguito, han sido el cimiento inquebrantable que me ha permitido alcanzar esta etapa de mi vida y que aún me motivan a seguir superándome.

A todas esas personas que con su ejemplo me han entregado un camino para seguirlo. Al Dr. Altuve, por sus invaluables lecciones de persona íntegra y de competitividad. A la amistad ofrecida por el Dr. J. Luís Naredo, Dr. Ernesto Vázquez, Dr. Oscar Chacón, quienes colaboraron en gran medida en mi formación, tanto profesional como personal. A los comentarios del Dr. Cavazos y de muchas otras personas que me han rodeado durante mis estudios y, de igual forma a mis Hermanos, familiares, y a mis Amigos cercanos,

les expreso mi total gratitud,

VHOM

RESUMEN

Relevador Neuronal Para Protección de Líneas de Transmisión

Publicación No. _____
Víctor Hugo Ortiz Muro. Doctor en Ingeniería Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León. 2004

En esta tesis se resume la investigación realizada en la fundamentación teórica y el desarrollo de un relevador para protección de líneas de transmisión, el cual utiliza un principio basado en el reconocimiento de patrones mediante redes de neuronas artificiales (RNA).

Se estudia la posibilidad de utilizar las ondas viajeras como información de entrada a las RNA. A ese fin se elaboró un programa basado en una técnica de análisis transitorio del dominio de la frecuencia, en que se resuelven las ecuaciones del sistema de transmisión polifásico, mediante la transformada numérica de Laplace, la teoría modal y el principio de superposición.

El trabajo está orientado a desarrollar los algoritmos para la operación instantánea del relevador. Se utilizan RNA para resolver las tareas de clasificación del tipo de falla y de estimación de la zona de falla. Asimismo, se describen técnicas de pre-procesamiento de señales y se diseña una lógica de disparo adaptada a la respuesta de las RNA.

En la tesis se definió la estructura general del tipo de RNA a utilizar en el relevador. Se estableció también una metodología de diseño, que permite determinar las estructuras particulares de las RNA requeridas en cada bloque funcional.

Para evaluar la viabilidad de la aplicación de estas técnicas neuro-computacionales, se implementó en MATLAB un prototipo de relevador, que se probó generando en ese ambiente las formas de onda de entrada. El prototipo tuvo un buen desempeño en las pruebas realizadas, tanto en la estimación de la zona de falla, como en la clasificación del tipo de falla.

ÍNDICE

Agradecimientos iv
Resumen v
Lista de figuras x
Lista de Tablas xiii

Capítulo I. INTRODUCIÓN

1.1 Introducción 1
1.2 Identificación del problema 1
1.3 Objetivos de la tesis 3
1.4 Contenido de la tesis 4
1.5 Aspectos de diseño 5
1.6 Investigaciones realizadas 7
1.7 Alcance de la tesis 14

Capítulo II. RELEVADORES DE PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

2.1 Introducción 17
2.2 Funciones primarias en un relevador digital 17
2.3 Análisis del relevador de distancia que responde a componentes de frecuencia fundamental 18
2.4 Caracterización de tiempos en un esquema de distancia 25
2.5 Análisis del relevador de onda viajera (OV) 26
2.6 Estructura de un relevador neuronal 30
2.7 Conclusiones del capítulo 33

Capítulo III. SIMULACIÓN DE SEÑALES PARA PROTECCIÓN DE ULTRA-ALTA VELOCIDAD

3.1 Introducción 34

3.2 Señales propagadas en el sistema protegido 34

3.3 Procedimiento de cálculo 37

3.3.1 Modelo de línea en el dominio del tiempo 38

3.3.2 Ecuaciones de línea en el dominio de la frecuencia 39

3.3.3 Propagación modal en líneas de transmisión aéreas 40

3.3.4 Evaluación de las matrices modales 43

3.3.5 Representación de dos puertos de líneas de transmisión 44

3.3.6 Representación de las fallas en el dominio de la frecuencia 46

3.3.7 Modelo de interruptores 48

3.4 Representación de la red de transmisión 49

3.5 Transformada numérica de Laplace 50

3.6 Análisis de un sistema de prueba 51

3.7 Conclusiones del capítulo 55

Capítulo IV. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES PARA UN RELEVADOR NEURONAL

4.1 Introducción. 57

4.2 Procesamiento de señales en un relevador digital 58

4.2.1 Filtrado analógico antialiasing (FAA) 58

4.2.2 Conversión A/D 60

4.2.3 Longitud de la ventana de datos 62

4.3 Procesamiento digital de señales para esquemas neuronales 63

4.4 Procedimiento de generación de patrones 66

4.5 Patrones de señales instantáneas 68

4.6 Variantes de extractores de rasgos distintivos (ERD) 71

4.6.1 Extractor basado en un filtro delta 72

4.6.2 Extractor basado en onduletas 74

4.6.3 Extractor combinado con onduletas y filtro delta 76
4.6.4 Patrones de un procesamiento para fasores 77
4.7 Formación de los bancos de patrones 79
4.8 Conclusiones del capítulo 84

Capítulo V. ALGORITMOS DE PROTECCIÓN NEURONAL

5.1 Introducción 86
5.2 Clasificación de patrones con RNA perceptrón multicapa 86
5.3 Metodología de diseño de las estructuras de RNA 89
5.4 Detector neuronal de fallas (DF) 91
5.4.1 Diseño de prototipos de DF neuronales 93
5.4.2 Evaluación de prototipos de DF neuronales 97
5.5 Clasificador neuronal de fallas (CF) 103
5.5.1 Diseño de prototipos de CF neuronales 105
5.5.2 Evaluación de prototipos de CF neuronales 106
5.6 Estimador neuronal de zona de falla (EZF) 110
5.6.1 Estimador neuronal de zona de falla con una RNA 111
5.6.2 Estimador neuronal de zona de falla con dos RNA 115
5.7 Conclusiones del capítulo 119

Capítulo VI. PRUEBAS DE DESEMPEÑO AL RELEVADOR NEURONAL

6.1 Introducción. 121
6.2 Diseño del prototipo de relevador 121
6.2.1 Estructura del prototipo de elemento neuronal instantáneo 121
6.2.2 Características del prototipo de relevador neuronal 124
6.3 Metodología de pruebas 125
6.4 Análisis de operación del EZF 126
6.4.1 Ejemplos de operación del EZF 126
6.4.2 Efecto del contador de seguridad 129

6.4.3 Estadísticas de operación del EZF con una RNA 135
6.4.4 Estadísticas de operación del EZF con dos RNA 137
6.5 Ejemplos de operación del CF 138
6.6 Estadísticas de operación del CF 141
6.7 Conclusiones del capítulo 142

Capítulo VII. CONCLUSIONES, APORTACIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

7.1 Conclusiones generales 144
7.2 Aportaciones 148
7.2 Recomendaciones para trabajos futuros 149

REFERENCIAS 152

APÉNDICE A
MODELADO DE LA LÍNEA DE TRANSMISION AÉREA MONOFÁSICA 159

APÉNDICE B
ESPACIO DE SEÑALES Y TEÓRIA DE ONDULETAS 169

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1.1 Diagrama de bloques de la tesis. 4

Fig. 1.2 *Esquema de protección de una línea.* 5

Fig. 2.1 Estructura genérica de un relevador de distancia. 18

Fig. 2.2 Lazo de falla en una línea de transmisión. 20

Fig. 2.3 Característica escalonada de tiempo de una protección de distancia 21

Fig. 2.4 Trayectoria R-L-t para una falla en la línea protegida a una distancia *m*. 22

Fig. 2.5 Etapas de procesamiento de señales típicas en un relevador de distancia y tiempos característicos de respuesta de sus componentes. 24

Fig. 2.6 Ondas viajeras en un sistema de transmisión. 26

Fig. 2.7 Ondas viajeras reflejadas en un sistema de transmisión. 27

Fig. 2.8 Esquema de un relevador neuronal para protección de líneas de transmisión 30

Fig. 2.9 Esquema de un relevador neuronal para protección de líneas de transmisión con extractor de rasgos distintivos (ERD). 31

Fig. 3.1 a) Espectro de una señal en estado estable y b) Espectro de una señal transitoria 36

Fig. 3.2 Interpretación de la solución de la ecuación de segundo orden. 40

Fig. 3.3 Propagación modal de una señal en una línea de transmisión polifásica. 41

Fig. 3.4 Comportamiento de los modos de propagación con relación al cambio de frecuencia. 42

Fig. 3.5 Representación de dos puertos de una línea. 40

Fig. 3.6 Representación de una falla en una línea monofásica. 44

Fig. 3.7 Circuito equivalente de la red de falla. 45

Fig. 3.8 Modelo genérico de una falla. 45

Fig. 3.9 Aproximación del modelo de arco eléctrico. 46

Fig. 3.10 Sistema de transmisión de prueba. 47

Fig. 3.11 Configuración geométrica de una línea de prueba. 50

Fig. 3.12 Señales transitorias resultantes de una falla monofásica. 51

Fig. 3.13 Atenuaciones y velocidades del sistema de transmisión 51

Fig. 3.14 Efecto de la variación de la variable resistencia de falla. 52

Fig. 3.15 Formas de onda de una falla con arco eléctrico. 53

Fig. 4.1 Filtrado de una señal en un relevador de protección. 56

Fig. 4.2 Bandas de paso del FAA para muestreo de las señales. 57

Fig. 4.3 Respuesta en la frecuencia de filtros analógicos. 58

Fig. 4.4 Conversión analógica digital con muestreo periódico. 59
Fig. 4.5 Desplazamiento de la ventana de datos. 61
Fig. 4.6 Proceso de obtención de un patrón. 62
Fig. 4.7 Clasificación de señales en esquemas neuronales que operan con fasores. 63
Fig. 4.8 Diagrama del proceso de generación de patrones. 64
Fig. 4.9 Señales analógicas normalizadas. 66
Fig. 4.10 Señales digitalizadas para relevadores de 16 y 64 muestras por ciclo 67
Fig. 4.11 Espectros de amplitud de las muestras contenidas en la ventana de datos de la señal. 67
Fig. 4.12 Patrón de muestras digitalizadas para 16 y 64 muestras por ciclo. 68
Fig. 4.13 Filtro delta. 70
Fig. 4.14 Señales incrementales (delta) correspondiente a las señales de la Fig.4.9 70
Fig. 4.15 Patrón de muestras crudas de un procesamiento de cinco muestras de 16 y 64 muestras por ciclo. 71
Fig. 4.16 Señal transitoria filtrada con onduleta Daubechies 2. 73
Fig. 4.17 Patrón derivado de filtrar con onduleta Daubechies 2. 73
Fig. 4.18 Patrón derivado de filtrar con onduleta Daubechies 2 y el filtro delta. 74
Fig. 4.19 Señales transitorias procesadas en un esquema de distancia con un filtro Fourier de un ciclo. 75
Fig. 4.20 Señales de secuencia 0+- de una condición de falla monofásica 75
Fig. 4.21 Resistencias calculadas de la información de falla. 76
Fig. 4.22 Formación de dicotomías para los problemas de protección de líneas. 77
Fig. 4.23 Simulación de 16 fallas en la que se cambia en ángulo de inserción de falla. 79
Fig. 4.24 Patrones de ventana de datos llena con información de falla de 16 simulaciones variando el ángulo de inserción de falla. 80
Fig. 5.1 Neurona perceptrón multicapa de cuatro capas. 84
Fig. 5.2 Entrenamiento y pruebas a un DF con patrones crudos y en una estructura de RNA de una capa oculta (16 muestras por ciclo). 90
Fig. 5.3 Entrenamiento y pruebas a un DF con patrones delta y con una estructura de RNA de una capa oculta (16 muestras por ciclo). 91
Fig. 5.4 Entrenamiento y pruebas a un DF con patrones crudos y con una estructura de RNA de una capa oculta (64 muestras por ciclo). 92
Fig. 5.5 Entrenamiento y pruebas a un DF con patrones delta y con una

estructura de RNA de dos capas ocultas (16 muestras por ciclo). 93
Fig. 5.6 Estructura interna del elemento clasificador neuronal de fallas. 100
Fig. 5.7 Sistema de prueba en que se muestran las zonas de protección. 107
Fig. 5.8 Separación del EZF en un estimador direccional (ED) y un estimador de fallas en la línea adyacente. 111
Fig. 5.9 Lógica de disparo del EZF formado por un ED y un EFLA. 112
Fig. 6.1 Lógica de operación del relevador neuronal. 122
Fig. 6.2 Operación de los EZF con una y dos RNA para una falla interna. 127
Fig. 6.3 Operación de los EZF con una y dos RNA para una falla detrás del relevador. 128
Fig. 6.4 Operación de los EZF con una y dos RNA para una falla externa hacia adelante. 129
Fig. 6.5 Operación del EZF con una RNA para una falla sólida interna. 130
Fig. 6.6 Operación del EZF con una RNA para una falla externa con resistencia. 131
Fig. 6.7 Operación del EZF con dos RNA apara una falla sólida interna. 132
Fig. 6.8 Operación del EZF con dos RNA para una falla externa hacia atrás. 133
Fig. 6.9 Operación del EZF con dos RNA para una falla interna de alta impedancia. 134
Fig. 6.10 Operación del EZF con dos RNA para una falla interna con arco eléctrico. 135
Fig. 6.11 Operación del CF para una falla BCT. 139
Fig. 6.12 Salidas de disparo del relevador para una falla BCT. 140
Fig. 6.13 Salidas de disparo del relevador para una falla AT. 141
Fig. A.1 Línea monofásica ideal. 160
Fig. A.2 Circulación de corrientes en una línea ideal. 162
Fig. A.3 Geometría de superficies equipotenciales con centros fuera del origen. 164
Fig. A.4 Penetración de carga en el suelo. 166
Fig. A.5 Aproximación a las integrales de Carson. 168
Fig. B.1 Proyección de vectores. 170
Fig. B.2. Filtro de cuatro coeficientes para implementar el algoritmo MRA. 172

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1 Intervalos de frecuencias de transitorios eléctricos 34

Tabla 3.2 Clasificación de transitorios en sistema de potencia según sus intervalos de frecuencias 35

Tabla 3.3 Parámetros de los conductores de la línea 50

Tabla 4.1 Correspondencia de las variables aleatorias con las funciones de protección primaria. 77

Tabla 5.1 Estructuras de neuronales investigadas. 95

Tabla 5.2 Desempeño de DF neuronales con 16 muestras por ciclo. 96

Tabla 5.3 Desempeño de DF neuronales con 64 muestras por ciclo. 97

Tabla 5.4 Desempeño de DF que responden a patrones de frecuencia fundamental (16 muestras por ciclo). 99

Tabla 5.5 Estructuras de RNA mas adecuadas para CF dedicados a fallas monofásicas a tierra 102

Tabla 5.6 Desempeño del CF de A-T para fallas a A-T 103

Tabla 5.7 Desempeño del CF para los otro nueve tipos de fallas. 103

Tabla 5.8 Desempeño de esquemas CF con ERD modal 104

Tabla 5.9 Estructuras de RNA mas adecuadas para los distintos EZF 108

Tabla 5.10 Desempeño de los EZF para fallas en la zona protegida 109

Tabla 5.11 Desempeño de los EZF para fallas fuera de la zona protegida y condiciones de no falla. 108

Tabla 5.12 Estructuras de RNA mas adecuada para ED y EFLA. 112

Tabla 5.13 Desempeño de los ED para fallas hacia delante. 113

Tabla 5.14 Desempeño de los ED para fallas hacia atrás. 113

Tabla 5.15 Desempeño de los EFLA para fallas en la línea CD (zona 2). 113

Tabla 5.16 Desempeño de los EFLA para fallas en las líneas BC (zona 1) y AB (zona 2). 114

Tabla 6.1 Condiciones de falla aplicadas en las pruebas 125

Tabla 6.2 Desempeño del EZF de una RNA para fallas internas 136

Tabla 6.3 Desempeño del EZF de una RNA para fallas externas 136

Tabla 6.4 Desempeño del ED-EFLA para fallas internas 137

Tabla 6.5 Desempeño del ED-EFLA para fallas externas 137

Tabla 6.6 Desempeño del CF para fallas monofásicas 141

Tabla 6.7 Desempeño del CF para fallas no monofásicas 142

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción

En el presente capítulo se identifican los problemas de protección de líneas de transmisión de extra o ultra-alto voltaje (EHV/UHV). Se establecen los tópicos a investigar para desarrollar un relevador basado en redes de neuronas artificiales (RNA). Se incluye también un resumen histórico de las investigaciones en que se han aplicado técnicas de inteligencia artificial a la protección y control de líneas de transmisión.

1.2 Identificación del problema

Cuando ocurre una falla en una línea de transmisión es necesario desconectarla del resto del sistema eléctrico de potencia (SEP), función que es realizada por los relevadores de protección. Si la falla no es permanente, la línea puede ser reconectada posteriormente por un procedimiento de recierre automático.

Las líneas que conforman las redes o sistemas de transmisión de extra o ultra alto voltaje (EHV/UHV), operan en la actualidad en un régimen crítico, de manera que la inserción de cualquier tipo de falla provoca procesos transitorios intensos en el SEP. En un escenario operativo de esta naturaleza, el SEP impone restricciones de diversa índole; por ejemplo, es imperativo el no permitir la salida de líneas importantes durante horas de demanda máxima y aún menos en presencia de una contingencia, dado que se afecta la integridad del SEP. Estudios recientes del área de estabilidad transitoria han revelado la necesidad de disminuir el tiempo de desconexión ante fallas para evitar condiciones de pérdida de sincronismo en el SEP. Los tiempos críticos de desconexión están en el orden de ciclos a decenas de ciclos [87]; ese tiempo se reduce a medida que el SEP pierde redundancia, debido a un rezago en el crecimiento de la red de transmisión y la generación con respecto al incremento de demanda.

Lo anterior establece la necesidad de diseñar sistemas de protección y de control que actúen con alta velocidad para poder preservar el sincronismo del sistema; estos sistemas deben asegurar además una operación continua, con la calidad de energía solicitada y reduciendo a un mínimo los daños producidos por las fallas. La protección de ultra-alta velocidad en todos los puntos de la red de EHV o UHV y la operación correcta de relevadores e interruptores a nivel local, particularmente en las líneas, representa una forma efectiva de control dinámico para el SEP. Este trabajo está orientado a la reducción del tiempo de liberación de fallas en líneas de extra o ultra-alta tensión. En la desconexión de las líneas están implicados dos tiempos:

1. El tiempo necesario para detectar la falla y emitir la señal lógica de disparo de interruptores.
2. El tiempo requerido por el interruptor para abrir sus contactos y extinguir el arco.

Este proyecto de investigación está orientado al primero de los dos casos antes mencionados. Se propone como objetivo general desarrollar un relevador que supere la velocidad de operación de los relevadores tradicionales, sin desatender las otras propiedades básicas de la protección.

El principio más utilizado en la protección de líneas de EHV o UHV es el de distancia [**29**]. En el procesamiento interno del relevador de distancia para elaborar la señal de disparo del interruptor existe una barrera técnica que hace difícil reducir los tiempos de operación. Esta barrera es el tiempo requerido para el cálculo de fasores mediante un filtrado orientado a eliminar las componentes transitorias que originan las fallas en las señales de entrada al relevador. Sin embargo, esa información puede ser útil para caracterizar las fallas que ocurren dentro y fuera de la zona de protección. Este aspecto en particular es la motivación de este trabajo, que propone implementar un nuevo principio de protección que aprovecha la información transitoria de alta frecuencia que aporta la falla.

Desde la década de 1970, se ha estudiado la posibilidad de utilizar las componentes de alta frecuencia de las señales que recibe un relevador como base para detectar fallas; prueba de ello son los prototipos de relevadores en que se utiliza el principio de protección de onda viajera (OV). Este principio está reconocido como el que

hace posible la mayor velocidad de operación [36,93]; sin embargo. su aplicación práctica aún está detenida por aspectos tecnológicos, tales como las limitaciones de ancho de banda de los transductores de corriente y potencial, y la necesidad de microprocesadores más rápidos.

En la década de 1990 surgió una línea de investigación de protecciones basada en técnicas de inteligencia artificial. Este trabajo constituye un esfuerzo de desarrollo de un sistema de protección de líneas de transmisión basado en ondas viajeras e inteligencia artificial. En este capítulo se presenta un panorama general del desarrollo de los relevadores neuronales para líneas y se indican los temas que se abordan en la tesis.

1.3 Objetivos de la tesis

El objetivo general de esta tesis es obtener algoritmos para un elemento instantáneo de protección de líneas de transmisión que basa su principio en el reconocimiento de patrones con redes de neuronas artificiales. La investigación realizada en esta tesis incluye el estudio de los aspectos siguientes:

1 Identificar los problemas de aplicación de los relevadores de distancia y de onda viajera.

2 Desarrollar un simulador digital para generar las señales transitorias que recibe un relevador de ultra-alta velocidad.

3 Desarrollar técnicas de pre-procesamiento de señales que facilite el proceso de reconocimiento de patrones con redes de neuronas artificiales (RNA).

4 Desarrollar una metodología de diseño de las RNA para aplicaciones de protección de líneas.

5 Estudiar soluciones neuronales a los problemas de detección de fallas, clasificación de fallas y estimación de zona de fallas.

6 Desarrollar un prototipo en MATLAB de un elemento neuronal instantáneo de protección de líneas de transmisión.

7 Hacer pruebas de desempeño al prototipo de relevador neuronal.

El cumplimiento de estos objetivos constituye el sustento teórico del relevador. Para una futura aplicación de esta tecnología, se incluyen pruebas de desempeño de un prototipo de relevador a nivel de simulación digital y sujeto a condiciones operativas ordinarias y ante fallas difíciles de detectar.

1.4 Contenido de la tesis

Este trabajo fue dividido en los siete capítulos que se muestran en la Fig. 1.1. En la figura se indican en forma resumida los temas que se investigan en la tesis.

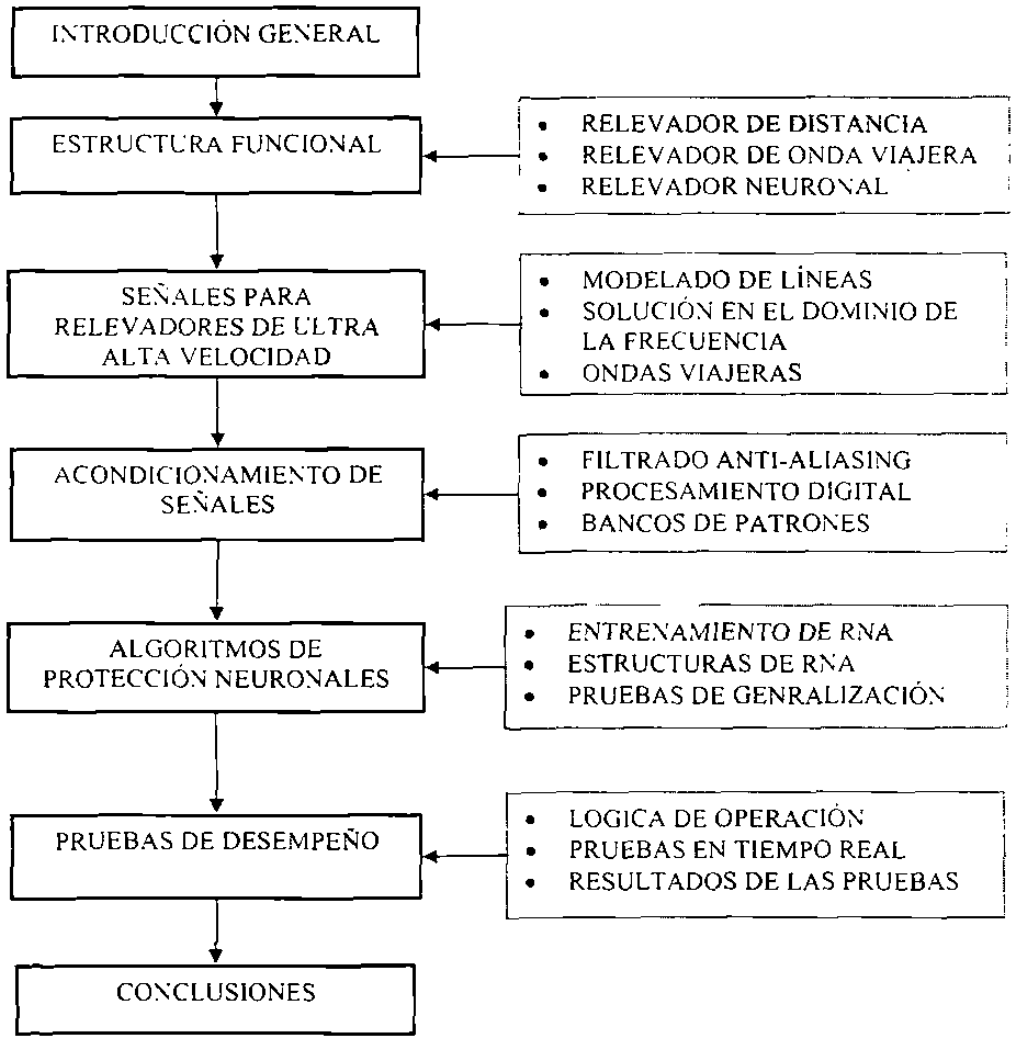

Fig. 1.1 Diagrama de bloques de la tesis.

1.5 Aspectos de diseño

En el diseño de un relevador de ultra-alta velocidad es necesario tomar en cuenta un conjunto de aspectos para seleccionar y aplicar correctamente el principio de protección. Como resultado, el relevador debe cumplir con los requerimientos básicos de la protección: velocidad de operación, confiabilidad (seguridad y dependabilidad), selectividad y sensibilidad [**10,78**].

La Fig. 1.2 muestra los elementos de un sistema de protección de líneas de transmisión. Se observan los transductores de corriente (TC) y de potencial (TP), los relevadores de protección (R), el interruptor (52) y el sistema de comunicaciones. Los relevadores pueden ser de sobrecorriente, direccional, de distancia o diferencial y cumplen la función de detección de fallas y de emisión de señales de disparo de interruptores.

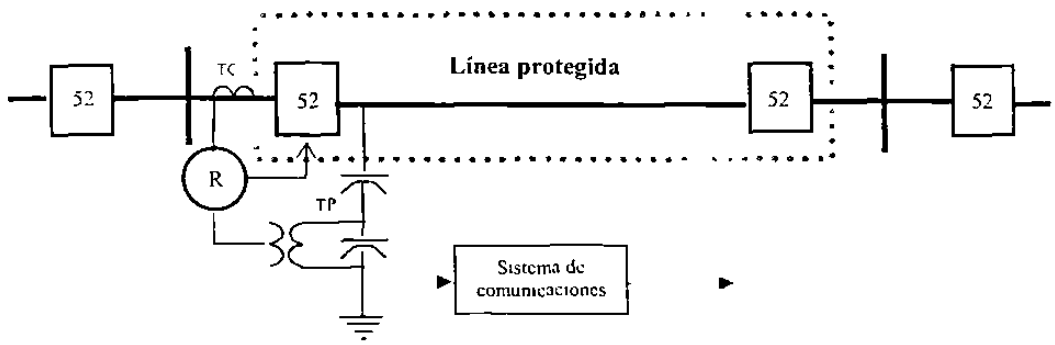

Fig. 1.2 Esquema de protección de una línea.

En un estado de falla, el relevador recibe a su entrada señales distorsionadas por la presencia de una componente aperiódica de naturaleza exponencial y de componentes amortiguadas de alta frecuencia. Estas señales contienen también ruidos derivados del proceso de adquisición de señales, tales como los debidos a la saturación de los TC o a los procesos transitorios en los TP del tipo capacitivo. Pese a estos inconvenientes, los relevadores son capaces de reconocer la presencia de fallas a partir de la información contenida en las señales de entrada. El sistema de comunicaciones le brinda al relevador la posibilidad de conformar un esquema de protección comunicado. Esto permite una

operación de protección de alta velocidad para fallas en el 100% de la longitud de la línea protegida. Sin embargo, el objetivo de esta tesis es diseñar un relevador que responda desde un sólo terminal de la línea y sin requerir información remota.

Los relevadores de protección de líneas de transmisión actuales, utilizan frecuencias de muestreo de 8 a 128 muestras por ciclo (de 0.5 a 8 kHz) [**29,85**]. La tendencia futura es aumentar la frecuencia de muestreo con fines de explotar al máximo la capacidad de procesamiento y aumentar la resolución de los reportes de eventos del relevador. En este diseño se hace énfasis especial en mejorar la velocidad de operación. También se pretende eliminar las limitaciones existentes en los relevadores de distancia, sin aumentar la complejidad de diseño y ni el costo del relevador.

Los problemas existentes en los esquenas de protección de distancia que se discuten en el Capítulo 2, sirven como un punto de partida para desarrollar un método novedoso de adquisición de datos. Para satisfacer el criterio de bajo costo de implementación, se propone diseñar algoritmos que se ejecuten en estructuras tradicionales de 16 o 64 muestras por ciclo. Se investiga esencialmente la manera de optimizar el software de un relevador digital en funciones de filtrado y de protección instantánea. Se comentan particularidades de algoritmos suplementarios para tareas de respaldo, control, supervisión, señalización y comunicación, pero en el contexto de un relevador de distancia. Se propone entonces implementar un principio de protección que responda a la información generada por las fallas, y en que no sea crítica la influencia de los errores de medición de las señales que reciben los relevadores de distancia. Ello se puede lograr si el principio no se basa en los modelos de las señales medidas o del sistema de potencia, sino en patrones de las señales de voltaje y corriente, que sean indicadores de las condiciones de falla en la línea de transmisión.

La idea anterior condujo a la utilización de una red neuronal como el algoritmo identificador de fallas. En la memoria del relevador se codifican los pesos de las redes de neuronas artificiales [**57,61**]. Las RNA tienen un mejor desempeño cuando se les procesa la información de entrada con un filtrado digital, que en la literatura especializada se denomina etapa de extracción de rasgos distintivos. Esas técnicas de filtrado requieren menos tiempo de procesamiento que los filtros digitales de los relevadores tradicionales,

de manera que el relevador neuronal puede responder con mayor velocidad [**99**]. A continuación se resumen los principales resultados reportados en la literatura especializada. Los conceptos fundamentales de redes de neuronas y su aplicación en algunas tareas de protección de líneas se han reportado en trabajos anteriores [**9,81**].

1.6 Investigaciones realizadas

En la década de 1980 la comunidad de investigadores en protección de sistemas eléctricos, propuso la incorporación de funciones adaptivas como una alternativa de solución a problemas detectados en los relevadores tradicionales que tienen parámetros de ajuste fijos [**20,24,79**]. El cálculo automático de esos ajustes en tiempo real ayudaría a que los relevadores requirieran un mínimo de intervención humana y a que fueran menos susceptibles a fallos de operación.

Se comenzó a investigar la manera de integrar ese tipo funciones adaptivas a los esquemas de protección. En esa búsqueda aparecieron los primeros reportes que proponían las técnicas de inteligencia artificial (IA). Las RNA en un inicio se utilizaron como una herramienta externa, útil para calcular parámetros de ajuste de protecciones, en especial para mejorar la selectividad de los relevadores de distancia [**79,82**].

Uno de los trabajo pioneros fue publicado en 1989 por Sobajic, quien sugería incorporar en el esquema de protección a las RNA, haciendo un monitoreo en tiempo real para mejorar la seguridad del sistema [**90**]. En ese trabajo, las RNA fueron entrenadas con el algoritmo de retropropagación del error (BP), pero se utilizaban como un módulo adicional, al cual se introducían informes capturados del sistema, y respondían proporcionando datos útiles para el ajuste de los parámetros de ajuste de las protecciones. Con ese trabajo se demostró que las RNA podían adaptarse al SEP, sometiendo las RNA a un proceso de interacción continua.

En 1990 Ebron presentó otro trabajo con RNA para detectar fallas incipientes en alimentadores de sistemas de distribución [**40**]. Su artículo ya mencionaba la necesidad de un pre-procesamiento de las señales introducidas a la RNA para que se pudieran identificar los patrones asociados a las señales de distintos eventos. La aplicación en este caso estaba orientada a una protección de sobrecorriente y, por tanto, sólo manejaba la

información de las corrientes de los alimentadores, obtenidas por simulación digital y no por registros de fallas reales.

En 1991, El-Sharkawi dio a conocer un panorama general de las posibles alternativas de aplicación y los aspectos de implementación asociados a las RNA en distintos componentes del SEP [41]. Una aplicación para los sistemas de distribución presentada en ese mismo año por Lubkeman, consistía en utilizar RNA entrenadas en forma no supervisada, con el fin de detectar y clasificar fallas en alimentadores [62].

Uno de los primeros trabajos en líneas de transmisión fue reportado por Khaparde, con una aplicación de las RNA donde se involucraban los patrones de voltajes y corrientes en el entrenamiento de la RNA para la extracción de rasgos de las señales de una protección de distancia [59]. Las señales eran obtenidas en un programa de cómputo de transitorios electromagnéticos utilizando un modelo de línea polifásica, pero a la RNA únicamente se le hacían llegar señales sinusoidales, lo cual era criticable por el hecho de seguir con el problema de un retardo no deseado provocado por la etapa de filtrado.

En 1993, Boheme y Kulicke publicaron en Alemania un artículo [20], que se concentraba en optimizar los algoritmos de protección de distancia siguiendo un procedimiento similar al presentado por Ebron. Utilizaban el concepto de señales estacionarias para pasar a la clasificación de patrones y dejaban establecida la necesidad de hacer todo un proceso de adquisición de datos para formar bancos de patrones de entrenamiento que llevaran a la RNA a una generalización. Dalstein, investigador del mismo grupo, en el mismo año presentó un artículo donde la RNA constituía por primera vez un algoritmo que sustituía al algoritmo determinístico tradicional de un relé digital [30]. En esta implementación se utilizaban las muestras de voltaje y corriente como entradas directas a la red neuronal. Lo que hacía sobresaliente a este esquema era su mayor velocidad para la detección del instante de ocurrencia de la falla y para la clasificación del tipo de falla debido a la eliminación de los algoritmos de filtrado digital. El aspecto que le fue criticado a este trabajo, fue el excesivo tiempo de entrenamiento de la RNA requerido.

En 1993 Fitton y su grupo presentaron una solución orientada a ayudar a mantener la estabilidad del sistema [43]. En este trabajo las RNA mostraban habilidades adicionales

que se podían incorporar al esquema de protección, ya que eran utilizadas para hacer la tarea de selección de las fases falladas y provocar el recierre automático de los interruptores. El trabajo tenía el problema de requerir un procesamiento de las señales para descubrir las características de las señales eléctricas para fallas permanentes y no permanentes, a fin de que las RNA se dedicaran a procesar esta información por separado.

Una propuesta similar fue presentada por el grupo de Kezunovic en 1994 [**58**]. En este caso, la RNA hacía el análisis de la falla en tiempo real, manejando datos crudos de la señal de entrada. Para eliminar la etapa de pre-procesamiento de señales hubo que concentrarse en el método de entrenamiento de la RNA, combinando la información obtenida de registros de fallas reales y de simulaciones digitales. Ese estudio despertó el interés de identificar la estructura de RNA que cumpliera con los requerimientos de cada función de protección.

Otro artículo de Dalstein para líneas de transmisión, mostró por primera vez la estrategia que se debía seguir para que las RNA pudieran hacer una discriminación direccional de fallas [**33**]. En este trabajo se introducían los conjuntos de datos apropiados para que la RNA pudiera clasificar las fallas como externas o internas a la línea. Se estudió el problema de la definición de la estructura de RNA, y se demostró que las redes de tipo multicapa y con una sola capa oculta eran adecuadas para esa tarea. El trabajo de investigación de Dalstein probó también que las RNA tenían su más bajo nivel de desempeño para fallas trifásicas, a causa de que todas las muestras crudas de voltaje y corriente cambian sustancialmente en su representación vectorial.

Debido a la gran variedad de representaciones de señales digitales que se podían manejar en la entrada de la RNA, surgió el problema de investigar el efecto de aumentar la frecuencia de muestreo y modificar la longitud de la ventana de datos. Los trabajos mencionados eran todos ajustados a la velocidad de procesamiento de una estructura de relevador digital convencional. Para la arquitectura de RNA utilizada en el trabajo de Dalstein, bastaba con emplear una ventana con cinco muestras consecutivas de cada señal eléctrica, con una frecuencia de muestreo de 16 muestras por ciclo. Esto era equivalente a reducir el tiempo de detección de la falla a poco más de un cuarto de ciclo.

Dalstein perfeccionó su técnica omitiendo la etapa de pre-procesamiento de señales para detectar el tipo de falla [32]. Con otro trabajo alcanzó un objetivo buscado por los especialistas, de obtener un algoritmo a ejecutar en un procesamiento paralelo distribuido, y que no requería un tiempo previo de procesamiento de señales. Por tanto, la RNA quedaba consolidada como prototipo de filtro digital y algoritmo de control en forma integrada. Así quedaba abierta el área de investigación orientada a fundamentar matemáticamente el proceso de filtrado implícito que se había logrado en las RNA.

En 1995, los grupos de Kezunovic [57], y de Sidhu [88] presentaron artículos similares en cuanto a la aplicación de RNA. Se reportaron implementaciones de una RNA ya codificada y lista para recibir muestras en tiempo real. En el trabajo propuesto por Sidhu se utilizaba aritmética de punto flotante y se logró que la salida se obtuviera en aproximadamente 60 nS, dándole como entrada vectores de 5 muestras consecutivas con una frecuencia de muestreo de 1200 Hz. En ambos reportes, las RNA eran entrenadas con registros reales y con fallas simuladas. En el entrenamiento se incluyó información sobre distintos tipos de fallas, diferentes fases involucradas, distintas condiciones de carga, diferentes localizaciones de la falla, diferentes valores de resistencia de falla, oscilaciones de potencia, etc.

La revisión de otros artículos confirmó que la RNA de tipo perceptrón con una capa oculta era apropiada para la mayoría de tareas de protección [55]. Para ese tipo de red neuronal se distingue como patrón el mantener en la primera capa a igual número de neuronas que de estímulos. Para la capa de salida se requiere una sola neurona para emitir una señal binaria. Se observó que la función signo en la capa de salida produce la salida binaria que determina la condición de disparo de interruptor. Entre las salidas posibles de la RNA, fue demostrado que utilizar la salida del tipo ± 1 era la opción más discriminativa [8].

Un trabajo de Mohamed [65] sobre aplicación de RNA en el diagnóstico de fallas en alimentadores de sistemas de distribución, estableció que en todos los trabajos presentados hasta entonces, era de particular aplicación el algoritmo BP, debido a que el entrenamiento se hacía fuera de línea y no importaba el tiempo de entrenamiento. Prácticamente, el problema de tiempo de cómputo para el entrenamiento fue solucionado

con el método de optimización no lineal Levenverg - Marquardt [**61**], además de que se aseguraba la convergencia de la solución en el mínimo global en un tiempo reducido.

Un trabajo que presentó el grupo de Keerthipala en 1995 [**55**] demostró que el mejor nivel de éxito en la clasificación usando BP para el entrenamiento con los mismos conjuntos era de solo 80%, sin importar los parámetros escogidos. Este trabajo invitaba a los expertos en IA a que aportaran ideas para alcanzar un mejor desempeño de la protección basada en RNA.

Otros trabajos publicados en 1996 propusieron métodos de protección con RNA con resultados similares a los trabajos anteriores [**56**]. Jongepier propuso rescatar los desarrollos formales de una protección adaptiva [**53**], y sugirió conservar los algoritmos clásicos de los relevadores digitales de distancia, e incorporar sólo una RNA para que calculara un factor de ajuste para mejorar la selectividad de dichos relevadores. Por su parte, Novosel sugirió un procedimiento similar de combinar RNA y algoritmos deterministicos, pero concentrándose en el problema particular de protección de líneas con compensación serie capacitiva [**69**]. En los trabajos [**9,81**], se presentó una exploración a fondo del uso de RNA en la protección de líneas, identificando los problemas de protección, y estableciendo algunas de las ventajas de las formulaciones basadas en RNA con respecto a los algoritmos tradicionales de distancia.

En 1997 Coury y Jorge establecieron que las RNA permitían en forma simple considerar más factores en la protección de distancia [**28**]. Ellos se concentraron en el caso de un sistema trifásico y reportaron que el relé no se veía afectado por sobrealcance, y que el error del resultado era menor que 0.01, lo cual representa un mejor desempeño que los relevadores digitales convencionales.

Una solución que presentó el grupo de Chen [**105**] para estimar la ubicación de fallas, se basaba en una arquitectura con una capa de salida compuesta de dos neuronas, una de las cuales determinaba la resistencia de falla, mientras la otra determinaba la distancia eléctrica al punto de falla. Este trabajo ponía especial atención en optimizar la arquitectura de la RNA, y proponía una metodología para que, aún en los casos no previstos, se lograra alcanzar una solución. Un aporte de este trabajo fue que utilizaba

más de una neurona en la capa de salida, lo cual equivalía a integrar distintos algoritmos a una única estructura de RNA.

En años recientes se ha trabajado en líneas de investigación derivadas de los trabajos anteriores. Una de esas líneas es la generación de reglas para definir la topología de las redes de neuronas. Tal es el caso del trabajo publicado por Sidhu **[89]**. en que se propone un procedimiento para extraer las reglas de aplicación de un elemento discriminador direccional. Los trabajos realizados por Song [**92**] y por Bachean [**11**] han extendido la aplicación a la protección neuronal de líneas con compensación serie. En estos trabajos se generaron las señales por simulación digital, pero se utilizan representaciones de patrones y técnicas de aprendizaje diferentes.

Otros problemas complejos, tales como la detección de arcos eléctricos o fallas de alta impedancia, han sido tema de estudio en artículos recientes **[6]**. Para el reconocimiento de patrones de fenómenos transitorios con mayor grado de complejidad, la tendencia que se ha seguido es aumentar la frecuencia de muestreo y el número de muestras en la ventana de datos. Actualmente se desarrollan algoritmos basados en RNA que comienzan a recibir patrones de ondas viajeras [**83**]. A medida que los prototipos utilizan ventanas más cortas y más muestras, se requieren simulaciones con mayor grado de exactitud. Los artículos publicados en los últimos años han alcanzado también resultados satisfactorios cuando se procesa la información de entrada de las RNA con onduletas [**25**]. En esa línea de investigación solo se ha evaluado la aplicación directa de onduletas ya probadas en otras áreas de la ingeniería. Su aplicación en tiempo real es factible para estructuras en que se desea procesar ventanas de datos de longitud fraccionaria con respecto a un ciclo de frecuencia fundamental.

Se puede decir que en casi todas las aplicaciones mencionadas anteriormente, se utilizó una red neuronal con alimentación hacia delante, y con un algoritmo de retropropagación del error. En casi todos los proyectos de investigación, la tarea principal fue implementar una red neuronal que se ajustara específicamente a un sólo problema de protección. Varios artículos **[8,53]** recomiendan el empleo de RNA con módulos especializados para distintas tareas, y muestran el atractivo de crear una única estructura de RNA con todas las funciones de protección incluidas. En base a esa observación, han

aparecido trabajos que combinan RNA con otros sistemas de IA. Por citar algunos, en 1996 Bo estudió fallas evolutivas en líneas de transmisión **[19]**, utilizando estructuras de RNA y algoritmos genéticos (AG). En este reporte se presenta una metodología para determinar una estructura reducida, capaz de hacer la tarea de clasificar las fallas.

Un reporte presentado en [7], sugiere un control neuro-difuso para clasificar las fallas. En este reporte se hace uso de los conceptos de lógica difusa, representando las corrientes como entradas dadas en funciones de membresía. De esta manera se logra establecer la influencia de las fallas y también demostrar que estas estructuras pueden hacer la tarea de clasificar la falla.

En 1997, Song utilizó RNA con técnicas de aprendizaje por reforzamiento para hacer la clasificación de patrones. En este caso se utilizó un AG para descubrir el espacio de los pesos de una RNA multicapa, de tal forma que, cuando no se conoce el gradiente, se optimiza la solución con un algoritmo genético **[17]**.

Son también de mencionar los trabajos que presentó el grupo de Aggarwal para el diagnóstico de fallas [4], en que se utilizó un procedimiento con conceptos de la teoría de resonancia adaptiva (ARTmap), y otro procedimiento para clasificar fallas en líneas de doble circuito, utilizando conceptos de mapeo autoorganizado (SOM). Este es un ejemplo en que el entrenamiento de las RNA consiste en aplicar dos paradigmas de aprendizaje: supervisado y no supervisado. Se propuso utilizar una red Kohonen **[49]** para extraer los rasgos distintivos de las señales de entrada, y con esa etapa, acelerar el entrenamiento de la RNA supervisada. Ese resultado demuestra que basta con utilizar los patrones representativos de fallas y no fallas para formar el banco de patrones.

Es importante tener en cuenta que cada técnica de IA ofrece ventajas y desventajas, que hay que considerar al seleccionarlas para resolver problemas específicos. Pero, aún con la aparición de estos nuevos trabajos, se considera que las RNA por sí solas son adecuadas para problemas con procesos no lineales, y en los que operan con información incompleta. En general, todos los trabajos citados prueban que con las RNA se evita la construcción de un algoritmo determinístico producto de un modelo matemático paramétrico. Estos trabajos también prueban que una vez que la RNA fue entrenada y se han determinado los parámetros, lo que se obtiene es como un algoritmo

impedancia medida por el elemento mho sirvió en este trabajo de tesis como una herramienta gráfica para reconocer rasgos distintivos en señales transitorias, en especial patrones producto de fallas o maniobras en interruptores. Sin embargo, no se reportan en la tesis, por razones de espacio resultados relativos a este relevador de distancia.

En este proyecto se considera importante estudiar el comportamiento de las señales que recibe un relevador y evaluar la posibilidad de utilizar las ondas viajeras para caracterizar las fallas. En el Capítulo 3 se estudian aspectos tales como los frentes de onda de las señales transitorias originadas por las fallas, y el mecanismo de propagación de señales en los sistemas polifásicos de transmisión de energía. Se reporta una metodología para modelar líneas aéreas y se cumple el objetivo de que las simulaciones incluyan el fenómeno de dispersión lineal, al simular las ondas viajeras solucionando las ecuaciones mediante una técnica del dominio de la frecuencia. En este trabajo se simulan transitorios electromagnéticos en líneas aéreas teniendo bajo control cada una de las variables aleatorias implicadas en las fallas: la distancia a la falla, el valor de la resistencia de falla, el tipo de falla, la impedancia de fuente, la zona de falla, etc.

La exploración de nuevas técnicas de procesamiento digital y de modelos de RNA generales es parte de los objetivos de la tesis. En el Capítulo 4 se presenta el procedimiento para acondicionamiento de señales del relevador neuronal. Se evalúan distintas técnicas de filtrado; una de ellas es el procesamiento mediante una convolución discreta. En esa sección se presentan conceptos básicos del filtrado con onduletas. Una vez que se explica su adecuación a este problema del filtrado, se estudia el efecto de un aumento en la frecuencia de muestreo y una reducción de la longitud de ventana, como alternativas para disminuir el tiempo de operación del relevador.

Un artificio utilizado en la protección de sistemas polifásicos es el desacoplamiento de señales. En este trabajo, las señales de voltaje y corriente son desacopladas con los modos naturales que se definen en la teoría de Análisis Modal [96]. Un objetivo de este trabajo de investigación es reducir el grado de heurística en la aplicación del principio neuronal. En el Capítulo 5 se presentan conceptos de clasificación de patrones y se definen los parámetros de las redes de neuronas adecuadas

para las tareas de detección del instante de la falla, la clasificación del tipo de falla y la discriminación direccional de la ubicación de la falla.

Los distintos algoritmos de RNA del relevador en conjunto deben satisfacer los requerimientos básicos de la protección de líneas de transmisión. Es por ello que en el Capítulo 6 se muestran pruebas de desempeño al relevador neuronal y se estudia por simulación digital la respuesta de los algoritmos ante problemas comunes en la protección de líneas, tales como el instante de inserción de falla, los valores de resistencia de falla e impedancia de fuente, y distintas configuraciones de líneas.

Las RNA del tipo perceptrón multicapa se manejaron en procesos resueltos en un estado estacionario. Posteriormente se trabajó en un primer prototipo de relevador neuronal digital, el cual se prueba en una aplicación en tiempo real.

El número de neuronas y de capas que comúnmente se determinaba de manera heurística, en este trabajo se ha determinado siguiendo un criterio de selección y de entrenamiento ajustado a tres problemas esenciales de la protección.

Aunque no fue sentada una base matemática completa que sustente el uso de las redes de neuronas artificiales como filtro y como algoritmo de protección, con las pruebas fuera de línea y posteriormente las realizadas en tiempo real al prototipo de relevador neuronal, fue validado el uso de esta nueva tecnología perfectible en desarrollos posteriores. En el Capítulo 7 se formulan las conclusiones derivadas de este trabajo, se establecen las principales aportaciones, y se sugieren tópicos de investigación futura en este tema.

CAPÍTULO II

RELEVADORES DE PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

2.1 Introducción

En el presente capítulo se hace la descripción de los relevadores de distancia y de onda viajera (OV). El estudio sirve para establecer las tareas primarias de la protección de líneas y conocer los requerimientos de la protección de ultra-alta velocidad. De esa forma se crea un marco de referencia para introducir al relevador neuronal y definir su estructura funcional. Se establece también el plan de desarrollo para llegar a un prototipo de relevador neuronal.

2.2 Funciones primarias en un relevador digital

En [**78,85**] se dan a conocer aspectos básicos del diseño de un relevador digital. Este tipo de relevadores tiene el atributo de ejecutar un grupo de algoritmos para cumplir con los requerimientos de la protección: confiabilidad, selectividad, velocidad de operación y sensibilidad. Los relevadores actuales de protección de líneas de transmisión se basan en los principios de protección de sobrecorriente, direccional, de distancia y diferencial [**10,27,85**]. Desde hace años se investiga la posibilidad de incorporar nuevos principios en la protección de líneas [**16,50**]. Esto puede hacerse modificando los algoritmos del relevador. Ello es posible en las estructuras digitales, dada la flexibilidad de su software. Prueba de ello es la variedad de algoritmos que se ejecutan para diversas tareas adicionales a las de protección, tales como la medición, control, supervisión, comunicaciones, diagnóstico, etc.

Entre todas las funciones que hoy realizan los relevadores digitales, la primordial es provocar la desconexión del elemento que ha experimentado una falla. Por tal motivo,

ante una condición de falla, el relevador da prioridad a la ejecución de los algoritmos encargados de la tarea de la protección primaria instantánea, que implica al menos a los algoritmos de filtrado digital, detección del instante de ocurrencia de falla, clasificación del tipo de falla y discriminación de la zona de falla [**10,50**]. Como producto de la ejecución de esos algoritmos se genera una señal binaria de disparo de uno o varios interruptores.

A continuación se exponen problemas asociados a los dos tipos básicos de relevadores tradicionales de protección de líneas. De esa manera se dan a conocer las áreas en que las RNA pueden contribuir a la solución de los problemas. Como resultado, se define un esquema genérico para el relevador neuronal a partir de algoritmos de respuesta instantánea. Se hace énfasis en el bloque de elementos instantáneos del relevador, ya que las funciones con retardo de tiempo para protección de respaldo se cumplen adecuadamente con técnicas convencionales.

2.3 Análisis del relevador de distancia que responde a componentes de frecuencia fundamental

La Fig. 2.1 muestra el diagrama funcional de un relevador digital de distancia. El relevador de distancia reconoce una falla dentro de su zona de protección en base a la comparación con uno o varios parámetros de ajuste, de una función formada a partir de las señales de voltaje y corriente de entrada al relevador. Esa función puede ser la impedancia que resulta de dividir el fasor de voltaje de frecuencia fundamental por el fasor de corriente de frecuencia fundamental. Sin embargo, la mayoría de los relevadores digitales de distancia actuales no hacen el cálculo explícito de la impedancia [**85,87**].

El proceso se inicia cuando las señales analógicas de voltaje y corriente pasan por los transductores internos del relevador. Las señales son filtradas antes de la conversión análogo-digital (A/D). El filtro antialiasing es un filtro analógico pasabajos que tiene por función limitar el ancho de banda de las señales de entrada. Esto permite utilizar una frecuencia de muestreo relativamente baja sin errores debidos al aliasing.

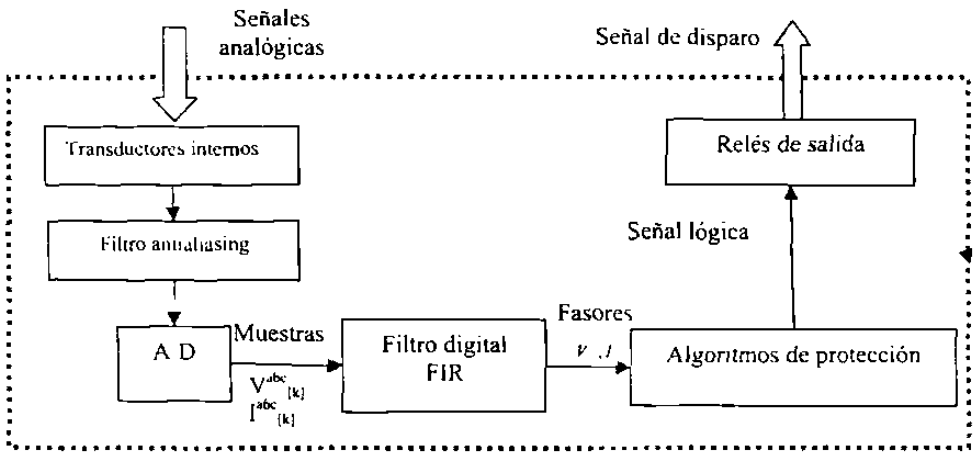

Fig. 2.1 Estructura genérica de un relevador de distancia.

El filtro digital suele ser un filtro de respuesta finita al impulso (FIR), y tiene por función eliminar las armónicas superiores y la componente aperiódica exponencial que aún están presentes en las señales transitorias. Los filtros FIR más utilizados en los relevadores digitales han sido los de Fourier y sus variantes [**71**], y el filtro Coseno [**86**]. En ocasiones se utiliza un filtro adicional solo para eliminar la componente aperiódica exponencial.

El filtrado digital se ha basado en la aproximación discreta de la integral de convolución, descrita mediante la ecuación en diferencias:

$$f_k = \sum_{k=0}^{k-1} y_k \Phi_k \tag{2.1}$$

Las componentes de frecuencia fundamental o los fasores f_k se extraen mediante la convolución discreta entre las k muestras digitalizadas y_k contenidas en la ventana de datos y los coeficientes del filtro Φ_k. Dichos coeficientes del filtro son los valores de su respuesta al impulso correspondientes a los instantes de muestreo [**71**]. Cuando se utilizan los filtros de Fourier se obtiene una respuesta al impulso de tipo complejo. Descomponiendo esta respuesta en sus partes real (coseno), e imaginaria (seno), se obtienen las dos componentes de un fasor Y, correspondientes a la señal digitalizada. Para k muestras por ciclo, las componentes están dadas por:

$$Y_c = \frac{2}{N}\sum_{k=0}^{k-1} y_k Cos(k\theta) \tag{2.2}$$

$$Y_s = \frac{2}{N}\sum_{k=0}^{k-1} y_k Sen(k\theta) \tag{2.3}$$

donde $\theta = 2\pi_{N}$ y .N es el número de muestras contenido en la ventana de datos. En un filtro digital tipo Coseno se calcula sólo la componente *Yc* y se forma el fasor utilizando dos valores separados un cuarto de ciclo. El filtro coseno es un doble diferenciador y ofrece la ventaja de rechazar bien la componente aperiódica exponencial [**35,86**].

En el filtrado están implicados los parámetros de longitud de la ventana de datos y el número de muestras procesadas (*N*). Se ha demostrado que con relativa independencia de la frecuencia de muestreo que se utilice en la conversión A/D, es conveniente que la longitud de ventana de un filtro digital para efectos de estimación de fasores sea igual a un período de frecuencia fundamental (16.67 ms a 60 Hz) [**78**]. En ese caso, *N* es igual al número de muestras contenidas en un ciclo de frecuencia fundamental. Una ventana de un ciclo da lugar a que la señal de disparo del relevador tenga como mínimo un retraso de un ciclo, que es el tiempo de llenado de la ventana de datos con información del estado de falla. Es posible implementar los filtros digitales de Fourier con ventanas de longitud menor que un ciclo. En ese caso, en las ecuaciones (2.2) y (2.3), *N* es menor que el número de muestras correspondiente al ciclo. Esto aumenta la velocidad de operación del relevador, pero afecta la capacidad del filtro de rechazar el ruido presente en las señales, en particular, la componente aperiódica exponencial. Como resultado, la respuesta de estado transitorio del relevador es deficiente. Se ha establecido que la ventana de un ciclo es la que mejor balance logra entre la velocidad de operación y la exactitud del relevador [**35,50**].

Puesto que las fallas causan un régimen transitorio en la red, y los fasores son un concepto que se utiliza para representar condiciones en estado estable, es obvio que la respuesta del relevador tradicional de distancia está afectada por los errores asociados al proceso de estimación de fasores en presencia de señales contaminadas con componentes de estado transitorio. Así por ejemplo, el cálculo de la impedancia afecta principalmente a

las tareas de detección de la falla y la discriminación de zona, las cuales responden a la comparación de dicha impedancia contra parámetros de ajuste fijos.

La Fig. 2.2 muestra el lazo de falla que se forma con una falla trifásica en una línea balanceada, a través de una resistencia de falla (R_F), y a una distancia m en por unidad de la longitud de la línea.

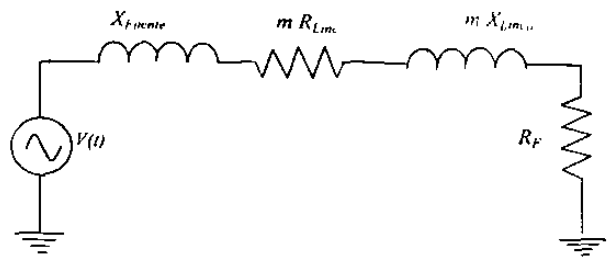

Fig. 2.2 Lazo de falla en una línea de transmisión.

Bajo condiciones ideales, la impedancia calculada por el elemento de distancia es igual a la impedancia de la sección de línea comprendida hasta la falla. La resistencia de falla (R_F) constituye una fuente de error [**27,63**]. Debido a las posibles fuentes de errores es la estimación en la distancia a la falla, la zona de operación instantánea (primera zona) de la protección de distancia se ajusta al 80-90 % de la impedancia de secuencia positiva de la línea protegida:

$$Z_{alcance} = 0.9(Z_{Linea}) \tag{2.4}$$

$$Z_{Linea} = \sqrt{R_{Linea}^{\ 2} + X_{Linea}^{\ 2}} \tag{2.5}$$

donde los parámetros R y X representan la resistencia y reactancia de secuencia positiva de la línea respectivamente. El relevador no debe operar de manera instantánea para fallas más allá de la primera zona. La Fig. 2.3 muestra la operación de los relevadores de distancia como función de la distancia. Se crean tres zonas (T^{I}, T^{II} y T^{III}), la primera zona es instantánea, la segunda y tercera zona tienen retardos intencionales de tiempo. De esa manera los relevadores de distancia hacen la función de protección primaria con la primera y segunda zonas, y la función de protección de respaldo de todos los elementos adyacentes con su segunda y tercera zonas [**87**]. Existe un problema cuando la falla

ocurre cerca de los extremos de la línea protegida; el extremo cercano opera por primera zona, y el extremo lejano a la falla opera por segunda zona. Este disparo secuencial es por lo general intolerable para la estabilidad del sistema de potencia. Para evitarlo se requiere un canal de comunicación, que permite conformar un esquema de protección piloto por comparación direccional basado en los elementos direccionales o de distancia, o un esquema de protección diferencial **[10]**.

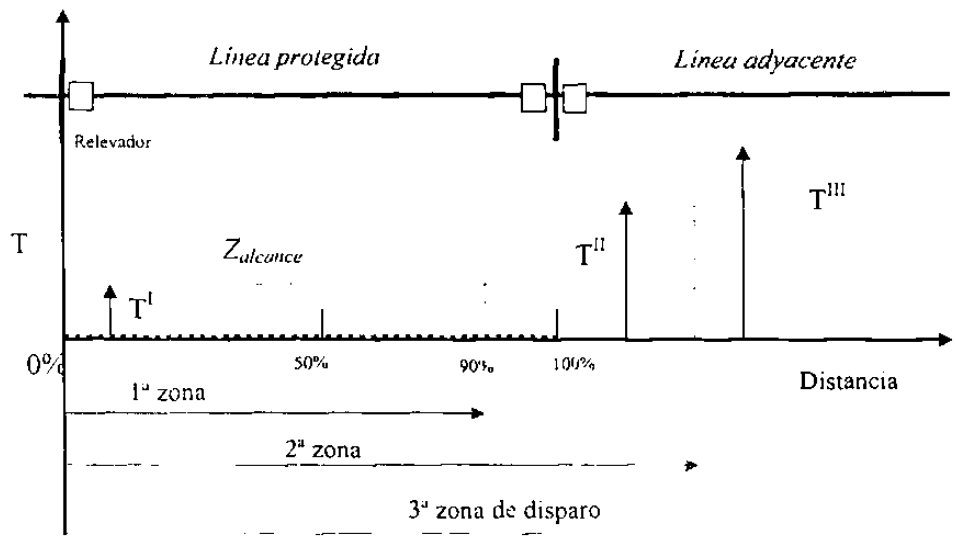

Fig. 2.3 Característica escalonada de tiempo de una protección de distancia.

Los estudios para el cálculo de ajustes de relevadores se llevan a cabo utilizando el concepto de análisis de fallas en estado estable, donde se utiliza una representación del SEP basada en fasores. Por tanto los parámetros de ajuste calculados del estudio de cortocircuito con los modelos de impedancia de líneas de estado estable, son sólo aproximados.

A manera de ilustración, en la Fig. 2.4 se muestra la representación en el plano complejo impedancia de una trayectoria de impedancia de una falla, tal como es vista por el relevador de distancia. Las señales de prueba se obtienen resolviendo la ecuación diferencial de primer orden del lazo de falla. El relevador de distancia es de tipo mho.

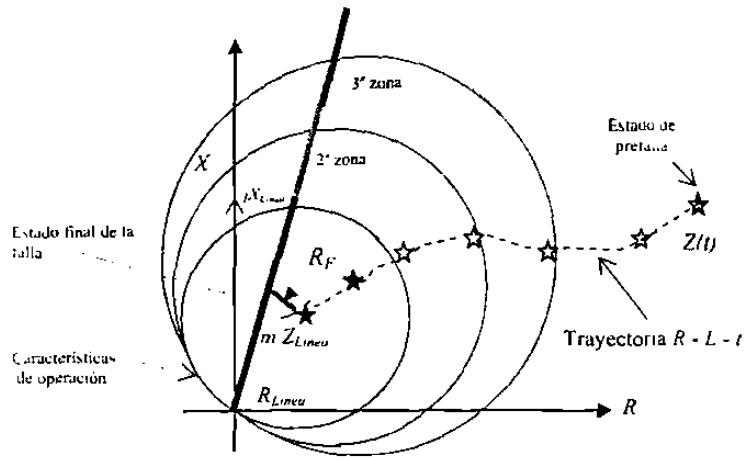

Fig. 2.4 Trayectoria R-L-t para una falla en la línea protegida a una distancia *m*.

Se puede observar que la trayectoria de impedancia calculada cambia de valor con el tiempo entre el estado de prefalla y el estado final de la falla. Esta transición es el resultado del estado transitorio que resulta del llenado progresivo de la ventana de datos con valores de falla. En esta simulación no hay componentes transitorias en el voltaje y la corriente de falla. De haber existido componentes transitorias, la trayectoria de impedancia se vería modificada por su efecto. Puede observarse que, en el estado final de falla, la impedancia calculada tiene un error debido a R_F. Esta trayectoria ha sido calculada para una frecuencia de muestreo de 8 muestras por ciclo. La impedancia calculada llega al valor final al procesarse la octava muestra del estado de falla. La primera zona ve la falla en la muestra 5, es decir un poco antes de tres cuartos de ciclo de haber ocurrido. De existir componentes transitorias en las señales de entrada al relevador, que es lo común, el tiempo de operación puede ser aún mayor.

Para incrementar la seguridad, los relevadores de distancia toman su decisión de disparo con varios valores consecutivos dentro de la característica de operación. Para ello se utiliza un contador de seguridad, que emite la señal de disparo cuando hay, por ejemplo, dos o tres decisiones de disparo consecutivas. Ello representa un retardo adicional a la respuesta instantánea del relevador.

La direccionalidad del relevador de distancia, es su capacidad de discriminar entre fallas hacia delante y fallas hacia atrás [16]. Para señales de entrada de gran magnitud, la

discriminación direccional es una tarea fácil. Para fallas cercanas, el voltaje medido por el relevador es cercano a cero, y se requiere una lógica adicional para asegurar la direccionalidad. El método más efectivo y más utilizado es la polarización del relevador de distancia con voltajes de secuencia positiva, y con memoria [**1**].

La carga es otro factor que afecta al desempeño del relevador de distancia. Representa una impedancia que varía lentamente con el tiempo y que en condiciones de carga alta, puede penetrar en la característica de tercera zona y provocar la operación incorrecta del relevador, a menos que este cuente con una lógica de bloqueo. Un problema adicional es la tendencia de los relevadores de distancia a operar por las oscilaciones de potencia debidas a fallas en otros puntos del sistema o a otras causas. Las oscilaciones de potencia. Son procesos transitorios de naturaleza electromecánica, que se presenta cuanto se tienen alteraciones súbitas del balance entre potencias eléctrica y mecánica en generadores, y el resultado es que varía el ángulo de potencia con el tiempo de forma tal que la impedancia calculada puede llegar a penetrar en la característica de operación del relevador. En esos casos se requiere bloquear el disparo de los relevadores de distancia para no desconectar líneas sanas y así preservar la estabilidad del sistema [**42,43**]. Otro factor importante en la medición de la distancia, sobre todo en la tercera zona, es el efecto de fuente intermedia en el extremo opuesto de la línea de transmisión [**27**].

Se han publicado artículos que describen métodos para aumentar la velocidad de operación de los elementos de distancia sin sacrificar su exactitud. Algunos métodos se basan en la observación de que para fallas cercanas al relevador no tiene que ser tan exacto como para fallas que ocurren cerca del límite del alcance. Trabajos recientes han propuesto calcular fasores con otros tipos de filtros y también con ventanas de longitud variable (comenzando con menos de un ciclo), o aumentar gradualmente el alcance del relevador a medida que transcurre el tiempo de falla. Estas soluciones aumentan la velocidad de operación para fallas cercanas y dan buenos resultados en esquemas de comparación direccional con canales de comunicación rápidos. Con canales lentos, para fallas cercanas al límite del alcance del relevador se obtienen los tiempos típicos de operación mayores de un ciclo [**87,14**].

Para garantizar el disparo y recierre monopolar, y para aumentar la seguridad de la protección de distancia, se utiliza un algoritmo dedicado a la tarea de seleccionar las fases falladas. Para la selección del tipo de falla se han propuesto diversos algoritmos, principalmente basados en las componentes simétricas [**10,29**]. Existen otras tareas ejecutadas por algoritmos que hoy están integrados en los relevadores digitales de distancia, que quedan fuera del alcance de esta tesis.

Las tareas involucradas en la respuesta instantánea del relevador (primera zona), son la detección del instante de ocurrencia de falla, la discriminación de zona de falla y la clasificación del tipo de falla. En la siguiente sección se establecen los tiempos consumidos por esos algoritmos de protección, cuando están basados en fasores de frecuencia fundamental y no utilizan la información de alta frecuencia proporcionada por la falla. Los filtros analógico y digital requieren un tiempo adicional para eliminar esas componentes, lo que introduce retardo en el relevador.

2.4 Caracterización de tiempos en un relevador de distancia

En la Fig. 2.5 se muestran las etapas del procesamiento ejecutadas en el relevador de distancia y los tiempos que típicamente se consumen en estas etapas. Los tiempos están normalizados con relación a un ciclo de frecuencia fundamental [**87**].

En la Fig. 2.5 puede observarse que el tiempo de ejecución del filtrado digital para extraer fasores de frecuencia fundamental ocupa la mayor parte del tiempo del procesamiento necesario para elaborar la señal de disparo. Para los filtros con ventanas de un ciclo típicamente utilizados, el retardo del filtro digital es del orden de un ciclo para fallas cercanas al límite del alcance, y se reduce una fracción de ciclo para fallas cercanas.

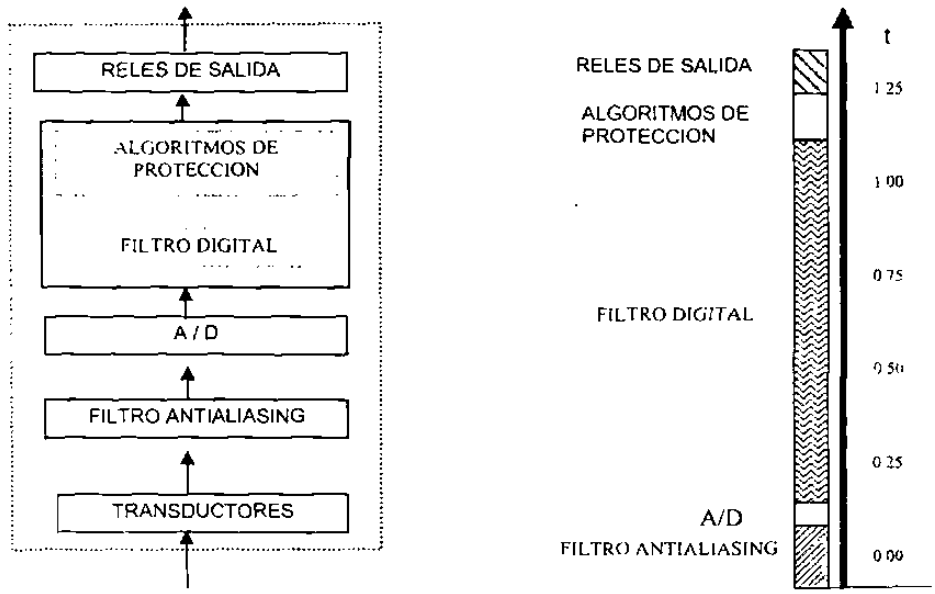

Fig. 2.5 Etapas de procesamiento de señales típicas en un relevador de distancia y tiempos de respuesta.

El retardo del filtro digital representa entonces una limitación de principio [**9,35**], que. con independencia de la frecuencia de muestreo, los relevadores digitales tradicionales con ventana de un ciclo. Una forma de resolver este problema es utilizar la información de alta frecuencia generadas por la falla como base para su detección, en vez de eliminarla en el filtrado. Dado que las ondas viajeras se propagan a gran velocidad, utilizando esas señales se puede acelerar la respuesta del relevador. A continuación se hace el análisis del relevador de onda viajera con el fin establecer otros aspectos útiles para la definición de la estructura de un relevador neuronal.

2.5 Análisis del relevador de onda viajera (OV)

Un corto circuito en una línea de transmisión se inicia con la ruptura del dieléctrico de uno o varios conductores de fase. La resistencia de la falla representa una nueva trayectoria para las corrientes. Ese cambio topológico puede tratarse como una fuente conectada en el punto de inserción de la falla, inyectando ondas viajeras que se propagan en ambas direcciones de la línea a velocidades cercanas a la de la luz (3e8 m/s) [**16**].

La Fig. 2.6 ilustra el caso de ondas viajeras generadas por una falla que ocurre en el instante t_0 en un punto situado a una distancia x con respecto al relevador. El frente de onda llega al relevador en el instante, $t_0+\Delta t$ y se ve distorsionado por efectos de la propagación. A partir de entonces, las ondas viajeras se reflejan en las terminales de la línea y también en el punto de falla, hasta que desaparecen debido a las pérdidas en el sistema. Para fallas cercanas al terminal de la línea en que está el relevador, el número de reflexiones es alto y ocurren oscilaciones de muy alta frecuencia en las señales de entrada del relevador (hasta cientos de kHz).

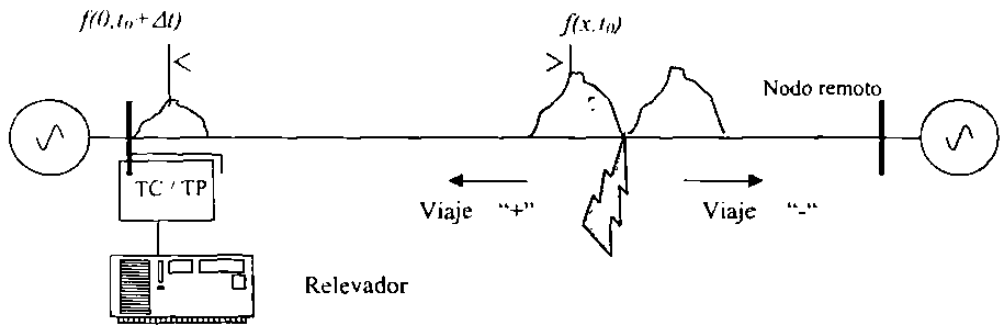

Fig. 2.6 Ondas viajeras en un sistema de transmisión.

Un relevador de onda viajera tiene una arquitectura similar a la que tiene un relevador de distancia [**104**]. El diseño persigue el mismo objetivo de emitir una señal lógica de disparo del interruptor; sin embargo, en este tipo de relevador las componentes de frecuencia fundamental representan ruido y las componentes de alta frecuencia generadas por las ondas viajeras resultantes de la falla constituyen la información.

Para trabajar con la información de las ondas viajeras se requieren transductores de corriente y de potencial de gran ancho de banda [**52,64**]. Se requiere también una muy elevada frecuencia de muestreo en el relevador y microprocesadores de gran velocidad de operación.

El relevador de OV activa la función de protección cuando un detector de fallas, revela la presencia de un salto abrupto en cualquiera de las señales analógicas de entrada al relevador. A partir de ese momento, para cada instante de muestreo se retienen las muestras de las señales transitorias.

La Fig. 2.7a muestra un diagrama de rebotes para ilustrar las reflexiones de las ondas viajeras [15]. Se observan las ondas viajeras originadas por una falla en la línea y sus rebotes, con relación a un tiempo de viaje *T*. En la Fig. 2.7b se presenta el tipo de formas de onda que se registran en el punto en que se ubica el relevador.

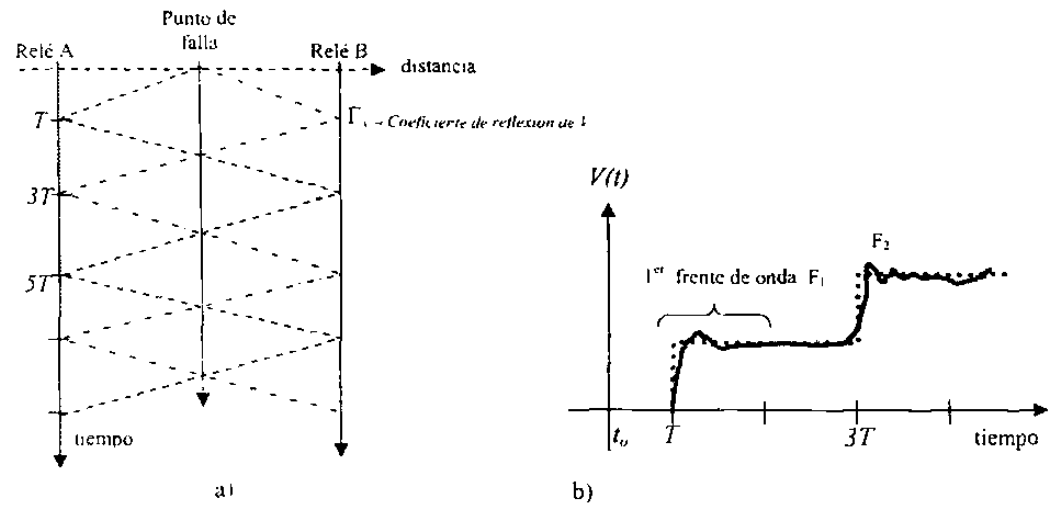

Fig. 2.7 Ondas viajeras reflejadas en un sistema de transmisión.

El reconocimiento del frente de onda reflejado desde el punto de falla se deduce de una operación de correlación del tipo de (2.6), en que se procesa el conjunto de muestras del primer frente F_1 y las subsiguientes muestras que se retienen en la memoria temporal (F_2).

$$S_k = \sum_{i=0}^{k-1} F_{1k}\ F_{2k} \tag{2.6}$$

De aquí resulta una señal instantánea (S1) a cada *k-ésima* muestra, la cual se compara contra un parámetro de sensibilidad (S2). Si se supera un valor umbral, se tiene la confirmación de la presencia de la falla y entonces continúan ejecutándose dos algoritmos, uno para estimar la distancia a la falla y otro para discriminar la dirección.

La sensibilidad del relevador de onda viajera depende del parámetro de ajuste del correlador [36]. Un ajuste alto provoca que el relevador no active los algoritmos de las otras dos tareas para fallas pequeñas; un ajuste bajo puede provocar la operación incorrecta ante otros fenómenos transitorios. Los valores de ajuste críticos se obtienen de

condiciones fallas complejas, por ejemplo, fallas de alta impedancia, fallas que ocurren cerca del cruce por cero de las señales de voltaje o cuando hay una rápida atenuación de las ondas viajeras [**93**].

Un estudio de los artículos recientes ha permitido establecer que aún existen limitaciones prácticas para reconocer las ondas viajeras [**52,83**]. Uno de los problemas es resolver en el filtrado digital la definición de la longitud de la ventana de datos y la frecuencia de muestreo. En la actualidad, esos parámetros están sujetos a la capacidad de procesamiento disponible en los procesadores. Por ejemplo, en el método descrito en [**104**], los algoritmos fueron probados con ventanas de datos con ocho y diez muestras consecutivas, considerando una plataforma con una frecuencia de muestreo de 5 kHz.

Otra tarea obligada del relevador es la discriminación de las fallas. El método desarrollado por Vitins propone la descomposición de las señales medidas en la ubicación del relevador en dos funciones instantáneas [**13,78**]. La dirección se obtiene de proyectar esas dos funciones en un plano delta. Otra alternativa consiste en utilizar el signo de los frentes de onda de voltaje y de corriente. En la Fig. 2.7b se observa ese rasgo distintivo que se descubre por cálculo directo y que establece la dirección de la falla. En ese caso una diferencia en los signos representa una falla en la dirección hacia adelante del relevador.

Los algoritmos de onda viajera que han sido propuestos manejan señales desacopladas para evitar el problema práctico del acoplamiento magnético entre fases. Las alternativas que se han utilizado para simplificar el análisis y desacoplar las señales han sido las componentes de Karenbahuer y las componentes simétricas [**36**]. El desacoplamiento simplifica la detección de fallas a tierra, porque hace evidente la excitación del modo de tierra, pero en la propagación de ondas viajeras por el modo de tierra está presente el efecto de la rápida atenuación de la información [**15**].

El relevador de distancia de onda viajera toma su decisión de disparo cuando calcula la información del tiempo de viaje del primero o segundo frente de onda y lo compara con un parámetro ajuste que representa el tiempo de viaje correspondiente a la longitud total de la línea. Por lo general, solo se utiliza en el cálculo de la distancia a la falla, la OV que se propaga por el modo aéreo, debido a que es el que menos cambia en

velocidad. De la comparación de esa distancia calculada con un valor de ajuste, se confirma la presencia de una falla interna o externa. Por las velocidades de propagación de las ondas viajeras, el relevador adquiere una capacidad de respuesta muy rápida.

Los algoritmos de OV se prueban con las señales que se obtienen por simulación digital en programas de análisis transitorio, tales como el EMTP, ATP o EMTDC, debido a que estos programas generan muestras de voltaje y corriente en un formato digital compatible con los algoritmos del relevador. Aunque se puede simular gran variedad de problemas en esos simuladores digitales, existe un gran número de factores aleatorios que afectan la tarea de localizar la falla. En el capítulo siguiente se comenta la manera en que el fenómeno de dispersión lineal provoca un cálculo erróneo de la distancia. También se comentan limitaciones de implementación práctica asociados a la configuración del sistema. El problema básico de diseño de los relevadores de onda viajera es lograr la capacidad de discriminar entre las ondas viajeras generadas por las fallas en la zona protegida y las ondas viajeras generadas por fallas externas o por otros fenómenos transitorios, tales como las maniobras de interruptores. El carácter aleatorio del comportamiento de ondas viajeras hace recomendable evaluar la aplicación de técnicas de inteligencia artificial, y en particular, de las redes de neuronas artificiales.

2.6 Estructura de un relevador neuronal

Una vez que se ha presentado un panorama general de los problemas de la protección de líneas y se ha explicado la solución brindada por los relevadores de distancia y de onda viajera, se discuten a continuación dos estructuras posibles de un relevador neuronal.

En la Fig. 2.8 se muestra un esquema funcional de relevador neuronal en que directamente se integran algoritmos neuronales para las tareas básicas de la protección primaria de líneas de transmisión:

1. Detección de la falla (DF).
2. Clasificación (CF) de los 10 diferentes tipos de fallas.
3. Estimación de la zona de falla (EZF).

Cada uno de esos algoritmos consiste en una RNA del tipo perceptrón multicapa [49]. A la salida de esas redes de neuronas se tienen salidas de tipo binario, y un módulo lógico combina esas señales lógicas de las salidas de las RNA que realizan las tareas DF, CF y EZF. De esa forma se define la respuesta instantánea del relevador. Las señales de entrada a las RNA en ese esquema son las muestras crudas de voltaje y corriente. Esta variante de estructura tiene la particularidad de suprimir por completo la etapa de filtrado digital. Por consiguiente, las RNA reconocen patrones de las señales crudas y resuelven las tres tareas primarias de la protección de líneas.

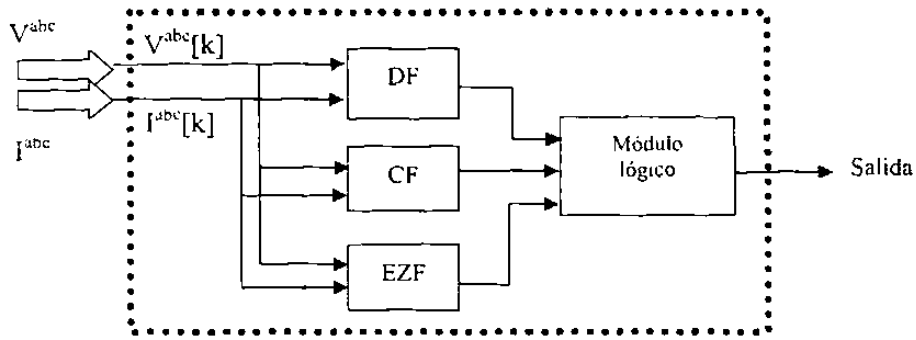

Fig. 2.8 Esquema de un relevador neuronal para protección de líneas de transmisión.

En diversos artículos se ha demostrado que el proceso de aprendizaje de las RNA es complejo cuando no se pre-procesa la información que reciben las RNA [8,99]. Cuando no existe una etapa para la preparación de información y se requiere procesar ventanas de datos de menos de un ciclo, es necesario definir en forma muy precisa la estructura y los parámetros de la red de neuronas. Es decir, para ese tipo de esquemas que operan con señales crudas hay pocas estructuras de red de neuronas que puedan desempeñarse satisfactoriamente. Los parámetros de frecuencia de muestreo y longitud de ventana ejercen gran influencia sobre la definición de la estructura de la RNA. El mejor nivel de desempeño reportado en artículos para las RNA apenas supera el 80% de la clasificación de patrones [55].

Un tópico investigado en este trabajo es el estudio de técnicas de pre-procesamiento digital que permitan elevar la calidad de la clasificación de patrones que tiene lugar en las redes neuronales. Se estudia, por tanto, el efecto de incluir un módulo

extractor de rasgos distintivos de las señales de entrada, para que las RNA respondan a una nueva clase de patrones que no están explícitos en las señales crudas. La Fig. 2.9 muestra una estructura de relevador con ese módulo de pre-procesamiento, denominado extractor de rasgos distintivos (ERD).

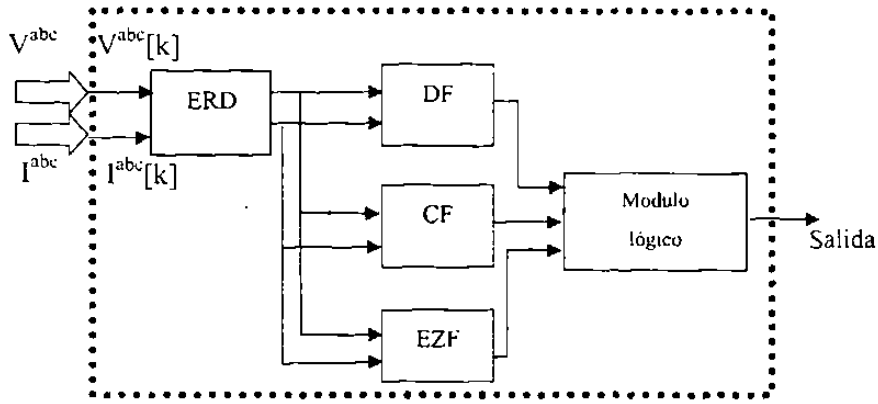

Fig. 2.9 Esquema de un relevador neuronal para protección de líneas de transmisión con extractor de rasgos distintivos (ERD).

El ERD emula la tarea del filtrado digital de las señales de entrada en un relevador de distancia, y tiene como objetivo extraer información de entrada a las RNA, que permite mejorar su proceso de aprendizaje y elevar el desempeño funcional del esquema neuronal. Su función no es estimar fasores, por lo que su ventana de datos puede ser menor de un ciclo sin deterioro en el desempeño.

Es importante establecer que, si se aumenta la frecuencia de muestreo se puede disponer de más información de la señal originada por la falla. Por otro lado, la reducción de la longitud de la ventana de datos no permite utilizar fasores. Un objetivo de este proyecto consiste en diseñar un ERD partiendo de las características de las formas de ondas iniciales y del análisis de los patrones de alta frecuencia que pueden ser útiles para caracterizar las fallas.

En la literatura especializada no existe un reporte que muestre reglas para establecer una estructura de RNA que integre todas las tareas encomendadas para una protección de distancia. Los distintos autores de artículos han perfeccionado el diseño de las RNA a medida que adquieren mayor experiencia en el problema. En esta tesis se

propone una metodología para definir la topología de RNA que cumpla con las restricciones de velocidad y confiabilidad de la protección de líneas de transmisión.

2.7 Conclusiones del capítulo

En este capítulo se presentaron los problemas típicos de los relevadores de distancia y de onda viajera. Los relevadores de distancia tienen parámetros de ajuste fijos, lo que dificulta cumplir con los requerimientos de protección en condiciones de operación variable en el SEP. Una solución a este problema es la implementación de una lógica inherentemente adaptiva basada en la utilización de las RNA [**53**].

Se hizo una revisión de las técnicas de procesamiento de señales de los relevadores digitales de distancia y de onda viajera. Con ese estudio se estableció la estructura del relevador neuronal a utilizar como elemento instantáneo (primera zona) de un relevador de distancia. La estructura del relevador neuronal se compone de módulos independientes para las tareas de DF, CF y EZF basados en RNA. Los elementos de respaldo y para otras funciones no son objeto de estudio de esta tesis.

Un aspecto ampliamente criticado a propuestas anteriores ha sido la heurística que se aplica para definir la estructura de las RNA y, en general, para implementar los distintos algoritmos del relevador. Para los principios tradicionales existen procedimientos de diseño bien definidos y hay técnicas para el análisis de su operación, utilizando el plano complejo impedancia, el plano alfa u otros [**10**]. En esta área no se ha llegado a ese punto, pero se hace referencia a resultados y conceptos reportados en trabajos anteriores. En el Capítulo 5 se presenta la base teórica desarrollada, con la intención de reducir el grado de heurística en el diseño del relevador.

Una vez incorporada una red de neuronas con las características apropiadas, de manera implícita ésta podrá emular la función que hace una protección adaptiva, ya sea realizando ajustes a los parámetros en la presencia de condiciones de operación no comunes en la red o demorando la acción de disparo en aquellas situaciones donde conviene confirmar el origen de la falla.

CAPÍTULO III

SIMULACIÓN DE SEÑALES PARA PROTECCIÓN DE ULTRA-ALTA VELOCIDAD

3.1 Introducción

Las líneas de transmisión son sistemas diseñados para transmitir señales de potencia eléctrica a frecuencia fundamental. Por sus dimensiones físicas y su exposición al medio ambiente, son los elementos del SEP más expuestos a ocurrencias de fallas. Cada una de las fallas que se presentan en la línea tiene un carácter determinístico, pero el conjunto de las distintas fallas para un relevador toma un carácter aleatorio.

En el presente capítulo se describe un procedimiento para desarrollar un simulador digital, que permita generar las señales de entrenamiento y prueba de los algoritmos de un relevador neuronal. También se explica el mecanismo de propagación de ondas viajeras (OV) en una línea polifásica, con el objetivo de establecer rasgos distintivos en las señales y posteriormente utilizar esa información en el entrenamiento de las RNA. El programa de simulación digital consiste en calcular las variables eléctricas solucionando las ecuaciones de la red con una técnica del dominio de la frecuencia en que se aplica la Teoría Modal, la Transformada Numérica de Laplace y el Principio de Superposición. Se comenta el estado en que se encuentra esta línea de investigación y los aspectos que permitieron desarrollar un programa de simulación de propósito particular.

3.2 Señales propagadas en el sistema protegido

Un fenómeno transitorio es la transición de un estado estable a otro. Las variables eléctricas de la frecuencia fundamental experimentan una distorsión que concluye solo si el SEP logra establecerse en otro estado estable. La transición no ocurre de manera

inmediata; el proceso puede tener una duración comprendida entre los microsegundos y minutos.

Para observar la dinámica de las variables en una simulación digital, se requiere establecer los modelos de los elementos en estudio e integrarlos a un sistema de ecuaciones congruente con los tiempos de respuesta que se desea observar. Asimismo, se requiere controlar el ruido numérico asociados a su solución. La Tabla 3.1 muestra las categorías que propone CIGRE [**102**], para separar los disturbios en un SEP con relacion a sus intervalos de frecuencia. Esta clasificación de transitorios es tomada en cuenta en el proceso de reconocimiento de patrones del relevador neuronal, en particular cuando se hace la formación del banco de patrones que implica la utilización de todo tipo de señales transitorias.

TABLA 3.1 INTERVALOS DE FRECUENCIA DE TRANSITORIOS ELÉCTRICOS

	Origen	Intervalo de frecuencias
1	Ferroresonancia en transformadores	0.1 Hz – 1 Khz
2	Cambio súbito de carga	0.1 Hz – 3 Khz
3	Energización de líneas	50 Hz – 20 Khz
4	Recierre de líneas	50 Hz – 20 Khz
5	Fallas en líneas	50 Hz – 20 Khz
6	Voltajes transitorios de recuperación	50 Hz – 20 Khz
7	Reigniciones de arco en interruptores	10 Khz – 1 Mhz
8	Arqueos o descargas en líneas	10 Khz – 3 Mhz
9	Fallas en subestaciones encapsuladas	100 Khz – 50 Mhz.

En un proceso de reconocimiento de patrones se tiene la necesidad de conocer a plenitud el fenómeno físico y los parámetros del sistema. En este trabajo de tesis se pretende elevar la calidad en la clasificación de patrones en base a seguir la estrategia de reconocer los rasgos distintivos de las señales. En la Tabla 3.1 puede observarse que, a pesar de la separación, existe un traslape entre espectros de frecuencia de distintos

eventos. Por ello, la mayoría de los programas de simulación están sujetos a una representación de elementos que es sólo válida dentro de un intervalo de frecuencia. En caso de salirse de ese intervalo, el programa tiene errores. La Tabla 3.2 señala la importancia de utilizar un modelo de parámetros distribuidos y dependientes de la frecuencia para la simulación de maniobras o fallas en líneas.

TABLA 3.2 CLASIFICACIÓN DE TRANSITORIOS EN SISTEMAS DE POTENCIA SEGÚN SUS INTERVALOS DE FRECUENCIA

Grupo	Transitorios	Banda de frecuencia	Modelación con parámetros dependientes de la frecuencia
I	Lentos	0.1 – 3 KHz	No se requiere
II	Maniobras o fallas en líneas	50 Hz – 20 KHz	Muy importante
III	Rápidos (descargas atmosféricas)	10 KHz – 3 MHz	Algo importante
IV	Ultra-rápidos	100 KHz -50 MHz	No se requiere

Los programas de análisis transitorio del dominio del tiempo, tales como el EMTP, ATP o EMTDC, se han utilizado tradicionalmente para simular todos esos problemas. Los modelos de elementos han sido desarrollados para satisfacer las escalas a las que hacen referencia las Tablas 3.1 y 3.2. La condición necesaria para que las señales numéricas de salida de los programas se consideren igual a las analógicas reales, es utilizar técnicas de integración con pasos de integración que cumplan el criterio de Nyquist [37,71]:.

$$\Delta t \leq \frac{1}{2f_{max}} \tag{3.1}$$

donde f_{max} es la máxima componente de frecuencia expresada en el proceso transitorio simulado. Un aspecto importante en la representación de elementos, es la influencia de la frecuencia sobre los parámetros de los elementos, a la que hace referencia la última columna de la Tabla 3.2. Note que en particular los transitorios del Grupo II requieren tomar en consideración ese efecto. Los modelos de líneas aéreas para simulación de ondas viajeras con dependencia frecuencial están dentro del estado del arte de esa área de

investigación. En los programas EMTP, EMTDC y ATP aún se manejan modelos de línea con dependencia frecuencial a nivel de prototipo [48,84]. Ese fenómeno se manifiesta por cambiar las velocidades de propagación de las ondas viajeras, lo cual puede afectar la operación de los algoritmos de protección de ultra-alta velocidad.

En este capítulo se da a conocer el modelo de generación de señales para diseño de los algoritmos neuronales. Se desarrolla un simulador digital que reproduce fenómenos electromagnéticos en líneas aéreas de EHV/UHV originados por maniobras de interruptores o por fallas. Se utilizan otros programas ya existentes para generar señales representativas de otros procesos transitorios, tales como oscilaciones de potencia, fallas en transformadores, etc.

3.3 Procedimiento de cálculo

En su estado estable, el SEP opera con señales periódicas y continuas en tiempo. Ese tipo de señales crea un espectro de tipo discreto con escasas frecuencias amónicas múltiplos de la fundamental (ω_0) (Fig. 3.1a). Dependiendo del disturbio que se presente en el SEP (ver Tabla 3.1), aparecen nuevas frecuencias, haciendo que el espectro se haga continuo, tal y como se observa en la Fig. 3.1b.

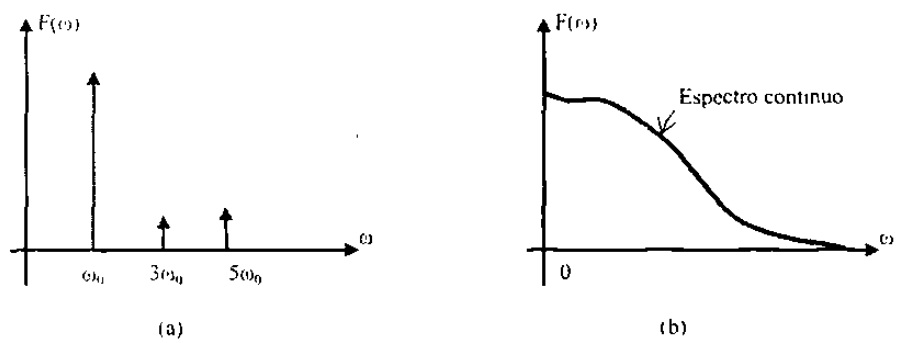

Fig. 3.1 a) Espectro de una señal en estado estable y b) Espectro de una señal transitoria.

El procedimiento de cálculo de un programa de simulación digital basado en técnicas del dominio de la frecuencia consiste en la superposición de soluciones en estado estable correspondientes a las frecuencias de propagación observadas en el espectro [66]:

$$f(t) = k_1 \exp^{i\omega_1 t} + k_2 \exp^{i\omega_2 t} + \ldots\ldots + k_x \exp^{i\omega_x t} + \ldots\infty \tag{3.2}$$

Antes de la superposición de respuestas individuales, es necesario obtener una representación de la red para cada frecuencia, y posteriormente aplicar una transformación inversa para reconstruir la señal en el dominio del tiempo. A continuación se describe el proceso de cálculo de las OV con la aplicación de una técnica del dominio de la frecuencia. Se hace énfasis especial en dos aspectos: a) el modelo de línea polifásico como función de la frecuencia y b) la forma en que son resueltas las ecuaciones de la red con la Transformada Numérica de Laplace.

3.3.1 Modelo de línea en el dominio del tiempo

En [84] se presenta la deducción completa de las ecuaciones del Telegrafista de una línea monofásica. Para llegar a las ecuaciones (3.3) y (3.4), se aplican las leyes de Maxwell considerando inicialmente que se tienen materiales con propiedades lineales y que se propagan únicamente señales de tipo sinusoidal [**68**]. Después se hace un análisis de la distribución de campos eléctrico y magnético para considerar los parámetros que representan las pérdidas. Luego de la inclusión de las pérdidas se llega al modelo de línea monofásica:

$$-\frac{\partial V}{\partial x} = L\frac{\partial I}{\partial t} + R\,I \tag{3.3}$$

$$-\frac{\partial I}{\partial x} = C\frac{\partial V}{\partial t} + GV \tag{3.4}$$

donde R es la resistencia serie que considera las pérdidas de un conductor imperfecto, y G es la conductancia paralelo que toma en cuenta las pérdidas del dieléctrico. Los parámetros L y C están dados en por unidad de longitud e incluyen efectos de penetración de campos.

Las ecuaciones de línea del caso polifásico manejan matrices con los parámetros de la línea en vez de los valores escalares de la línea monofásica. La matriz de impedancias de un sistema polifásico se forma con la suma de tres matrices: a) matriz de

impedancias geométricas (Z_g), b) matriz de impedancias internas de los conductores (Z_c) y c) matriz de impedancias a tierra (Z_t)

En el cálculo de los elementos mutuos de la matriz de tierra se emplea el método de las imágenes generalizado utilizando los procedimientos de Wedepohl [96] y de Dubanton [39].

Para los estudios de propagación se utiliza una representación matricial donde los elementos propios y mutuos son calculados suponiendo líneas uniformes con relación a la longitud, es decir, se utiliza la altura promedio y conductores con diámetro constante. También se supone que el suelo y los conductores tienen una resistividad uniforme. Otra simplificación consiste en despreciar la conductancia entre conductores, G. Así, se llega a las ecuaciones modificadas del Telegrafista de la línea polifásica:

$$-\frac{\partial}{\partial z}V = L\frac{\partial}{\partial t}I + R\,I \tag{3.5}$$

$$-\frac{\partial}{\partial z}I = C\frac{\partial}{\partial t}V \tag{3.6}$$

Las matrices R, L y C, son cuadradas y de dimensiones iguales al número de conductores en el sistema polifásico, incluyendo los hilos de guarda y los conductores en Haz. Inicialmente hay n elementos con componentes propias y n-1 componentes mutuas. Los hilos de guarda y los conductores en haz son excluidos después con un proceso de eliminación [95].

3.3.2 Ecuaciones de línea en el dominio de la frecuencia

Otro camino de solución es obtener las ecuaciones en el dominio de la frecuencia. La forma que toman las ecuaciones (3.3) y (3.4) después de aplicarles la Transformada de Laplace es:

$$-\frac{dV(s)}{dz} = Z\,I(s) \tag{3.7}$$

$$-\frac{dI(s)}{dz} = Y\,V(s) \tag{3.8}$$

donde Z es la matriz de impedancias serie por unidad de longitud calculada para cada frecuencia, y formada por las tres matrices antes mencionadas:

$$Z = Z_g + Z_c + Z_t \tag{3.9}$$

siendo $Z_g = j\omega\frac{\mu}{2\pi}P$. P es la matriz de coeficientes de potencial de Maxwell [**54**]. La admitancia en derivación por unidad de longitud está dada por:

$$Y = j\omega(2\pi)P^{-1} \tag{3.10}$$

Derivando con respecto a la distancia y combinando las ecuaciones (3.7) y (3.8), se llega a una representación en función de una sola variable:

$$\frac{d^2V(s)}{dz^2} = Z\ Y\ V(s) \tag{3.11}$$

$$\frac{d^2I(s)}{dz^2} = Y\ Z\ I(s) \tag{3.12}$$

3.3.3 Propagación modal en líneas de transmisión aéreas

Las ecuaciones (3.11) y (3.12) son ecuaciones diferenciales ordinarias, lineales, de segundo orden y homogéneas. El tipo de solución de estas ecuaciones se muestra en la Fig. 3.2. Para el caso monofásico se tiene una solución del tipo:

$$V(z) = \exp(-\varphi\ z)C_1 + \exp(\varphi\ z)C_2 \tag{3.13}$$

Despejando de (3.8), se tiene la solución para las corrientes:

$$I(z) = Z^{-1}Y\left[\ \exp(-\varphi\ z)C_1 - \exp(\varphi\ z)C_2\ \right] \tag{3.14}$$

Siendo: $\varphi \equiv \sqrt{Z\ Y}$. Cuando se estudia el caso polifásico se presenta la dificultad de que se tienen matrices en la formulación y la matriz φ no es diagonal. Ese problema se resuelve mediante la obtención de funciones de matrices, efectuando un análisis de valores propios y vectores propios. Con fines de diagonalizar dicha matriz, se hacen cambios de base para V e I.

$$V = MV_m \tag{3.15}$$

$$I = NI_m \tag{3.16}$$

La matriz M diagonaliza el producto ZY y N diagonaliza al producto YZ. Sustituyendo estas matrices se tiene una representación matricial equivalente:

$$\frac{d^2}{dz^2}V_m = M^{-1}(ZY).MV_m \tag{3.17}$$

$$\frac{d^2}{dz^2}I_m = N^{-1}(YZ).NI_m \tag{3.18}$$

Se diagonalizan los productos matriciales para poder aplicar las funciones exponenciales a cada uno de los valores propios. En esa descomposición de matrices está basada la teoría modal desarrollada por Wedepohl [96], donde se factoriza un producto de matrices en la forma:

$$Z\ Y = M\ \Lambda\ M^{-1} \tag{3.19}$$

Las raíces de los valores propios de la matriz de propagación Λ representan las constantes de propagación respectivas de voltajes, y tienen la forma:

$$\gamma_i = \alpha_i + j\beta_i \tag{3.20}$$

donde α es la constante de atenuación del *i-ésimo* modo de voltaje, y β es la constante de fase de dicho modo.

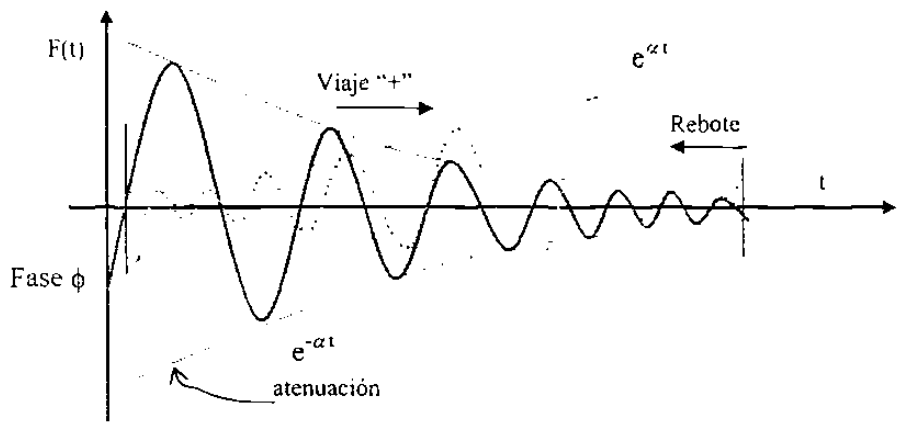

Fig. 3.2 Interpretación de la solución a la ecuación de segundo orden.

Con esta técnica se obtiene la simulación del transitorio como resultado de la superposición de todas las distintas frecuencias. Esto permite establecer que el tipo de formas de onda de la Fig. 3.2 forma la base o soporte de la forma de onda que procesa un relevador a su entrada. Un tópico posteriormente investigado en esta tesis, es la definición de una base de funciones (*onduleta madre*) que pudiera adecuarse para caracterizar la forma de onda que se observa dentro de la ventana de datos que recibe el relevador. Se pueden apreciar en la Fig. 3.2 los rasgos distintivos de la atenuación y la velocidad de propagación. El relevador de onda viajera de distancia requiere del cálculo exacto de la distancia que recorre la OV sobre la línea protegida, y ese dato se calcula de (3.20).

Por otro lado, la matriz M agrupa los vectores propios (también llamados modos de propagación) del sistema de transmisión. Pasar al dominio modal equivale a utilizar redes de secuencia, lo que permite describir la forma en que se transfiere la información entre las terminales de una línea polifásica, de tal manera que en la propagación no se tienen influencias de otras fases. Esta propiedad se manifiesta en la expresión:

$$\frac{d^2}{dz^2}\begin{bmatrix} Vm_1 \\ Vm_2 \\ . \\ Vm_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1 Vm_1 \\ \lambda_2 Vm_2 \\ . \\ \lambda_n Vm_n \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

La Fig. 3.3 ilustra la forma en que se propaga una señal en un *i-ésimo* modo de un sistema polifásico de n conductores **[96]**. Nótese en (3.21) el desacoplamiento para las fases, que equivale a tener n líneas monofásicas independientes, y en donde las señales preservan sus n modos de propagación en ambas fronteras de la línea, siendo solo afectadas por la constante de comunicación λ.

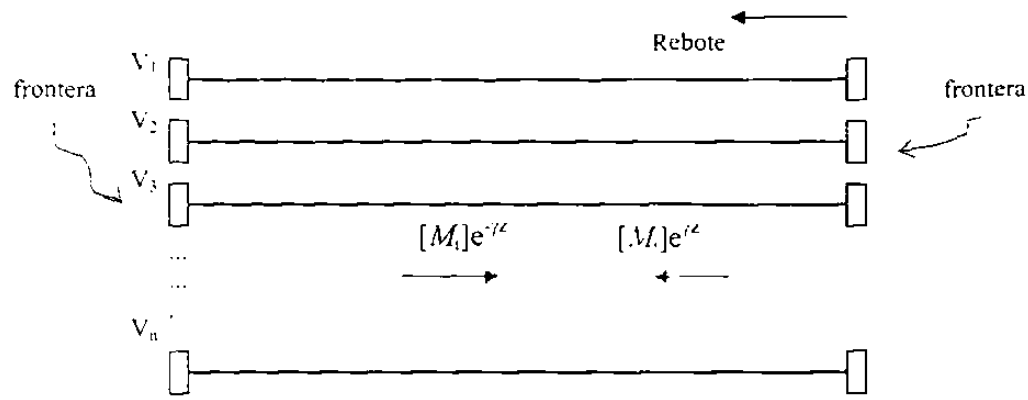

Fig. 3.3 Propagación modal de una señal en una línea de transmisión polifásica.

Una vez realizadas las operaciones en el dominio modal, para regresar al dominio de las fases se requiere superponer las componentes de cada modo en la forma:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{21} \\ \cdot \\ M_{n1} \end{bmatrix} Vm_1(z) = e^{-\gamma z} \begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{21} \\ \cdot \\ M_{n1} \end{bmatrix} C_{m1} + e^{\gamma z} \begin{bmatrix} M_{11} \\ M_{21} \\ \cdot \\ M_{n1} \end{bmatrix} C_{m2} \qquad (3.22)$$

Por lo general, los productos matriciales YZ y YZ no resultan iguales, y no comparten los mismos vectores propios. Sin embargo, la ecuación de las corrientes se resuelve con un proceso similar al anterior **[66,95]**.

3.3.4 Evaluación de las matrices modales

Se ha mostrado con apoyo de la Fig. 3.3 una forma efectiva de desacoplar las señales que se propagan por la línea. En este desarrollo se propone la aplicación de los modos naturales de propagación como base de diseño de los elementos clasificadores de fallas. En la Fig. 3.4 se muestran los valores calculados para los modos de una línea trifásica con cierta configuración de torre. Se observan los valores de ambos modos de V e I, y el carácter tridimensional que se observa en la figura se debe al intervalo de frecuencias aplicadas para el cálculo de esos valores.

Se puede observar que con relación a la frecuencia, los valores de los modos naturales no cambian substancialmente de valor. Como este desacoplamiento es el

correspondiente a la línea protegida, es una alternativa posible para desacoplar las señales transitorias.

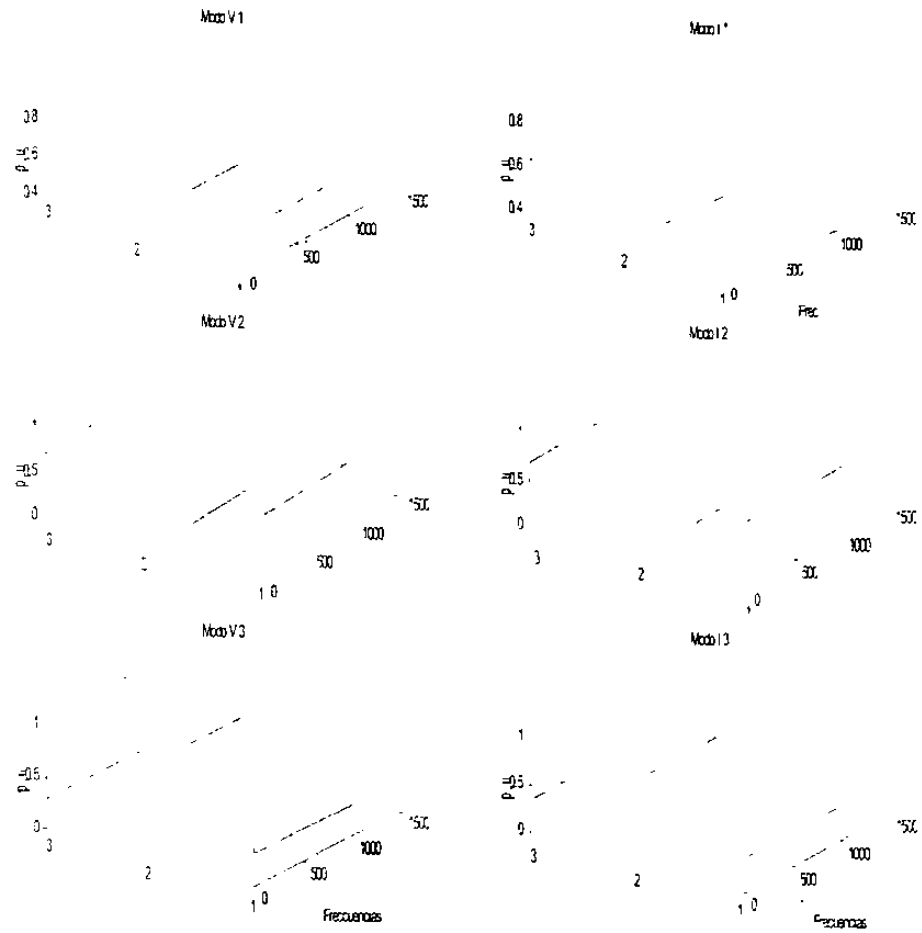

Fig. 3.4 Comportamiento de los modos de propagación con relación al cambio de frecuencia.

3.3.5 Representación de dos puertos de líneas de transmisión

La solución de las ecuaciones (3.13) y (3.14) al ser evaluadas en las fronteras de la línea conduce a las representaciones de dos puertos de una línea homogénea [95]. Como ejemplo, considérese un segmento de línea de longitud l (ver Fig. 3.5). Al evaluar en z=0, se tiene:

$$\begin{bmatrix} v(0) \\ i(0) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 & k_2 \\ -y_c k_1 & y_c k_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix} \tag{3.23}$$

donde k_1 y k_2 son constantes resultantes de evaluar las funciones exponenciales en su frontera. Las constantes de la ecuación son:

$$c_1 = \frac{v(0)}{2k_1 k_2} - \frac{i(0)}{2y_c k_1 k_2} \tag{3.24}$$

$$c_2 = \frac{v(0)}{2k_1 k_2} + \frac{i(0)}{2y_c k_1 k_2} \tag{3.25}$$

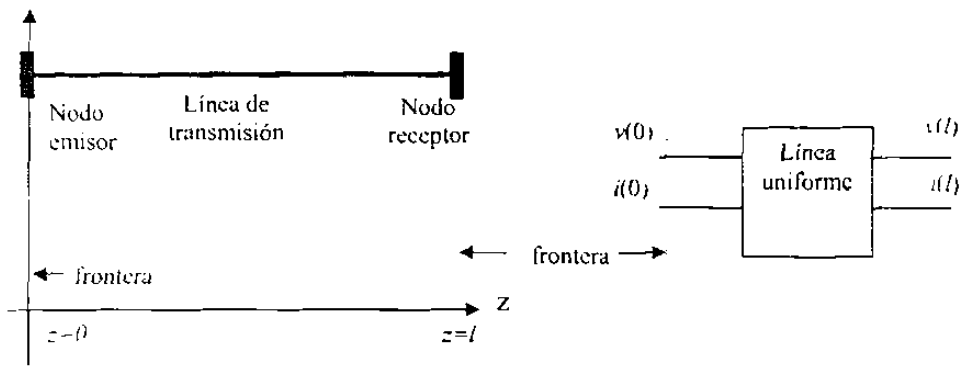

Fig. 3.5 Representación de dos puertos de una línea.

Cuando z es igual a la longitud de la línea, la solución es:

$$\begin{bmatrix} v(l) \\ i(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cosh(\gamma l) & -Z_c Senh(\gamma l) \\ -Senh(\gamma l) & Cosh(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dfrac{v(z)}{k_1 k_2} \\ \dfrac{i(z)}{k_1 k_2} \end{bmatrix} \tag{3.26}$$

Sustituyendo y reagrupando términos, se llega a la representación nodal:

$$\begin{bmatrix} i(0) \\ i(l) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_c Coth(\gamma l) & -y_c Cosch(\gamma l) \\ -y_c Cosch(\gamma l) & y_c Coth(\gamma l) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v(0) \\ v(l) \end{bmatrix} \tag{3.27}$$

Esta representación sirve para modelar la línea fallada mediante dos segmentos función cada uno de la distancia a la falla. En la frontera común estará el punto de inserción de una falla interna.

3.3.6 Representación de las fallas en el dominio de la frecuencia

El principio de superposición es comúnmente aplicado para calcular las corrientes de falla por un análisis circuital. A continuación se analiza una falla de esa manera, para deducir el modelo de falla del programa de simulación digital.

Considere la red monofásica de la Fig. 3.6, donde una falla es aplicada a la línea a una distancia m con respecto a la barra de la fuente de la izquierda. La red de pre-falla tiene voltajes E_a y E_b, y circula una corriente:

$$I_{pf} = \frac{E_a - E_b}{Z_{ga} + Z_l + Z_{gb}} \tag{3.28}$$

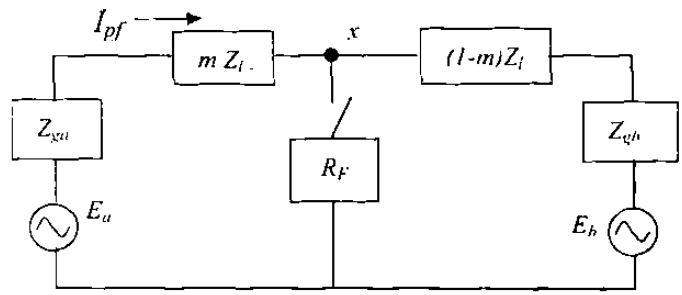

Fig. 3.6 Representación de una falla en una línea monofásica.

El voltaje de Thevenin en el punto de falla es:

$$E_x = E_a - (m\,Z_l + Z_{ga})I_{pf} \tag{3.29}$$

Los voltajes y corrientes del estado de falla se obtienen trabajando con la red de falla. El problema se resuelve con la superposición de los estados de prefalla y de falla.

En la Fig. 3.7 se ilustra que la falla equivale a una inyección de un fasor de corriente en el punto de falla, con un sentido opuesto y en serie con la resistencia de falla R_F. La ecuación (3.30) representa el modelo de inyección de corriente, y representa la variable en el instante de ocurrencia de la falla (T_{of}):

$$I_F(s) = \mathrm{T}\{\ R_F^{-1}E_x \sin(2\pi f_0 t + \angle E_x)\ U(t - T_{of})\ \} \tag{3.30}$$

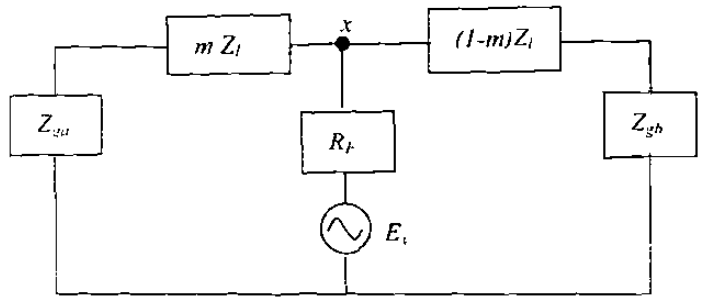

Fig. 3.7 Circuito equivalente de la red de falla.

En la Fig. 3.8 se muestra el modelo genérico de la falla para los distintos tipos de falla en un sistema trifásico. Una vez que se especifica el tipo de falla, se crea la conectividad requerida y la matriz resultante se lleva a una formulación nodal trifásica.

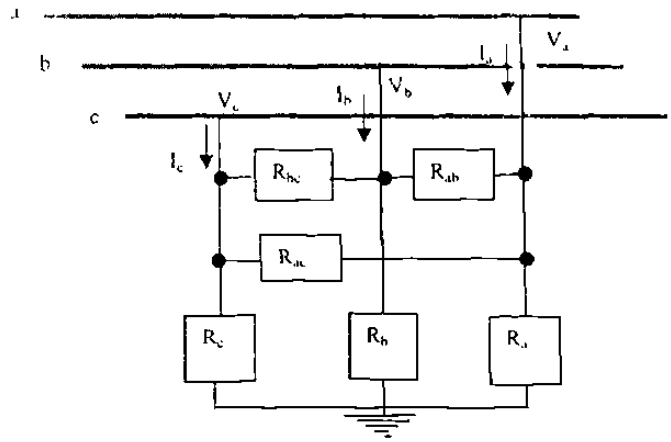

Fig. 3.8 Modelo genérico de una falla.

La investigación de este problema dio como resultado el desarrollo de un modelo para simular fallas con arco eléctrico. El problema radica en que la resistencia del arco es función de otras variables, entre ellas el voltaje. En ese caso la impedancia de falla es una función que al llevarse al dominio de la frecuencia, da lugar a una operación de convolución. En [76] se dan a conocer los rasgos distintivos que se utilizan posteriormente en el proceso de clasificación de patrones del relevador. Para la formulación se utiliza también una inyección de corriente que resulta de la convolución del voltaje de prefalla y una función que emula el lazo de histéresis de un arco eléctrico

(Fig. 3.9a). La Fig. 3.9b muestra el tipo de función propuesta para representar un arco eléctrico [25].

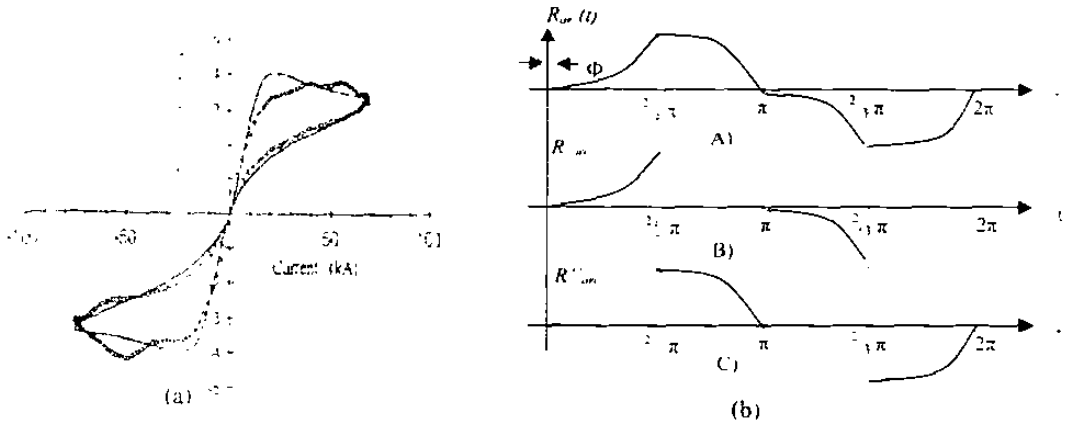

Fig. 3.9 Aproximación del modelo de arco eléctrico.

En este caso se considera que la corriente inyectada se conserva en fase con el voltaje. Se recurre a funciones compuerta y al principio de superposición para construir la señal de la Fig. 3.9b; así, se llega a la corriente de falla que se inyecta por la fase fallada:

$$I_F^{ph}(S) = \left[\frac{\omega\cos(\Phi) + s\sin(\Phi)}{S^2 + \omega^2} \right] \otimes \left[R'_{arc}(s) + R''_{arc}(s) \right] e^{-sT_f} \tag{3.31}$$

donde $\otimes$ denota una convolución circular, ω es la frecuencia fundamental y Φ es la fase del voltaje y de la función con que se representa al arco. El ángulo de inserción de la falla se maneja con una función causal desplazada en el tiempo T_f. Además de la inyección de corriente, se inserta una matriz de impedancia en derivación en el punto de falla.

3.3.7 Modelo de interruptores

Los interruptores se representan mediante una inyección de corriente en el dominio de Laplace. Esta corriente se inyecta en el instante en que ocurre la apertura o cierre del interruptor. La corriente tiene la misma forma de onda de la fuente, pero en

antifase y truncada por una función escalón, desplegada hasta el instante de cierre o apertura del interruptor:

$$I_{cu}(S) = \left(\frac{\omega \cos\Phi + S\ sen\Phi}{S^2 + \omega^2} \right) e^{-S t_i} \tag{3.32}$$

donde Φ es el ángulo de inserción de falla. Una maniobra trifásica ideal de interruptor implica un corrimiento de ángulo de 120° entre las tres fases. Los cierres secuenciales se manejan con ángulos diferentes.

3.4 Representación de la red de transmisión

Se han descrito modelos de elementos del sistema de potencia para una formulación nodal. El modelo de dos puertos de las líneas de transmisión se maneja de manera desacoplada con respecto a las fases mediante la aplicación de la teoría modal y también desacoplada con respecto a la frecuencia. Los elementos activos (fuentes del SEP) son representados con equivalentes Norton. Las fallas o maniobras de interruptores se representan como una inyecciones de corrientes por fase. A manera de ilustración, considere el diagrama unifilar de la Fig. 3.10, donde una falla está presente en una línea a una distancia x.

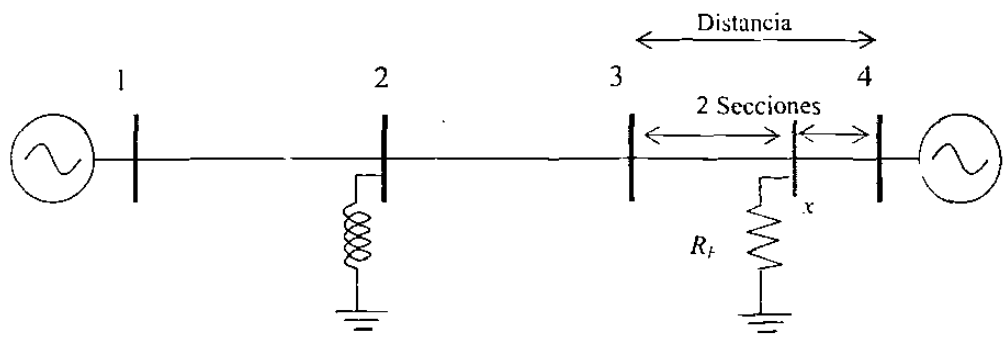

Fig. 3.10 Sistema de transmisión de prueba.

La red forma un sistema de ecuaciones de la forma (3.33). Esa notación se cumple para el caso polifásico, considerando que los elementos son sub-matrices.

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & B_{12} & & & \\ B_{12} & Y_{22} & B_{23} & & \\ & B_{23} & Y_{33} & B_{3x} & \\ & & B_{3x} & Y_{44} & B_{4x} \\ & & & B_{4x} & Y_{xx}+R_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_F \end{bmatrix} \tag{3.33}$$

B_{ij} son las admitancias mutuas entre nodos. Las Y_{ii} de la diagonal son las admitancias propias de los nodos. Se adiciona un nodo para incluir la condición de falla interna en la línea. En ese nodo ficticio x se conecta la resistencia de falla (R_F) y se inyecta la corriente de falla. Con esta representación de red, el fenómeno de dependencia frecuencial de los parámetros de la línea es inherentemente tomado en cuenta al solucionar las ecuaciones de línea en el dominio de la frecuencia [**95**].

En la Sección 3.3 se comentó que el procedimiento de cálculo de los procesos transitorios en el dominio de la frecuencia se basa en resolver un sistema de ecuaciones como (3.33) para cada una de las frecuencias de propagación, y en superponer todas esas respuestas. Se puede ver en la Tabla 3.1 que los cortocircuitos tienen un intervalo de frecuencias que va desde la frecuencia fundamental hasta aproximadamente 20 kHz. Por ello es necesario utilizar técnicas computacionales eficientes [**67**].

Esta formulación permite manejar valores específicos para cada una de las variables aleatorias: resistencia de la falla, distancia a la falla, ángulo de carga inicial, e instante de ocurrencia de falla. Ello prueba que cada falla se trata con un carácter totalmente determinístico. De esa manera es posible simular condiciones de falla consideradas como críticas para un relevador. Esto se hace en el Capítulo 5.

3.5 Transformada numérica de Laplace

En el dominio de Laplace, si un sistema tiene función de transferencia $H(S)$, y se le excita con una señal cuya transformada es I_e(S), la salida es:

$$V_s(S) = H(S)\, I_e(S) \tag{3.34}$$

El resultado de esa multiplicación en la frecuencia se regresa al dominio del tiempo mediante una transformación inversa [**66**].

En la práctica resulta difícil hacer el cálculo analítico las transformadas directa e inversa de Laplace. Las ecuaciones de análisis y síntesis de Laplace son entonces resueltas por aproximación numérica de la siguiente forma [97]:

$$F_m = \Delta t \sum_{n=0}^{N-1} f_n e^{-cn\Delta t} e^{-jmn\Delta\omega} \qquad m = 0,1,2.....N-1 \quad (3.35)$$

$$f_m = e^{cn\Delta t} \frac{\Delta\omega}{2\pi} \sum_{m=1}^{N-1} F_m \sigma_m e^{jmn\Delta\omega\Delta t} \qquad n = 0,1,2.....N-1 \quad (3.36)$$

donde: $f_n \approx f(n\ \Delta t)$, $f_m = f(m\ \Delta\omega)$, $\sigma_m \approx \sigma(m\ \Delta\omega)$. Δt y $\Delta\omega$ son los pasos de integración numérica. Las sumatorias en una computadora implican un número finito N de operaciones. El truncamiento del espectro de la señal transitoria da a lugar a un error conocido como fenómeno de *Gibbs*. La manera de controlar ese efecto consiste en introducir la ventana de peso σ. En **[66,67]** se dan detalles del manejo de esas ventanas.

Adicionalmente, la discretización de la ecuación (3.36), provoca el fenómeno de "*aliasing*" en el tiempo. La constante c de la variable S de Laplace es un coeficiente de amortiguamiento aplicado sobre $f(t)$ que se utiliza para disminuir dicho error **[66]**. En este trabajo se recurre a utilizar el criterio de Wedepohl para definir el valor de c. Ambas transformadas discretas son codificadas con apoyo del algoritmo de transformada rápida de Fourier. La implementación se ha reportado en **[95]**. En general, estas técnicas mejoran sustancialmente la exactitud de las simulaciones obtenidas con relación a los métodos de integración numérica.

3.6 Análisis de un sistema de prueba

A continuación se muestran resultados de un ejemplo de aplicación. Las simulaciones son obtenidas con un programa desarrollado con la metodología presentada e implementado en el ambiente de MATLAB. La información de entrada requerida en el programa de simulación es la configuración geométrica de las líneas de transmisión y las condiciones de estado estable de la red. La Fig. 3.11 muestra la configuración de la torre que se utiliza para el cálculo de los parámetros de la línea.

0131316

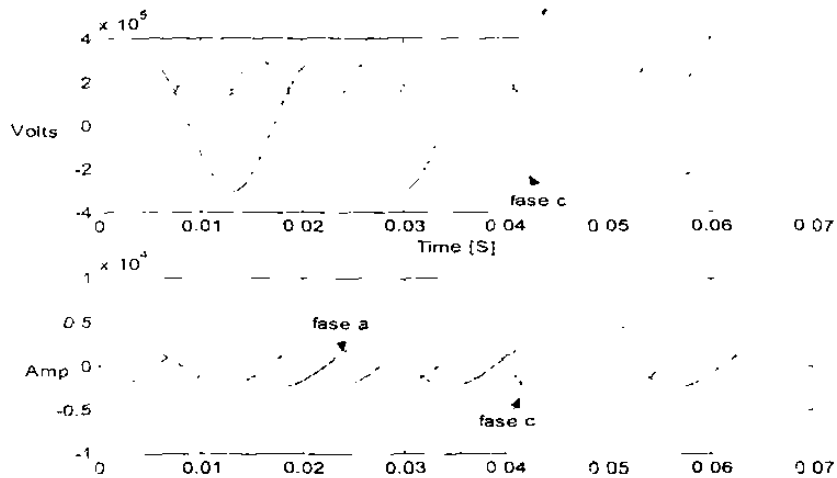

Fig. 3.12 Señales transitorias resultantes de una falla monofásica.

Con el fin de reconocer rasgos distintivos, fueron calculadas las velocidades de propagación de las OV para las condiciones dadas. La Fig. 3.13 muestra las atenuaciones y velocidades correspondientes a los tres modos de propagación del sistema de transmisión. Como se tiene una falla a tierra, se puede notar la presencia de una señal que se propaga por el modo de tierra; este es un rasgo distintivo que caracteriza las fallas monofásicas y bifásicas a tierra.

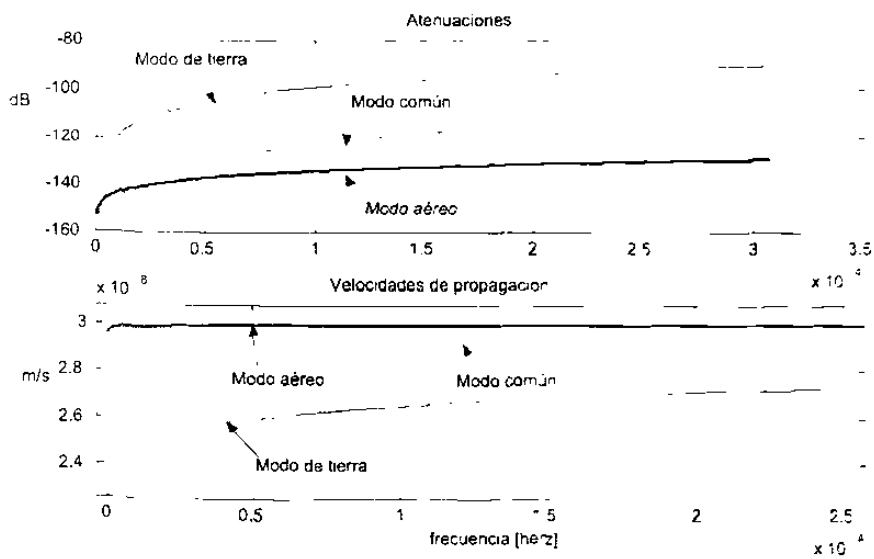

Fig. 3.13 Atenuaciones y velocidades del sistema de transmisión.

En esta tesis se hizo el análisis de las reflexiones de las ondas viajeras con el fin de reconocer otros rasgos distintivos para utilizarlos como base discriminativa de fallas dentro o fuera de la zona de protección. En la Fig. 3.14 se muestra el efecto de variar la resistencia de falla. Se superponen las simulaciones para los valores de R_F= 0.1,10,20 y 50 ohms .Se considera que la falla se aplica en un mismo punto de la línea y se hace la inserción de la falla para un mismo instante. Con el fin de visualizar la información que origina la falla, se ha eliminado la información de prefalla [74]. En la figura se pueden observar los frentes de onda que se propagan por la línea a la velocidad dada anteriormente, y cierta distorsión. En estas pruebas de sensibilidad, se observa el rasgo de valor pico del voltaje y corriente como función de la relación entre voltaje de prefalla y R_F. Al eliminar las componentes de prefalla, lo que se tiene a la entrada del relevador es una combinación de las ondas viajeras y la componente aperiódica exponencial.

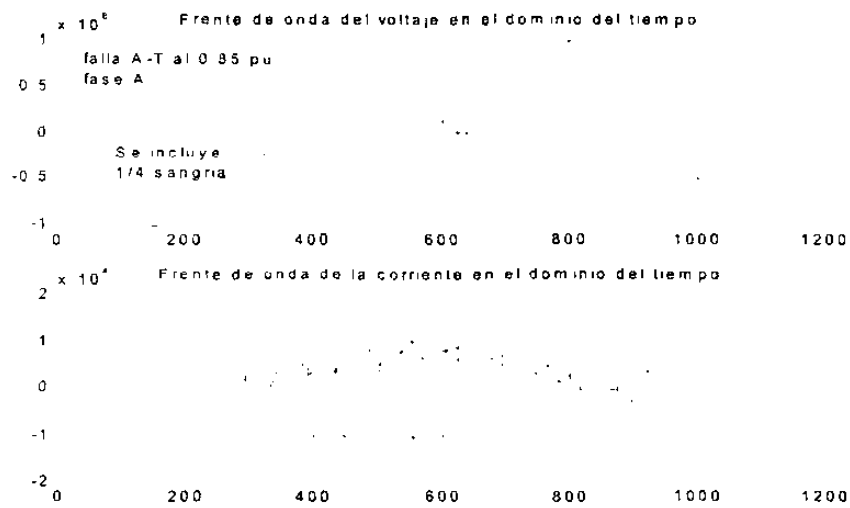

Fig. 3.14 Efecto de la variación de la resistencia de falla.

La siguiente simulación presentada es una falla con arco eléctrico. En la simulación se utiliza el modelo de arco desarrollado en este trabajo [76]. La Fig. 3.15 muestra las formas de onda de los voltajes y corriente que se propagan por la línea fallada. La simulación se hace con los siguientes parámetros: ángulo de potencia de 25 grados, distancia a la falla de 75%, arco eléctrico en la fase a, con un ángulo de inserción

de 122 grados después del cruce por cero de la onda de voltaje. El valor pico de la función de resistencia de arco es de 40 ohms.

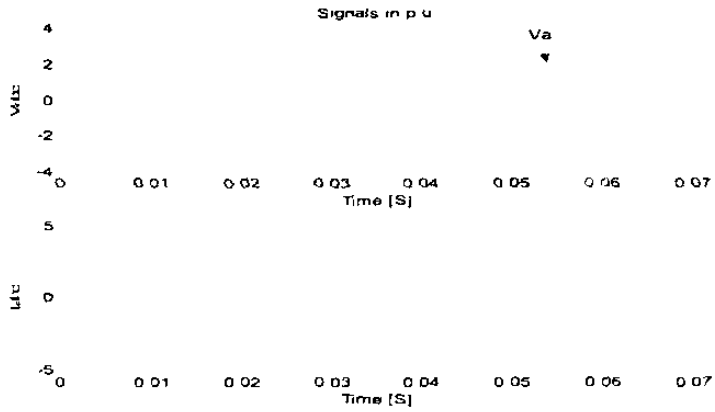

Fig. 3.15 Formas de onda de una falla con arco eléctrico.

En [74,95] se presentan resultados de aplicación con mayor grado de detalle. La ventana indicada en la Fig. 3.15 contiene la información que se introduce al relevador neuronal. Los rasgos distintivos contenidos en esas señales son un aspecto que se estudia con mayor nivel de profundidad en el capítulo siguiente. El programa de simulación ha sido desarrollado principalmente para fines de simular fallas complejas a fin de diseñar los algoritmos de protección neuronal. Otras simulaciones son mostradas posteriormente, así como su análisis en el dominio de la frecuencia. También se muestran otras señales para prueba de los prototipos de relevador neuronal en el Capítulo 6

3.7 Conclusiones del capítulo

En el área de diseño de relevadores se han utilizado simuladores digitales del dominio del tiempo como alternativas de generación de las señales primarias del SEP. En este capítulo se describió un programa elaborado con el propósito específico de reproducir las formas de onda que se utilizan para probar relevadores digitales. Para desarrollar el simulador digital se obtuvieron los modelos matemáticos de los elementos del SEP.

Se presentan los modelos de línea de transmisión uniforme para estudios de propagación de ondas viajeras. También se presentan los modelos de fallas con

resistencia constante, fallas con arco eléctrico, e interruptores. Estos modelos se llevan a la formulación nodal que fue resuelta mediante una técnica del dominio de la frecuencia basada en la aplicación de la Transformada Numérica de Laplace, la teoria modal y el principio de superposición.

Se ha descrito la teoría modal con fines de explicar el mecanismo de propagación de las ondas viajeras a través de los sistemas de transmisión polifásicos. Se mostró que los modos naturales de propagación de la línea son una herramienta de análisis importante para reconocer rasgos de las señales y también sirven para producir el desacoplamiento magnético entre fases.

Las señales transitorias de condiciones de falla son calculadas con la técnica del dominio de la frecuencia. De esta forma se logra incluir el efecto de la variación frecuencial en la propagación de las ondas viajeras. También se tienen bajo control el ruido numérico y los valores de las variables aleatorias con que se lleva a cabo la simulación. De esta evaluación se concluye que se cuenta con un programa que produce mejores simulaciones que las que se generan con los programas del dominio del tiempo. Las simulaciones digitales simuladas son entonces la información de entrada para evaluar al prototipo de relevador neuronal.

Más adelante en esta tesis se investiga la definición de la topología de las RNA. Para ello se requiere hacer pruebas de sensitividad, utilizando valores críticos de las variables aleatorias: resistencia de falla, distancia a la falla, tipo de falla, impedancia de fuente y ángulo de inserción de falla. El programa descrito en este capítulo es lo suficientemente versátil para ese propósito. Entonces, como primera aproximación a la solución del problema de clasificación de patrones, se genera información a priori y se reconocen los rasgos distintivos de las señales.

En este capítulo se estableció también un modelo de falla con arco eléctrico. Incluso se desarrollaron otros modelos de elementos no comunes, como son los dispositivos FACTS y limitadores de corriente de falla. Por razón de espacio, no han sido incluidos los modelos en la tesis [77]. Este tipo de fallas aún resulta difícil de detectar por los relevadores tradicionales.

CAPÍTULO IV

ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES PARA UN RELEVADOR NEURONAL

4.1 Introducción

Uno de los aspectos centrales de esta tesis es definir las entradas a aplicar a la RNA para que se ejecuten las funciones de protección de detección de fallas (DF), clasificación de fallas (CF) y estimación de zona de falla (EZF). Las RNA aprenden de dichas entradas que describen la condición de falla o no falla en la línea.

En el presente capítulo se estudian, como primera alternativa de entrada, los valores instantáneos de voltaje y corriente. La Fig. 2.8 mostró el esquema de protección neuronal que no tiene una etapa de *filtrado digital* y que hace directamente el reconocimiento de patrones de las muestras crudas.

Una alternativa para elevar el desempeño de las RNA, es incluir un elemento extractor de rasgos distintivos (ERD) al esquema neuronal (Fig. 2.9). En este capítulo se describen variantes de ERD que se ensayaron para el desarrollo del prototipo de relevador neuronal.

Se muestran discrepancias entre los proceso de clasificación de patrones y de estimación de parámetros. El procedimiento de generación de patrones de señales se podrá aplicar a plataformas de diversa capacidad de procesamiento, pero un objetivo de la tesis es concebir un prototipo y estudiar su desempeño por simulación digital. Entonces se reportan ejemplos de aplicación en dos estructuras convencionales donde se procesan 16 ó 64 muestras por ciclo. Al final se expone una estrategia para formar los bancos de patrones para entrenamiento y diseño topológico de las RNA.

4.2 Procesamiento de señales en un relevador digital

En la Fig. 4.1 se muestran los componentes internos de un relevador digital relacionados con el al acondicionamiento de señales. El proceso se inicia con el paso de las señales analógicas a través de los transductores de voltaje y corriente internos al relevador. Posteriormente se hace el filtrado analógico antialiasing, la conversión análogo-digital, y el filtrado digital. Para este desarrollo se hizo la suposición de contar con transductores con características cercanas a las ideales.

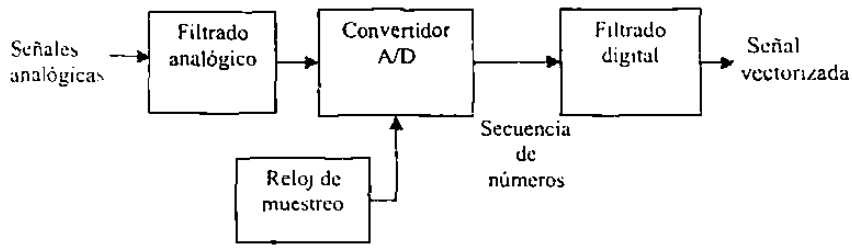

Fig. 4.1 Filtrado de una señal en un relevador de protección.

A continuación se dan a conocer detalles de los modelos utilizados en la simulación del procesamiento de señales que tiene lugar en el relevador.

4.2.1 Filtrado analógico antialiasing (FAA)

El acondicionamiento de señales comienza con la aplicación de un filtrado analógico. Los FAA para el relevador neuronal son del tipo pasabajos con una frecuencia de corte no menor que el doble de la frecuencia de muestreo [71]. Con ello se evita el fenómeno del aliasing.

En la Fig. 4.2 se hace la ilustración de las frecuencias de corte requeridas para evitar el aliasing en relevadores que procesan desde 16 hasta 256 muestras en una ventana de un ciclo de frecuencia fundamental. El número indicado por debajo de las muestras en la ventana, indica la dimensión del *espacio de señales* en que son manipuladas las señales en su formato digital [71]. El aumento de la frecuencia de muestreo permite utilizar más componentes transitorias de alta frecuencia en el relevador, pero ello hace que la palabra digital a procesar adquiera una representación vectorizada de mayor dimensión.