



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**

***“APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA
ARTIFICIAL EN EL CONTROL Y EL EMPLAZAMIENTO DE
DISPOSITIVOS FACTS PARA MITIGACIÓN DE
DEPRESIONES DE VOLTAJE”***

TESIS

**Que para obtener el Título de:
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Presenta:
JULIO CÉSAR SUÁREZ DUARTE**

**Directora de Tesis:
DRA. ELISA ESPINOSA JUÁREZ**

Morelia, Michoacán, diciembre 2011



APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN EL CONTROL Y EMPLAZAMIENTO DE DISPOSITIVOS FACTS PARA MITIGACIÓN DE DEPRESIONES DE VOLTAJE

Los Miembros del Jurado de Examen de Grado aprueban
la Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica de *Julio Cesar Suárez Duarte*

Dr. Juan José Flores Romero
Presidente

Dra. Elisa Espinosa Juárez
Director de Tesis

Dr. J. Jesús Rico Melgoza
Vocal

J. Jesús Rico Melgoza

Dr. Juan Anzures Marín
Vocal I

Dr. Manuel Madrigal Martínez
Revisor Externo
Instituto Tecnológico de Morelia

Dr. J. Aurelio Medina Ríos
Jefe de la División de Estudios de Posgrado
En Ingeniería Eléctrica.

UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO
Noviembre 2011

Agradecimientos

Agradezco a la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por la oportunidad de realizar en esta institución mis estudios de maestría.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por otorgarme la beca para continuar con mi formación académica.

A la Dra. Elisa Espinosa Juárez, directora de esta tesis, por su confianza, dedicación y paciencia; permitiendo llevar a buen término la realización de este trabajo.

A los miembros del Jurado de Examen de Grado, los Dres.: J. Anzures, J. Flores, J. Rico y M. Madrigal; que con sus revisiones y observaciones enriquecieron esta tesis.

A mis profesores de la División de Estudios de Posgrado por todas sus enseñanzas.

A mis compañer@s estudiantes de posgrado: Alejandra, Paola, Abel, Erick, Javier, Luis, Omar B., Omar N., Tulio y Waldemar; especialmente a mis amigos: Félix, Noé, Omar R., Pilar, Roberto, Rubén y Víctor por todos los momentos que pasamos juntos y que hicieron de esta experiencia algo inolvidable.

A mis amig@s de siempre: Elvia, Patricia, Xóchitl, Dante, Jesús y Sebastián; por alentarme para seguir superándome.

Y a todas aquellas personas, que de alguna manera, se interesaron por el desarrollo o inspiraron la realización de esta tesis.

Dedicatoria

*A mi madre, María Estela Duarte González,
por ser mi ejemplo y mi más grande apoyo.*

Resumen

Las depresiones de voltaje (*voltage sags*) son uno de los principales fenómenos relacionados con la calidad de la energía debido a que son los disturbios que se presentan con mayor frecuencia en las redes eléctricas a consecuencia principalmente de fallas de cortocircuito. Para las empresas suministradoras, para clientes industriales y comerciales pueden significar pérdidas económicas cuantiosas derivadas del daño o mal funcionamiento de diversos equipos. En esta tesis se estudia la instalación de Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS, por sus siglas en inglés) como una estrategia eficiente para mitigar este tipo de disturbios.

Para identificar la existencia de una problemática relacionada con depresiones de voltaje se debe contar con una herramienta que permita cuantificar su severidad y frecuencia de ocurrencia. En esta tesis se describe y utiliza el método de posición de fallas para predecir el número de disturbios que pueden producirse durante un periodo de tiempo.

También se presentan los conceptos básicos relacionados con algunas técnicas de inteligencia artificial y su aplicación en la implementación de un esquema de control, basado en redes neuronales artificiales para Restauradores Dinámicos de Voltaje (DVRs, por sus siglas en inglés) que permite la detección casi instantánea de disturbios y la compensación correcta de voltaje en nodos de carga. Asimismo, se revisan dos nuevas topologías de DVRs basadas en convertidores directos CA/CA.

Además, se propone una metodología basada en algoritmos genéticos para resolver dos problemas de optimización; el primero es el emplazamiento óptimo de un número fijo de Compensadores Estáticos Síncronos (STATCOM, por sus siglas en inglés) con el objetivo de minimizar la cantidad total de depresiones de voltaje en una red eléctrica, el segundo problema es determinar el número mínimo de dispositivos y su ubicación para reducir la cantidad de depresiones de voltaje respecto a valores de referencia especificados en todos los nodos de la red.

Para demostrar la efectividad de las implementaciones realizadas en esta tesis sobre la aplicación de dispositivos FACTS en la mitigación de depresiones de voltaje, se presentan y se analizan los resultados obtenidos al llevar a cabo diversos casos de estudio en el ambiente MATLAB®.

Abstract

Voltage sags are one of the main phenomena related to power quality because they are the disturbances that occur with greater frequency in power systems as a result of short circuit faults. For energy supply companies, industrial and commercial customers; voltage sags can implicate important financial losses resulting from damage or malfunction of different equipment. This thesis examines the installation of Flexible AC Transmission Systems (FACTS) as an efficient strategy to mitigate this type of disturbance.

In order to identify a voltage sags related problem, it is necessary to have a tool that allows quantifying its severeness and frequency of incidence. In this thesis the fault position method is described and used to predict the number of disturbances that may arise during a period of time.

The thesis also presents the basic concepts associated with some artificial intelligence techniques and their application in the implementation of a control scheme based on artificial neural networks for Dynamic Voltage Restorers (DVRs) allowing almost instantaneous detection of disturbances and the correct voltage compensation in load buses. Likewise two new DVR topologies based on direct AC/AC converters are revised.

In addition, a methodology based on genetic algorithms to solve two optimization problems is proposed, the first is the optimal location of a fixed number of Static Synchronous Compensators (STATCOM) in order to minimize the total amount of voltage sags in an electrical network, the second problem is to determine a minimum number of devices and their location in order to reduce the amount of voltage sags with respect to specified reference values at all buses of an electric network.

To demonstrate the effectiveness of the implementations made in this thesis about the application of FACTS devices in mitigating voltage sags, the results by carrying out several case studies in the MATLAB® environment are presented and analyzed.

Contenido

Agradecimientos	v
Dedicatoria.....	vii
Resumen.....	ix
Abstract.....	xi
Contenido.....	xiii
Lista de figuras.....	xvii
Lista de tablas	xxiii
Lista de símbolos y abreviaturas.....	xxv
Lista de publicaciones.....	xxvii
CAPÍTULO 1.....	29
Introducción.....	29
1.1. Antecedentes.....	29
1.2. Objetivos principales	33
1.3. Justificación	33
1.4. Metodología.....	34
1.5. Estructura de la tesis	35
CAPÍTULO 2.....	37
Depresiones de voltaje y técnicas de inteligencia artificial	37
2.1. Depresiones de voltaje.....	37
2.1.1. Definición y origen	37
2.1.2. Clasificación y caracterización	39
2.1.3. Efectos producidos.....	40
2.2. Estrategias para mitigar depresiones de voltaje.....	41
2.2.1. Reducción del número de fallas.....	42

2.2.2. Reducción del tiempo de liberación de falla	43
2.2.3. Reconfiguración del sistema de potencia	44
2.2.4. Instalación de equipo para mitigación.....	44
2.2.5. Mejora de la inmunidad del equipo.....	45
2.3. Aplicación de dispositivos FACTS para mitigación de depresiones de voltaje.....	45
2.4. Otros fenómenos de calidad de la energía.....	47
2.5. Técnicas de inteligencia artificial (AI).....	48
2.5.1. Redes neuronales artificiales (ANNs).....	48
2.5.2. Algoritmos genéticos (GAs).....	54
2.6. Conclusiones	60
CAPÍTULO 3	61
Mitigación de depresiones de voltaje en nodos de carga	61
3.1. Restauradores dinámicos de voltaje (DVRs)	61
3.1.1. Método de control convencional	63
3.1.2. Simulación.....	65
3.2. Propuesta e implementación de un esquema de control basado en ANNs.....	69
3.2.1. Etapa de control del VSC	70
3.2.2. Etapa de control para detectar disturbios	73
3.2.3. Simulación.....	76
3.3. DVR basado en convertidores directos CA/CA.....	79
3.3.1. Descripción de las topologías.....	80
3.3.2. Método de control	83
3.3.3. Simulación.....	87
3.4. Conclusiones	96
CAPÍTULO 4	99
Mitigación de depresiones de voltaje en redes eléctricas.....	99
4.1. Estimación estocástica de depresiones de voltaje	99
4.2. Método de posición de fallas.....	100
4.3. Compensadores estáticos síncronos (STATCOM)	102
4.3.1. Cálculo de fallas incorporando dispositivos STATCOM	104

4.4. Emplazamiento óptimo de un número fijo de dispositivos STATCOM	106
4.4.1. Formulación y solución del problema de optimización mediante GAs.....	106
4.4.2. Casos de estudio.....	109
4.5. Emplazamiento de un número mínimo de dispositivos STATCOM.....	120
4.5.1. Formulación y solución del problema de optimización mediante GAs.....	121
4.5.2. Casos de estudio.....	122
4.6. Conclusiones.....	131
CAPÍTULO 5.....	133
Conclusiones y trabajos futuros.....	133
5.1. Conclusiones.....	133
5.2. Trabajos futuros	134
Referencias.....	135
Apéndice A	145
Datos de la red IEEE RTS-24	145
Apéndice B	147
Datos de la red IEEE TC-118	147

Lista de figuras

Figura 2.1. Representación fasorial de las depresiones de voltaje ($h = 0.5$): a) Tipo A; b) Tipo B; c) Tipo C; d) Tipo D; e) Tipo E; f) Tipo F; g) Tipo G	40
Figura 2.2. Esquema de un modelo neuronal.....	49
Figura 2.3. Funciones de transferencia: a) Lineal; b) Signo; c) Logística; d) Tangente sigmoidal	50
Figura 2.4. Esquema básico del trabajo con ANNs	51
Figura 2.5. Topologías de ANNs: a) <i>Feedforward</i> monocapa; b) <i>Feedforward</i> multicapa; c) Recurrente.....	52
Figura 2.6. Entrenamiento supervisado de una ANN	53
Figura 2.7. Proceso de un GA básico.....	56
Figura 2.8. Operador de mutación	59
Figura 3.1. Topología convencional y conexión de un DVR	62
Figura 3.2. Diagrama de flujo del esquema de control basado en la transformación $dq0$ para un DVR.....	64
Figura 3.3. Suministro eléctrico alimentando una carga RL a través de un DVR convencional.....	65
Figura 3.4. Implementación de la topología convencional de un DVR.....	66
Figura 3.5. Implementación del esquema de control basado en la transformación $dq0$ para un DVR de topología convencional	67
Figura 3.6. Compensación de una depresión de voltaje simétrica ($h = 0.2$, $\Delta t = 5$ ciclos): a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga.	68
Figura 3.7. Compensación de una depresión de voltaje simétrica ($h = 0.5$, $\Delta t = 5$ ciclos): a) Voltaje del suministro; b) Medición del voltaje rms en la fase a del suministro; c) Voltaje en la carga	68
Figura 3.8. Compensación de una depresión de voltaje asimétrica ($h = 0.5$, $\Delta t = 5$ ciclos): a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga	69
Figura 3.9. Implementación del esquema de medición para obtener el <i>trainingset</i> de la etapa de control del VSC	70

Figura 3.10. Mediciones de voltaje rms para obtener el <i>trainingset</i> de la etapa de control del VSC.....	71
Figura 3.11. Topología de una ANN correspondiente a la etapa de control del VSC: a) Representación esquemática; b) Implementación en Simulink®	71
Figura 3.12. Característica entrada-salida de la etapa de control del VSC	72
Figura 3.13. Implementación de la etapa de control del VSC utilizando ANNs	73
Figura 3.14. Bloque para adecuar el voltaje trifásico de referencia del SPWM	73
Figura 3.15. Mediciones que componen el <i>trainingset</i> de la etapa de control para detectar disturbios en la fase <i>a</i> : a) Voltaje instantáneo p.u.; b) ωt para cada ciclo; c) Voltaje rms p.u.....	74
Figura 3.16. Característica de la salida de la etapa de control para detectar disturbios	75
Figura 3.17. Implementación de la etapa de control para detectar disturbios utilizando ANNs	75
Figura 3.18. Implementación del esquema de cálculo del voltaje rms p.u. en la fase <i>a</i> utilizando una ANN	76
Figura 3.19. Compensación de una depresión de voltaje simétrica ($h = 0.2$, $\Delta t = 5$ ciclos) realizada por un DVR controlado con un esquema basado en ANNs: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga.	77
Figura 3.20. Compensación de una depresión de voltaje simétrica ($h = 0.5$, $\Delta t = 5$ ciclos) realizada por un DVR controlado con un esquema basado en ANNs: a) Voltaje del suministro; b) Cálculo del voltaje rms en la fase <i>a</i> del suministro; c) Voltaje en la carga	77
Figura 3.21. Compensación de una depresión de voltaje asimétrica ($h = 0.5$, $\Delta t = 5$ ciclos) realizada por un DVR controlado con un esquema basado en ANNs: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga	78
Figura 3.22. Compensación de una elevación de voltaje simétrica (1.3 p.u., $\Delta t = 5$ ciclos) realizada por un DVR controlado con un esquema basado en ANNs: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga	79
Figura 3.23. Topologías de DVRs basadas en convertidores directos CA/CA: a) Diseño con cuatro interruptores; b) Diseño con seis interruptores	81

Figura 3.24. Procedimiento de conmutación de la primera fase para el DVR basado en convertidores directos CA/CA con cuatro interruptores	84
Figura 3.25. Implementación del DVR basado en convertidores directos CA/CA con cuatro interruptores de potencia	89
Figura 3.26. Implementación de la etapa de control del DVR basado en convertidores directos CA/CA con cuatro interruptores de potencia.....	89
Figura 3.27. Compensación de una depresión de voltaje ($h = 0.2$, $\Delta t = 5$ ciclos) seguida de una elevación (1.3 p.u., $\Delta t = 5$ ciclos), ambas simétricas: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga.....	90
Figura 3.28. Compensación de una depresión de voltaje ($h = 0.3$, $\Delta t = 3$ ciclos) seguida de una elevación (1.4 p.u., $\Delta t = 3$ ciclos), ambas asimétricas: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga.....	91
Figura 3.29. Compensación de una fluctuación de voltaje entre 0.7 y 1.3 p.u. de magnitud y $\Delta t = 10$ ciclos: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga.....	92
Figura 3.30. Implementación del DVR basado en convertidores directos CA/CA con seis interruptores de potencia	93
Figura 3.31. Implementación de la etapa de control del DVR basado en convertidores directos CA/CA con seis interruptores de potencia.....	93
Figura 3.32. Compensación de una depresión de voltaje ($h = 0.4$, $\Delta t = 4$ ciclos) seguida de una elevación (1.5 p.u., $\Delta t = 4$ ciclos), ambas simétricas: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga.....	94
Figura 3.33. Compensación de una depresión de voltaje ($h = 0.5$, $\Delta t = 2$ ciclos) seguida de una elevación (1.6 p.u., $\Delta t = 2$ ciclos), ambas asimétricas: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga.....	95
Figura 3.34. Compensación de la distorsión armónica y el desbalance de voltaje presente en el suministro eléctrico durante $\Delta t = 10$ ciclos: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga	96
Figura 4.1. Topología convencional y conexión de un STATCOM.....	103
Figura 4.2. Característica V-I del STATCOM	103
Figura 4.3. Operador de cruce uniforme.....	108

Figura 4.4. Diagrama de flujo para obtener el emplazamiento óptimo de k dispositivos STATCOM que minimizan el número total de depresiones de voltaje en una red eléctrica.....	110
Figura 4.5. Diagrama de la red IEEE RTS-24.....	111
Figura 4.6. Número de depresiones de voltaje por año emplazando a la vez un dispositivo STATCOM en la red IEEE RTS-24; para los rangos de voltaje residual en p.u.: a) $0 \leq V_R \leq 0.6$; b) $0 \leq V_R \leq 0.7$; c) $0 \leq V_R \leq 0.8$; d) $0 \leq V_R \leq 0.9$	112
Figura 4.7. Número total de depresiones de voltaje por año emplazando a la vez un dispositivo STATCOM en la red IEEE RTS-24.....	113
Figura 4.8. Proceso para obtener el emplazamiento óptimo de cuatro dispositivos STATCOM en la red IEEE RTS-24: a) Aptitud del mejor individuo en cada generación; b) Mejor individuo	114
Figura 4.9. Número de depresiones de voltaje por año emplazando cuatro dispositivos STATCOM en la red IEEE RTS-24; para rangos de voltaje residual en p.u.: a) $0 \leq V_R \leq 0.6$; b) $0 \leq V_R \leq 0.7$; c) $0 \leq V_R \leq 0.8$; d) $0 \leq V_R \leq 0.9$	114
Figura 4.10. Número total de depresiones de voltaje por año emplazando cuatro dispositivos STATCOM en la red IEEE RTS-24	115
Figura 4.11. Diagrama de la red IEEE TC-118.....	116
Figura 4.12. Proceso para obtener el emplazamiento óptimo de doce dispositivos STATCOM en la red IEEE TC-118: a) Aptitud del mejor individuo en cada generación; b) Mejor individuo	117
Figura 4.13. Número de depresiones de voltaje por año emplazando doce dispositivos STATCOM en la red IEEE TC-118; para rangos de voltaje residual en p.u.: $0 \leq V_R \leq 0.6$; b) $0 \leq V_R \leq 0.7$; c) $0 \leq V_R \leq 0.8$; d) $0 \leq V_R \leq 0.9$	118
Figura 4.14. Emplazamiento óptimo de doce dispositivos STATCOM, con uno fijo en el nodo 25, en la red IEEE TC-118: a) Aptitud del mejor individuo en cada generación; b) Mejor individuo	119
Figura 4.15. Número de depresiones de voltaje por año emplazando óptimamente doce dispositivos STATCOM en la red IEEE TC-118; para el rango de voltaje residual en p.u. $0 \leq V_R \leq 0.9$	119

Figura 4.16. Número total de depresiones de voltaje por año emplazando doce dispositivos STATCOM en la red IEEE TC-118	120
Figura 4.17. Diagrama de flujo para determinar el número mínimo de dispositivos STATCOM y su emplazamiento, para reducir la cantidad de depresiones de voltaje por año en los nodos de una red eléctrica	123
Figura 4.18. Aptitud del mejor individuo en cada generación para obtener el número mínimo de dispositivos STATCOM y su emplazamiento en la red IEEE RTS-24, considerando el rango de voltaje residual $0 \leq V_R \leq 0.7$ p.u.	124
Figura 4.19. Depresiones de voltaje por año emplazando un número mínimo dispositivos STATCOM en la red IEEE RTS-24, considerando el rango de voltaje residual en p.u. $0 \leq V_R \leq 0.7$	126
Figura 4.20. Aptitud de los mejores individuos en cada generación para obtener el número mínimo de dispositivos STATCOM y su emplazamiento en la red IEEE RTS-24, considerando los rangos de voltaje residual en p.u.: a) $0 \leq V_R \leq 0.8$; b) $0 \leq V_R \leq 0.9$	127
Figura 4.21. Número de depresiones de voltaje por año emplazando un número mínimo dispositivos STATCOM en la red IEEE RTS-24, considerando los rangos de voltaje residual en p.u.: a) $0 \leq V_R \leq 0.8$; b) $0 \leq V_R \leq 0.9$	127
Figura 4.22. Aptitud de los mejores individuos en cada generación para obtener el número mínimo de dispositivos STATCOM y su emplazamiento en la red IEEE TC-118, considerando los rangos de voltaje residual en p.u.: a) $0 \leq V_R \leq 0.7$; b) $0 \leq V_R \leq 0.8$; c) $0 \leq V_R \leq 0.9$	128
Figura 4.23. Número de depresiones de voltaje por año emplazando un número mínimo de dispositivos STATCOM en la red IEEE TC-118, considerando los rangos de voltaje residual en p.u.: a) $0 \leq V_R \leq 0.7$; b) $0 \leq V_R \leq 0.8$; c) $0 \leq V_R \leq 0.9$	130

Lista de tablas

Tabla 3.1. Parámetros de simulación de la topología convencional de un DVR.....	66
Tabla 3.2. Estado de los interruptores y v_{\max} durante los diferentes modos de operación en la primera fase para el DVR basado en convertidores directos CA/CA con cuatro interruptores	85
Tabla 3.3. Parámetros de simulación de las topologías de DVRs basadas en convertidores directos CA/CA.....	88
Tabla 4.1. Número total de depresiones de voltaje por año emplazando a la vez un dispositivo STATCOM en la red IEEE RTS-24.....	113
Tabla 4.2. Número total de depresiones de voltaje por año emplazando cuatro dispositivos STATCOM en la red IEEE RTS-24	115
Tabla 4.3. Número total de depresiones de voltaje por año emplazando doce dispositivos STATCOM en la red IEEE TC-118.....	120
Tabla 4.4. Número de depresiones de voltaje por año en la red IEEE RTS-24 al emplazar un número mínimo de dispositivos STATCOM para el rango de voltaje residual de $0 \leq V_R \leq 0.7$ p.u.	125
Tabla 4.5. Número mínimo de dispositivos STATCOM emplazados en la red IEEE TC-118 considerando diferentes rangos de voltaje residual	129
Tabla A.1. Valores de referencia de depresiones de voltaje por año para la red IEEE RTS-24.....	146
Tabla B.1. Valores de referencia de depresiones de voltaje por año para la red IEEE TC-118 considerando el rango de voltaje residual en p.u. $0 \leq V_R \leq 0.7$	148
Tabla B.2. Valores de referencia de depresiones de voltaje por año para la red IEEE TC-118 considerando el rango de voltaje residual en p.u. $0 \leq V_R \leq 0.8$	149
Tabla B.3. Valores de referencia de depresiones de voltaje por año para la red IEEE TC-118 considerando el rango de voltaje residual en p.u. $0 \leq V_R \leq 0.9$	150

Lista de símbolos y abreviaturas

Δt	Duración de una depresión de voltaje
AI	<i>Artificial Intelligence</i>
ANN	<i>Artificial Neural Network</i>
DVR	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>
FACTS	<i>Flexible Alternating Current Transmission System</i>
f_{est}	Número de depresiones de voltaje por año estimadas
f_{ref}	Número de depresiones de voltaje por año de referencia
f_s	Frecuencia de conmutación
GA	<i>Genetic Algorithm</i>
h	Profundidad de una depresión de voltaje
I_f	Corriente de falla
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
m	Tipología de una depresión de voltaje
p	Número de fase
pf	Prefalla
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>
PQ	<i>Power Quality</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SPWM	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i>
STATCOM	<i>Static Synchronous Compensator</i>
T_s	Periodo de muestreo
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
V_{Nom}	Voltaje nominal
V_R	Voltaje residual
VSC	<i>Voltage Source Converter</i>
Z_{fault}	Impedancia de falla
Z_{Nodo}	Matriz de impedancia nodal
λ_f	Número de fallas por año

Lista de publicaciones

Las publicaciones asociadas con esta tesis son:

- J. Suárez-Duarte, E. Espinosa-Juárez, “Voltage Sags/Swells Mitigation Using a Dynamic Voltage Restorer Controlled by Neural Network”, *2011 International Conference on Artificial Intelligence ICAI’11*, Las Vegas Nevada USA, 18-21 July 2011.
- J. Suárez-Duarte, E. Espinosa-Juárez, “DVR Controlado Mediante Redes Neuronales para Mitigación de Depresiones/Elevaciones de Voltaje Balanceadas y Desbalanceadas”, *XIII Reunión de otoño de Potencia, Electrónica y Computación, ROPEC 2011 Internacional*, Morelia, Michoacán, México, 09-11 noviembre 2011.

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1. Antecedentes

El interés por los fenómenos de Calidad de la Energía (PQ, por sus siglas en inglés) se debe principalmente a las pérdidas económicas ocasionadas a las empresas suministradoras, a los clientes industriales y comerciales; ya sea por la mala operación de equipos sensibles y/o por la consecuente interrupción de importantes procesos productivos a causa de este tipo de disturbios.

El avance tecnológico de los dispositivos electrónicos ha incrementado significativamente su aplicación a nivel industrial. Debido a que estos dispositivos son altamente sensibles a los problemas de PQ, es muy importante su estudio y análisis.

Una de las definiciones sobre los problemas de PQ es la propuesta por R. Dugan [Dugan *et al.*, 2004], la cual menciona que cualquier problema manifestado como desviaciones en el voltaje, en la corriente o en la frecuencia del sistema; que resulta en falla o mal funcionamiento del equipo del consumidor de la energía es un problema de PQ.

Las depresiones de voltaje (*voltage sags*) son uno de los principales fenómenos de PQ debido a que son los disturbios que con mayor frecuencia se presentan en las redes eléctricas. Su origen está asociado principalmente con fallas de cortocircuito y pueden traer como consecuencia el daño y/o la falla en la operación de una variedad de dispositivos utilizados ampliamente, tanto a nivel industrial y comercial como por las compañías suministradoras, tales como: computadoras, controladores de velocidad de motores, relevadores, controladores lógicos programables, sistemas de control de procesos, equipo de telecomunicaciones, entre otros [Bollen, 2000] [Arrillaga *et al.*, 2002] [Dugan *et al.*, 2004] [Guasch *et al.*, 2004] [Aung y Milanovic, 2005] [Djokic *et al.*, 2005] [IEEE Std. 493-2007, 2007] [Moon *et al.*, 2007].

En [Manson y Targosz, 2008] se presenta un estudio sobre el costo económico que tiene la mala PQ, en el cual se estima que las pérdidas anuales en el sector industrial y de servicios, superan los 150,000 millones de euros en la Unión Europea, de los cuales 85,000

millones de euros corresponden a pérdidas originadas por depresiones de voltaje e interrupciones de corta duración.

Por lo anteriormente expuesto, resulta de gran interés, tanto para las empresas suministradoras de energía, como para los clientes industriales y comerciales, contar con información que permita conocer el estado de la red eléctrica, o de un nodo específico, en términos de indicadores de PQ; más específicamente indicadores sobre depresiones de voltaje, para de esa manera poder detectar una posible problemática relacionada con este fenómeno y tomar acciones para solucionarla. En la actualidad los parámetros utilizados se refieren a la magnitud de voltaje residual y a la frecuencia de ocurrencia de las depresiones de voltaje [Brooks *et al.*, 1998].

Para predecir el número de depresiones de voltaje que se presentan en una red eléctrica existen diferentes métodos, generalmente basados en datos estadísticos y parámetros de la red, tales como el método de posición de fallas [Bollen, 2000], el método de distancias críticas [Bollen, 2000], el método analítico para estimación estocástica [Espinosa y Hernández, 2006], entre otros.

La tecnología de los Sistemas Flexibles de Transmisión de Corriente Alterna (FACTS, por sus siglas en inglés) desarrollada a finales de los años 80's, utiliza elementos de electrónica de potencia para otorgar una mayor flexibilidad al control de los flujos de potencia de una red eléctrica. En estudios recientes se ha investigado la utilización de este tipo de dispositivos, tales como Restauradores Dinámicos de Voltaje (DVRs, por sus siglas en inglés) y Compensadores Estáticos Síncronos (STATCOM, por sus siglas en inglés), para mitigar depresiones de voltaje y otros fenómenos relacionados con la PQ en nodos de carga y en toda la red.

Sin embargo, la principal desventaja de los dispositivos FACTS es su alto costo, por lo que para su adquisición e instalación se deben tomar en cuenta, entre otros factores, el tipo de dispositivo, la capacidad requerida y su ubicación en la red eléctrica de manera que se optimice el efecto deseado. Al respecto se reporta que el costo total de instalación se puede expresar como una función de la capacidad nominal eléctrica de los dispositivos FACTS. La gran variedad de opciones disponibles para su diseño óptimo hace imposible dar una cifra del costo definitivo de su instalación. Sin embargo, a partir de algunos informes de los

precios aproximados de estos dispositivos, se puede observar que su costo varía en un rango amplio entre 40 y 100 dólares por kvar [Milanovic y Zhang, 2010a].

En [Milanovic y Zhang, 2010b] se presenta el modelado de dispositivos FACTS, tales como el STATCOM y el DVR, para su incorporación en estudios de mitigación de depresiones de voltaje en redes eléctricas; además, se presentan casos de estudio en el ambiente MATLAB® que ilustran dicho modelado y la efectividad de la aplicación.

Al respecto, en [Zhang y Milanovic, 2007] se presenta un enfoque empleando Algoritmos Genéticos (GAs, por sus siglas en inglés) que permite encontrar el emplazamiento óptimo, el tamaño y el tipo de dispositivos FACTS con el propósito de minimizar las pérdidas financieras debidas a las depresiones de voltaje presentes en una red eléctrica.

Posteriormente, en [Zhang y Milanovic, 2010] se muestra un enfoque, utilizando GAs, para el emplazamiento y la selección óptima de un número fijo de dispositivos FACTS en una red eléctrica de distribución con el objetivo de minimizar el número de depresiones de voltaje. Los casos de estudio presentados demuestran la efectividad de los GAs como herramienta de optimización eficaz para abordar este tipo de problemas.

En las últimas décadas, puede notarse que las técnicas de Inteligencia Artificial (AI, por sus siglas en inglés) son a menudo utilizadas eficientemente en el campo de las redes eléctricas como una forma alternativa de resolver diversas problemáticas; tal es el caso de los GAs, que se han empleado en el diseño de sistemas de potencia [Ramírez y Bernal, 1998], en la coordinación de generación hidrotérmica [Zoumas *et al.*, 2004], en la estimación de estado de depresiones de voltaje [Lucio *et al.*, 2011], entre otras aplicaciones.

También dentro de las técnicas de AI y su aplicación en el campo de las redes eléctricas, las Redes Neuronales Artificiales (ANNs, por sus siglas en inglés) se han empleado para solucionar problemas de despacho económico de potencia [Da Silva y Nepomuceno, 2001], análisis de estabilidad de voltaje [Kamalasadan *et al.*, 2006], entre otras aplicaciones; extendiendo su utilización también en los campos de la electrónica de potencia y de los sistemas de control [Kinal *et al.*, 2011]. Por ejemplo, se han utilizado para reemplazar los sistemas tradicionales de control de dispositivos FACTS, por sistemas de control basados en ANNs. Al respecto, en [Chung *et al.*, 2007] se aplican ANNs en el control de un DVR instalado en un nodo de carga; el mencionado control es capaz de

detectar disturbios, como las depresiones de voltaje, de manera casi instantánea; además, también adopta una estrategia de Modulación por Ancho de Pulso (PWM, por sus siglas en inglés) para la compensación de voltaje en tiempo real. Los resultados de los casos de estudio muestran el buen desempeño de este método alternativo de control.

En [Singh y Simina, 2004] se muestra el modelado de diversos convertidores CA/CA para simular su funcionamiento en el ambiente MATLAB®; además, se describe la metodología para incorporar ANNs en los esquemas de control de dichos convertidores, teniendo como finalidad la mitigación de fenómenos de PQ como la distorsión armónica, las depresiones y las elevaciones de voltaje.

De la misma forma que se ha innovado en los métodos de control de los dispositivos FACTS, también se han renovado las topologías de dichos dispositivos con la finalidad de hacer frente a los diversos fenómenos de PQ, hacerlos más eficientes y también menos voluminosos.

Basados en la conocida estrategia de conversión de energía CD/CD, los convertidores directos CA/CA han comenzado a surgir como una solución novedosa ante el problema de la compensación de voltaje. Igualmente, las estrategias de control como el PWM o la Modulación por Ancho de Pulso Senoidal (SPWM, por sus siglas en inglés), que han consolidado sus bases en años de investigación y utilización en convertidores CD/CA, están siendo modificadas para regular los voltajes de salida en los convertidores directos CA/CA.

En [Lozano, 2007] se propone un esquema de compensación basado en la topología convencional del DVR, pero incorporando la tecnología del convertidor directo CA/CA en matriz de conversión. Al generar los voltajes de compensación mediante la conversión CA/CA directa se eliminan los inconvenientes presentes en las topologías más comunes del DVR, derivadas del requerimiento de energía en el enlace CD. Asimismo, se propone una estrategia de control vectorial, denominada estrategia general de control DSVPM (*Direct Space Vector Pulse Width Modulation*), empleada en el convertidor matricial para generar los voltajes de compensación. Finalmente, se presentan varias simulaciones en el ambiente MATLAB® para evaluar el comportamiento del DVR propuesto y establecer sus alcances.

En [Babaei *et al.*, 2010] se proponen dos topologías nuevas de DVRs trifásicos basadas en convertidores directos CA/CA. Estas topologías no requieren elementos para almacenar energía y pueden compensar diversos tipos de disturbios de mayor duración que las

topologías típicas; también se propone un nuevo método de control para este tipo de convertidores y se presentan resultados de simulación en el ambiente PSCAD/EMTDC, así como resultados experimentales de los prototipos construidos.

1.2. Objetivos principales

Los objetivos principales de esta tesis son los siguientes:

- Plantear e implementar computacionalmente un esquema de control para DVRs, basado en ANNs, que incorpore la detección casi instantánea de disturbios y logre la compensación correcta de voltaje tomando en consideración las pérdidas eléctricas de los elementos que conforman el dispositivo; con la finalidad de mitigar depresiones y elevaciones de voltaje simétricas y asimétricas en nodos de carga.
- Plantear e implementar una metodología, basada en GAs, para solucionar dos problemas de optimización relacionados con el emplazamiento de STATCOMs en una red eléctrica; el primero de ellos se refiere a la ubicación óptima de un número determinado de dispositivos con el propósito de minimizar la cantidad total de depresiones de voltaje por año, el segundo consiste en determinar un número mínimo de dispositivos y su ubicación para reducir el número de depresiones de voltaje por año en todos los nodos de la red respecto a valores de referencia.

1.3. Justificación

La aplicación de diversos dispositivos FACTS en redes eléctricas ha demostrado su efectividad en la mitigación de fenómenos de PQ, como son las depresiones de voltaje. Tanto las compañías suministradoras de energía, así como también los consumidores industriales y comerciales, perciben en la instalación de estos dispositivos una forma de evitar las pérdidas económicas derivadas del daño o mal funcionamiento de diversos equipos y consecuentemente la interrupción de procesos de producción debido a los disturbios mencionados. Sin embargo, el alto costo de estos dispositivos ha motivado el desarrollo de metodologías para determinar su ubicación óptima dentro de las redes eléctricas dependiendo del efecto deseado que se quiera lograr a consecuencia de su instalación; también ha promovido la innovación en nuevas topologías y métodos de control que permitan aumentar su eficiencia, los haga menos voluminosos y más baratos.

Por lo mencionado anteriormente es que en esta tesis se propone una metodología para resolver dos problemáticas relacionadas con la mitigación de depresiones de voltaje: la primera de ellas es el emplazamiento óptimo de un determinado número de STATCOMs para minimizar la cantidad total de depresiones; y la segunda es, utilizando el menor número posible de dispositivos, reducir el número de los mencionados disturbios en todos los nodos de una red eléctrica tomando en cuenta valores de referencia. También se propone un método de control para DVRs que permite la detección de disturbios casi inmediata y su compensación correcta incluyendo las pérdidas de voltaje que puedan estar presentes en los elementos que constituyen a dichos dispositivos y en otros elementos de la red eléctrica. Los puntos anteriores se desarrollan aplicando técnicas de AI como son los GAs y las ANNs, respectivamente.

1.4. Metodología

Para alcanzar los objetivos planteados en esta tesis se ha seguido la siguiente metodología:

- Revisión del estado del arte en lo referente a la evaluación de depresiones de voltaje y al emplazamiento de dispositivos FACTS en redes eléctricas, sobre la aplicación de GAs para resolver este tipo de planteamientos y la utilización de ANNs en el control de los mencionados dispositivos. Lo anterior con la finalidad de conocer las metodologías utilizadas actualmente y contar con un conocimiento base sólido para el desarrollo de la tesis.
- Simulación, en el ambiente MATLAB Simulink®, de nuevas topologías de DVRs basadas en convertidores directos CA/CA.
- Planteamiento y simulación, en el ambiente MATLAB Simulink®, de un esquema de control para DVRs basado en ANNs y orientado a la mitigación de depresiones y elevaciones de voltaje simétricas y asimétricas.
- Planteamiento y simulación, en el ambiente MATLAB®, de una metodología basada en GAs para el emplazamiento de dispositivos STATCOM en una red eléctrica con dos objetivos; minimizar el número total de depresiones de voltaje presentes en la misma y reducir el número de disturbios en todos los nodos de acuerdo a sus valores de referencia.

- Realización de diversos casos de estudio una vez efectuados los planteamientos y las implementaciones mencionadas en los puntos anteriores, para posteriormente hacer la revisión y el análisis de los resultados obtenidos.

1.5. Estructura de la tesis

En este Capítulo 1 se ha expuesto una breve introducción a esta tesis, se ha mostrado un panorama de referencia y se han descrito los antecedentes relacionados con las depresiones de voltaje y las estrategias de mitigación de este disturbio mencionando los estudios realizados por diversos autores. Por último, se han enunciado los objetivos de la tesis y la metodología a seguir para alcanzarlos.

En el Capítulo 2 se describe el fenómeno de las depresiones de voltaje y se hace una revisión de las estrategias para la mitigación de este disturbio; finalmente se presentan los conceptos generales relacionados con las técnicas de AI, como son las ANNs y los GAs, necesarios para la comprensión de la terminología y las metodologías abordadas en esta tesis.

En el Capítulo 3 se presenta la instalación de dispositivos DVRs como una solución a los problemas de PQ en nodos de carga. Se explica su funcionamiento y se muestra tanto su configuración típica como su método de control. Además, se propone un esquema de control basado en ANNs y también se revisan algunas nuevas topologías, basadas en convertidores directos CA/CA, para el mencionado dispositivo. Asimismo, durante el desarrollo del capítulo se muestra mediante diversas simulaciones, en el ambiente MATLAB Simulink®, el desempeño de todas las implementaciones realizadas.

En el Capítulo 4 se muestra el emplazamiento de dispositivos STATCOMs como una solución a los disturbios relacionados con la PQ en redes eléctricas, especialmente para mitigar depresiones de voltaje. Se describe su incorporación al estudio de cálculo de fallas y los planteamientos relacionados con el emplazamiento de dichos dispositivos en una red eléctrica, proponiéndose la utilización de GAs para su solución. Además, en el desarrollo del capítulo se presentan diversos casos de estudio, en el ambiente MATLAB®, utilizando las herramientas desarrolladas y mostrando su efectividad.

Finalmente en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones generales de la labor realizada y de los resultados obtenidos; además, se sugiere el desarrollo futuro de investigaciones en el mismo campo de conocimiento.

CAPÍTULO 2

Depresiones de voltaje y técnicas de inteligencia artificial

En este capítulo se describe el fenómeno de las depresiones de voltaje, su definición, origen, consecuencias y, después de una revisión general de las diversas formas de mitigación de este disturbio, se estudia el diseño de la red eléctrica y el equipo de mitigación que ha de ser instalado entre ésta y el equipo sensible.

Además, se presenta la terminología y los conceptos básicos relacionados con algunas de las técnicas de AI, como son las ANNs y los GAs.

2.1. Depresiones de voltaje

La PQ se ha convertido en una preocupación importante que interesa tanto a las compañías suministradoras como a los clientes industriales y comerciales. Una mala PQ afecta, en menor o mayor medida, el funcionamiento de varios dispositivos y en consecuencia puede ocasionar la interrupción de procesos productivos importantes, causando pérdidas económicas significativas [Bollen, 2000] [Cardona y Barros, 2006] [Mason y Targosz, 2008].

Las depresiones de voltaje son uno de los problemas de PQ más importantes en las redes eléctricas y para el sector industrial la mayor parte de los eventos de PQ corresponden a este tipo de disturbios.

2.1.1. Definición y origen

En las publicaciones relacionadas con PQ no existe una definición unívoca de depresión de voltaje. A modo de ejemplos se indican las siguientes:

- La norma EN 50160 [EN 50160, 1999] define a la depresión de voltaje como una: disminución repentina del voltaje de alimentación a un valor entre el 90 y el 10%

del voltaje nominal V_{Nom} , seguida del restablecimiento del voltaje después de un corto lapso de tiempo, convencionalmente de 10 ms a 1 minuto. La profundidad de la depresión es definida como la diferencia entre el voltaje eficaz mínimo durante la depresión y el voltaje nominal. Las variaciones de voltaje que no reducen el voltaje de alimentación a un valor inferior al 90% del voltaje nominal no son consideradas como depresiones de voltaje.

- La norma IEEE Std. 1159-1995 [IEEE Std. 1159-1995, 1995], define depresión como una disminución del voltaje o de la corriente, en valor eficaz, entre 0.1 y 0.9 p.u. a la frecuencia de la red, para duraciones comprendidas entre medio ciclo y un minuto.

Coincidiendo con ambas normas, una depresión de voltaje queda caracterizada, en una primera aproximación, por un valor que expresa la diferencia entre el voltaje nominal y el voltaje eficaz mínimo alcanzado durante la depresión, que se denomina profundidad h ($0 \leq h \leq 1$) y una duración Δt , de tal modo que el voltaje puede estar representado por:

$$v(h, \Delta t) \tag{2.1}$$

Es importante mencionar que usualmente, en lugar de emplear la característica de profundidad, se utiliza el término voltaje residual V_R ($0 \leq V_R \leq 0.9$), que es el mínimo valor eficaz al que desciende el voltaje durante la depresión.

En cuanto a las causas y frecuencia de ocurrencia de las depresiones de voltaje, la norma EN 50160 [EN 50160, 1999] indica que: las depresiones de voltaje son generalmente debidas a defectos que sobrevienen en las instalaciones de los clientes o en la red general. Estos sucesos fundamentalmente aleatorios son imprevisibles. Su frecuencia anual depende principalmente del tipo de red de distribución y del punto de observación. Además, su distribución en un año puede ser muy irregular.

En concreto, las depresiones de voltaje pueden estar originadas por fallas producidas en la red eléctrica (originadas por descargas atmosféricas, animales, accidentes u otros, así como por errores en la operación) o por sobrecargas (arranque de motores de gran potencia, conexión de grandes cargas, conexión de transformadores o sobrecarga en general de la red eléctrica) que provocan una caída de voltaje excesivo; las depresiones de voltaje más

severas son las producidas por las fallas. La profundidad de la depresión de voltaje depende de la potencia de la red eléctrica y de la proximidad de la falla (o del punto donde se origina la sobrecarga) al punto donde se está observando el disturbio.

Cuando se producen este tipo de fenómenos en la red eléctrica, las cargas conectadas a la misma se ven afectadas de diferente modo en función de su sensibilidad. Un efecto típico de las depresiones de voltaje es la aparición de picos de corriente tras la recuperación del voltaje.

Las depresiones de voltaje pueden ser simétricas o asimétricas (también llamadas balanceadas o desbalanceadas) en función del tipo de falla o del tipo de sobrecarga que las ha originado. Cuando el valor eficaz del voltaje de todas las fases disminuye en la misma proporción y el desfase entre ellas se mantiene en 120° , se dice que la depresión es simétrica. Un cortocircuito trifásico, el arranque de un motor de potencia o la sobrecarga producida por cargas trifásicas, originan este tipo de depresión. Una depresión de voltaje es asimétrica cuando la disminución del valor eficaz del voltaje no es igual para las tres fases y/o el desfase entre las mismas no es de 120° . En este caso fallas fase-tierra, fase-fase y fase-fase-tierra, así como la conexión de transformadores de potencia, o la sobrecarga por cargas monofásicas o no simétricas, originan este tipo de depresiones [Pedra *et al.*, 2005].

2.1.2. Clasificación y caracterización

El análisis del voltaje que se tiene en el punto de conexión común (pcc), donde están conectados los usuarios a la red eléctrica, directamente o a través de transformadores, cuando se originan las diferentes fallas, la conexión de la carga y la transmisión de las depresiones de voltaje a otros niveles de tensión permite clasificarlas en siete tipologías: A, B, C, D, E, F y G [Bollen, 2000].

La Fig. 2.1 muestra los diagramas fasoriales de los voltajes residuales de cada tipo de depresión. En esta representación se ha considerado una profundidad del 50%.

Por lo mencionado hasta ahora, una depresión de voltaje se puede caracterizar mediante su profundidad, duración y tipología m :

$$v(h, \Delta t, m) \text{ donde } m \in [A, B, C, D, E, F, G] \quad (2.2)$$

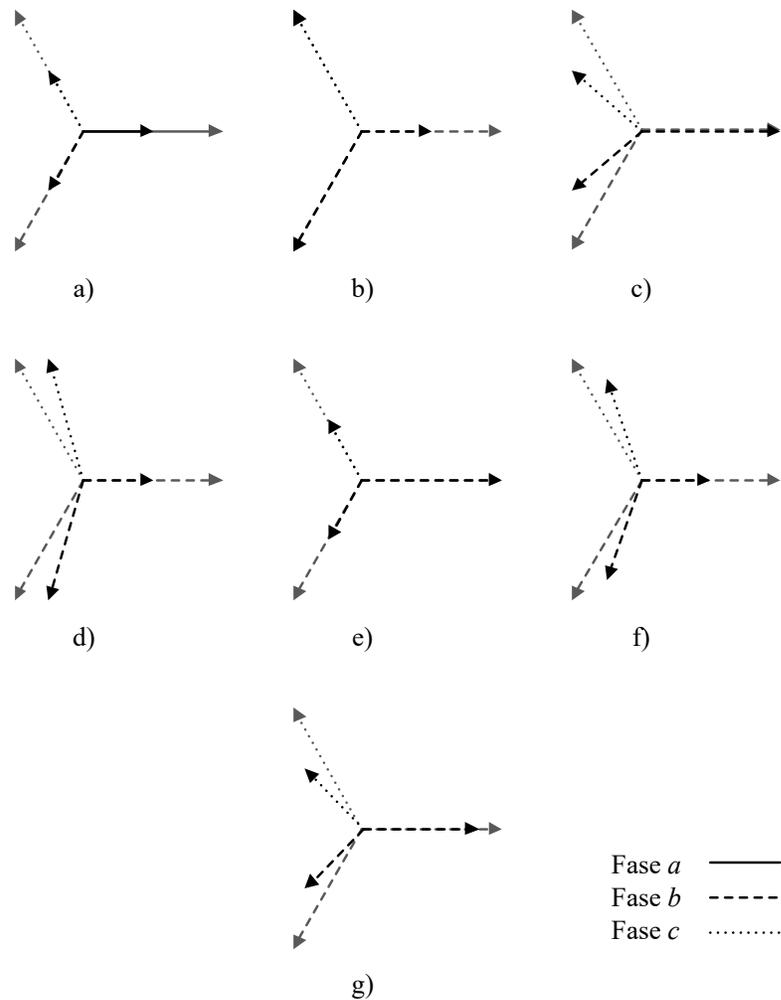


Figura 2.1. Representación fasorial de las depresiones de voltaje ($h = 0.5$): a) Tipo A; b) Tipo B; c) Tipo C; d) Tipo D; e) Tipo E; f) Tipo F; g) Tipo G

2.1.3. Efectos producidos

Las depresiones de voltaje producen efectos en los equipos que se ven sometidos a ellas en función de las características propias de la depresión, de la naturaleza del equipo afectado y del tipo de conexión a la red eléctrica.

Entre los tipos de cargas que se ven afectados se encuentran: motores de inducción, transformadores, motores síncronos, convertidores electrónicos, sistemas de control, equipo de cómputo, etc.

De forma breve, los efectos producidos por las depresiones de voltaje en las diferentes cargas son [Pedra *et al.*, 2005] [Guasch *et al.*, 2004]:

- Máquinas de inducción: picos de corriente, picos de par, pérdida de velocidad y posible detención del mismo.
- Transformadores: picos de corriente.
- Motores síncronos: picos de corriente, picos de par y posible pérdida de sincronismo.
- Convertidores electrónicos: en muchos accionamientos de velocidad variable para máquinas de CA, la fuente de voltaje que alimenta al inversor consiste básicamente en un capacitor energizado a través de un rectificador trifásico en puente de diodos conectado a la red eléctrica. Las depresiones de voltaje causan caídas de voltaje en el lado de CD que producen variaciones en la velocidad y en el par de la máquina y picos de corriente en el lado de CA del rectificador que, a su vez, pueden provocar el disparo de las protecciones.
- Sistemas de control: pueden provocar que la información captada o enviada a los sensores y actuadores en tiempo real, o bien el procesado del propio sistema de control, vean afectado su funcionamiento cuando se produzca una depresión de voltaje.
- Equipo de cómputo: pueden sufrir desde una interrupción no deseada hasta la pérdida de información o la avería de alguno de sus componentes.

Cuando se analizan las depresiones de voltaje desde el punto de vista industrial y comercial siempre se debe tener en cuenta cual es el costo económico de los efectos producidos. Por ejemplo, las pérdidas económicas pueden ser importantes en el caso de una empresa en la que una depresión de voltaje ocasione la interrupción del funcionamiento de un motor de gran potencia y, en consecuencia, se pierda la materia del proceso de producción.

Por lo tanto, es de gran importancia conocer la sensibilidad de los equipos a las depresiones de voltaje en determinado tipo de industrias para poder hacerles frente, minimizando sus consecuencias.

2.2. Estrategias para mitigar depresiones de voltaje

Para entender las diversas estrategias de mitigación de depresiones de voltaje, se debe comprender el mecanismo que conduce a la desconexión de equipo a consecuencia de una

falla de cortocircuito entre dos o más fases o entre una o más fases a tierra. En el lugar donde ocurre la falla, la magnitud de voltaje se abate hasta tomar un valor muy bajo. El efecto del cortocircuito en otros lugares de la red eléctrica es una depresión de voltaje de cierta magnitud y duración en la interconexión entre el equipo y dicha red. Si la falla toma lugar en una parte de la red interconectada de manera radial, la intervención de las protecciones libera la falla pero conduce a una interrupción, si se tiene redundancia suficiente, el cortocircuito solamente conduce a una depresión de voltaje. Si el evento que se presenta excede cierta magnitud, éste causa la desconexión de equipo. Es importante mencionar que no sólo los cortocircuitos conducen a desconexión de equipo, también se presentan depresiones de voltaje como consecuencia de la conexión y desconexión de capacitores y el arranque de motores como se mencionó en la Subsección 2.1.1. Pero la gran mayoría de eventos relacionados con la desconexión de equipo son debidos a fallas de cortocircuito.

Existen distintas estrategias de mitigación [Bollen, 2000]:

- Reducción del número de fallas de cortocircuito.
- Reducción del tiempo de liberación de la falla.
- Reconfiguración del sistema, de tal forma que las fallas de cortocircuito resulten en eventos de menor severidad en las terminales de los equipos o en la interfaz de la red eléctrica con los clientes.
- Conexión de equipo para mitigación entre el equipo sensible y el suministro eléctrico.
- Mejora de la inmunidad del equipo.

En las siguientes subsecciones se estudian, de manera breve, estas cinco estrategias de mitigación haciendo énfasis en la configuración de la red eléctrica y la instalación de equipo en la interfaz “red eléctrica-equipos sensibles”.

2.2.1. Reducción del número de fallas

Reduciendo el número de fallas de cortocircuito no sólo se reduce la frecuencia de las depresiones de voltaje sino también la frecuencia de las interrupciones prolongadas. Por lo tanto, ésta es una manera muy efectiva de mejorar la PQ y un gran número de consumidores ven en esta opción la solución obvia a los problemas causados por las

depresiones de voltaje y las interrupciones de corta duración. Desafortunadamente, la solución es rara vez tan simple. En el mejor de los casos se reduce la frecuencia de las fallas tanto como es económicamente posible. Algunas acciones para reducir el número de fallas son [Bollen, 2000]:

- Reemplazar de líneas aéreas por cables subterráneos.
- Utilizar cable forrado en líneas aéreas.
- Implementar una estricta política de poda de árboles.
- Instalar cables de guarda adicionales.
- Incrementar el nivel de aislamiento.
- Incrementar la frecuencia de mantenimiento e inspección.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que estas medidas pueden ser muy caras y que su costo se debe ponderar contra las consecuencias de la desconexión o mal funcionamiento de equipo.

2.2.2. Reducción del tiempo de liberación de falla

Reduciendo el tiempo de liberación de falla no se reduce el número de depresiones de voltaje pero puede limitar de manera significativa su duración y consecuentemente el efecto que causan en los equipos sensibles [IEEE Std. 141-1993, 1993].

La tecnología más novedosa para reducir el tiempo de liberación de falla es la utilización de fusibles limitadores de corriente que son capaces de liberar la falla en medio ciclo, de manera que la duración de una depresión de voltaje rara vez excede este tiempo [Kojovic y Hassler, 1997]. Si además se tiene en cuenta que los fusibles tienen una posibilidad extremadamente pequeña de disparo en falso, se tiene una buena solución. El *Static Circuit Breaker* también proporciona un tiempo de liberación de falla dentro de medio ciclo; pero obviamente es mucho más caro que los fusibles limitadores de corriente. Adicionalmente han sido propuestos algunos tipos de limitadores de corriente de falla que reducen significativamente su magnitud actuando en uno o dos ciclos.

Una restricción importante de todos estos dispositivos es que sólo se pueden utilizar en sistemas de bajo y medio voltaje. El máximo voltaje de operación es de pocas decenas de kilovolts [Bollen, 2000].

2.2.3. Reconfiguración del sistema de potencia

Haciendo cambios en la red eléctrica se puede reducir la severidad de los eventos. Nuevamente el costo puede ser muy alto, especialmente para niveles de voltaje de transmisión y subtransmisión. El principal método de mitigación de interrupciones es la instalación de componentes redundantes.

Algunos ejemplos de estrategias de mitigación especialmente dirigidos hacia depresiones de voltaje son [Bollen, 2000]:

- Instalación de un generador cerca de la carga sensible.
- División de nodos o subestaciones en la trayectoria del suministro para limitar el número de alimentadores en el área expuesta.
- Instalación de bobinas limitadoras de corriente en puntos estratégicos del sistema para incrementar la “distancia eléctrica” a la falla.
- Alimentación del nodo con equipo sensible desde dos o más subestaciones.

2.2.4. Instalación de equipo para mitigación

Una de las estrategias para mitigación es la instalación de equipo adicional en la interfaz red eléctrica-equipos sensibles. Desarrollos recientes muestran interés en esta forma de mitigación. La popularidad del equipo de mitigación se explica al ser el único lugar donde el cliente tiene el control sobre la situación. Tanto cambios en el suministro, así como el mejoramiento de equipo están fuera del control del usuario final.

Algunos ejemplos de equipo de mitigación son [Bollen, 2000] [IEEE Std. 1100-2005, 2005]:

- Sistemas de Alimentación Ininterrumpida (UPS, por sus siglas en inglés). Pueden alimentar cargas críticas desde equipo computacional como: computadoras personales, servidores y equipo de control de procesos; hasta dispositivos industriales y médicos.
- Sistemas motor-generador. Son descritos como dispositivos ruidosos que necesitan mucho mantenimiento. Pero en ambientes industriales el equipo ruidoso y el mantenimiento de las máquinas rotativas son bastante normales. Los grandes bancos de baterías también requieren mantenimiento, experiencia que está mucho menos disponible.

- Convertidores Fuente de Voltaje (VSCs, por sus siglas en inglés). Son dispositivos que generan un voltaje senoidal con la magnitud y la fase deseadas por medio de la conmutación de una forma particular del voltaje trifásico. Esta fuente de voltaje se puede utilizar para mitigar depresiones e interrupciones.

2.2.5. Mejora de la inmunidad del equipo

Mejorar la inmunidad del equipo es posiblemente la solución más efectiva contra su mal funcionamiento o desconexión debido a depresiones de voltaje. Comúnmente un cliente sólo tiene conocimiento de la inmunidad después de que el equipo ha sido instalado. Solamente el equipo industrial es hecho a la medida para ciertas aplicaciones y permite la incorporación de los requerimientos en tolerancias de voltaje.

Algunas soluciones específicas en el mejoramiento del equipo son [Bollen, 2000]:

- La inmunidad de equipo electrónico, computadoras y equipo de control se puede mejorar conectando una mayor capacitancia en el nodo interno de CD.
- Equipo monofásico de baja potencia puede mejorarse utilizando convertidores CD/CD más sofisticados que sean capaces de operar dentro de rangos de voltaje de entrada más amplios.
- Una de las principales fuentes de cuidado son los Controladores de Velocidad Variable (ASDs, por sus siglas en inglés). Aquí son necesarias mejoras serias en el inversor o en el rectificador con la finalidad de lograr tolerancia contra depresiones de voltaje debidas a fallas trifásicas.
- Una inspección minuciosa de la inmunidad de todos los contactos, relevadores, sensores, etc.; puede mejorar significativamente el desarrollo de procesos.
- Cuando se instale equipo nuevo, la información acerca de su inmunidad debe obtenerse de antemano del fabricante. Donde sea posible, los requerimientos de inmunidad deben incluirse en las especificaciones del equipo.

2.3. Aplicación de dispositivos FACTS para mitigación de depresiones de voltaje

Existen diferentes métodos para mitigación de depresiones de voltaje u otros fenómenos de PQ; uno de ellos consiste en la instalación de dispositivos “*Custom power*” en la interfaz

red eléctrica-equipo sensible. El interés sobre estos dispositivos de mitigación se debe a que el usuario tiene el completo control sobre la situación en su propia instalación. De otra forma, cambios en la red eléctrica o el mejoramiento de equipo se encuentran fuera del control del usuario final.

Hay varios dispositivos basados en componentes de electrónica de potencia utilizados para la mitigación de disturbios, tal es el caso del llamado VSC que es capaz de generar un voltaje con magnitud, frecuencia y ángulo de fase deseados a partir de un voltaje de CD. En la mitigación de depresiones de voltaje es utilizado para reemplazar temporalmente el voltaje del suministro o para proveer el voltaje para compensar el disturbio [Bollen, 2000]. La misma tecnología del VSC es utilizada en los dispositivos FACTS [Guygyi *et al.*, 1995] [Schauder *et al.*, 1995]; el buen funcionamiento de estos dispositivos depende, en gran medida, de su sistema de control y su mayor inconveniente es su alto costo, de aquí la importancia de buscar el mayor beneficio como resultado de su instalación [Habur y O'Leary, 2002].

Dispositivos FACTS como el STATCOM y el DVR están siendo utilizados en redes eléctricas a nivel mundial para mitigar depresiones de voltaje y otros disturbios de PQ [Bollen, 2000] [Masdi *et al.*, 2004] [Wang y Giri, 2004]. Por ejemplo, la compañía ABB en el verano del año 2000 entregó y puso en operación dos de los mayores dispositivos de PQ a nivel mundial en aquel entonces. La función principal de estos dispositivos DVRs es la compensación de caídas temporales de voltaje causadas por disturbios y fallas en la red eléctrica. Cada dispositivo tiene destinada a una carga de hasta 22.5 MVA. Desde la instalación exitosa de estos DVRs se han compensado aproximadamente 300 depresiones de voltaje por año y con ello se han evitado interrupciones costosas al proceso de un cliente de fabricación de semiconductores [ABB, 2004]. Asimismo desde el año 2005, Austin Energy, la empresa pública de servicio de Austin, Texas, opera un STATCOM de la marca ABB en su red eléctrica de 138 kV. El STATCOM cuenta con una capacidad nominal de 80 Mvar inductivos y 110 Mvar capacitivos. La instalación del dispositivo fue considerada como una solución para proporcionar la estabilidad de voltaje y la potencia reactiva que se perderían con el cierre de una planta de generación. Además, debido a la abundancia de cargas sensibles de alta tecnología en la región, obtener una respuesta rápida para

protegerlas de las depresiones de voltaje era una preocupación particular para la empresa [ABB, 2011].

2.4. Otros fenómenos de calidad de la energía

Además de las depresiones de voltaje existen otros fenómenos de PQ, a continuación se describen algunos de los más conocidos:

- Elevaciones de voltaje (*voltage swells*). Son sobrevoltajes temporales que se definen como un incremento en el valor rms de voltaje entre 1.1 y 1.8 p.u., con una duración de medio ciclo a un minuto [IEEE Std. 1159-1995, 1995]. Estos disturbios no son tan frecuentes como las depresiones de voltaje; ocurren con la desconexión de grandes bancos de capacitores o grandes cargas, pero comúnmente se asocian con fallas desbalanceadas en el sistema; por ejemplo, durante una falla monofásica a tierra una elevación de voltaje puede ocurrir en alguna de las otras fases no falladas [Dugan *et al.*, 2004].
- Parpadeo (*flicker*). Se define como una fluctuación de voltaje con suficiente duración que es percibido como un cambio de intensidad en una fuente de iluminación. También se define como la luminosidad fluctuante o presencia de color cuando la frecuencia de la luz varía. Este fenómeno puede ocurrir con la conexión de cargas, tales como hornos de arco y máquinas soldadoras [IEEE Std. 1453-2004, 2004].
- Distorsión armónica. Cuando el voltaje o la corriente en una red eléctrica tienen deformaciones con respecto a la forma de onda senoidal, se dice que la señal está distorsionada. La distorsión armónica describe la variación en estado estacionario o continuo en la forma de onda de la frecuencia fundamental. Para esta condición de estado estacionario las frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Los síntomas típicos de problemas de distorsión armónica incluyen disparos en falso de fusibles e interruptores, sobrecalentamiento de motores y transformadores; además de mal funcionamiento de relevadores y computadoras, entre otros. Este disturbio puede presentarse por fenómenos transitorios como: arranque de motores, conmutación de capacitores y fallas por cortocircuito; también

puede deberse a condiciones permanentes que están relacionadas con armónicas de estado estable [Sabin *et al.*, 1999].

2.5. Técnicas de inteligencia artificial (AI)

La AI es considerada una rama de las ciencias de la computación que relaciona algún fenómeno natural con una analogía artificial a través del desarrollo de software.

Recientemente el uso de técnicas de AI en los campos de la electrónica de potencia y de los sistemas de control, así como en sistemas eléctricos, se ha incrementado considerablemente y la expectativa de mejorar varios aspectos de su operación ha impulsado la investigación de su aplicación en estas áreas.

2.5.1. Redes neuronales artificiales (ANNs)

Una ANN es un modelo matemático inspirado en el comportamiento biológico de las neuronas y en la estructura del cerebro, recreado mediante mecanismos artificiales (como un circuito integrado o una computadora).

Una de las definiciones que se estima más certera de ANN es la siguiente [Kohonen, 1989]: las ANNs son conjuntos de elementos de cálculo simples, usualmente adaptativos, interconectados masivamente en paralelo y con una organización jerárquica que les permite interactuar con algún sistema del mismo modo que lo hace el sistema nervioso biológico.

Las ANNs se aplican satisfactoriamente en diversas áreas de conocimiento tales como: reconocimiento de patrones, procesamiento de datos y señales, control de procesos industriales, entre otras. Actualmente se utilizan en el control de dispositivos de electrónica de potencia y en sistemas de control.

Metodologías tales como ANNs, sistemas expertos y lógica difusa; necesitan una gran base de datos o conocimientos que describan la operación del sistema junto con un análisis lógico, en lugar de un análisis matemático, para controlarlo.

En general, una ANN se caracteriza por tres partes fundamentales: la topología de la red, el tipo de entrenamiento y el algoritmo de aprendizaje.

2.5.1.1 La neurona artificial

La neurona es considerada como el elemento formal, módulo o unidad básica de una ANN que recibe información de otros módulos o del entorno; la integra, la procesa y emite una única salida que se transmitirá idéntica a múltiples neuronas posteriores. En la Fig. 2.2 se representa esquemáticamente una neurona artificial, aunque existen varios tipos de neuronas.

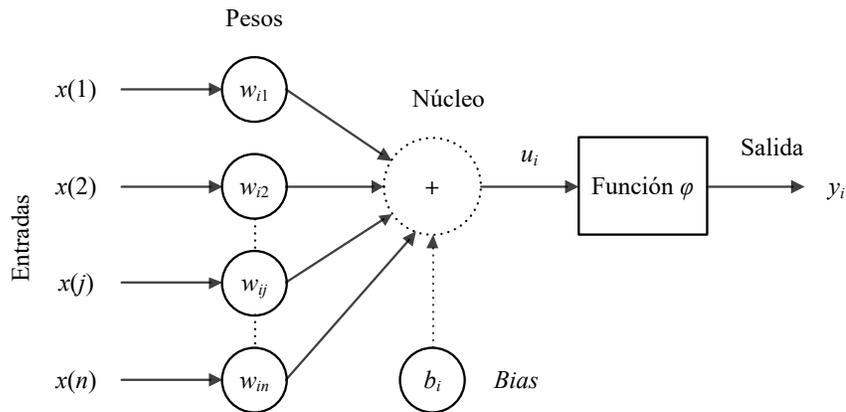


Figura 2.2. Esquema de un modelo neuronal

Los elementos clave de una neurona artificial son los siguientes [Gestal, 2009]:

- Las estradas $x(j)$. Reciben los datos de otras neuronas, cada entrada del vector corresponde a un estímulo o variable en particular que tiene cierta cantidad de observaciones o valores.
- Los pesos w_{ij} . Realizan la misma función que las fuerzas sinápticas de las neuronas biológicas. Cada entrada tiene su propio peso relativo, el cual transmitirá la importancia de la entrada en el procesamiento de los datos por la neurona. Es en el conjunto de pesos donde se almacena la información que le proporciona a la red la capacidad de resolver un determinado problema.
- Función de propagación. Permite obtener, a partir de las entradas y los pesos, el valor del potencial postsináptico u_i de la neurona. La función más habitual es la suma ponderada de todas las entradas, además de un sesgo “Bias” como variable extra de ajuste, es decir:

$$u_i = \sum_{j=1}^n w_{ij} x_j - b_i \quad (2.3)$$

- Función de transferencia φ . Transforma el resultado de la función de propagación en la salida real de la neurona, depende del potencial postsináptico u_i y de su estado de activación actual (véase Ec. (2.4)), aunque en muchos modelos de ANNs se considera que también depende de su estado de activación anterior.

$$y_i = \varphi_i(u_i) \quad (2.4)$$

En la Fig. 2.3 se muestran algunas de las funciones de transferencia más utilizadas; por ejemplo, la función lineal, la función signo, o funciones no-lineales como la función logística y la función tangente sigmoideal.

La función de transferencia es también llamada función de activación debido a que el valor de su salida puede ser comparado con algún valor de umbral para determinar si la neurona genera o no una señal de salida.

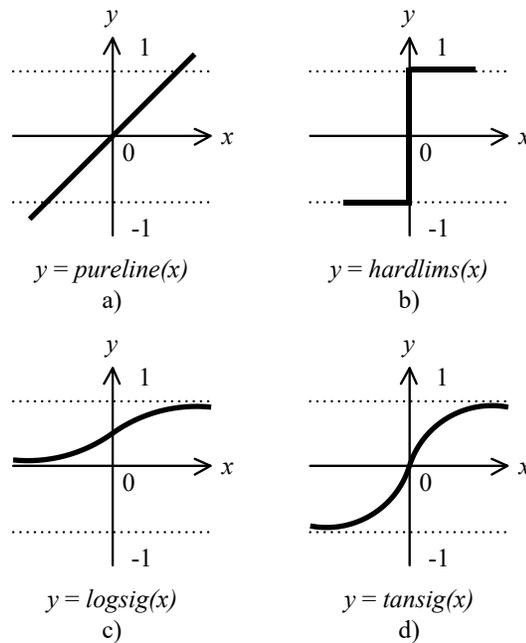


Figura 2.3. Funciones de transferencia: a) Lineal; b) Signo; c) Logística; d) Tangente sigmoideal

2.5.1.2 Funcionamiento

Las ANNs se han hecho muy populares debido a la facilidad en su uso e implementación, además de su habilidad para aproximar funciones matemáticas.

El funcionamiento básico de las ANNs abarca dos grandes etapas (véase Fig. 2.4) [Gestal, 2009]. La primera comprende todas las fases de creación y desarrollo de la misma; y posteriormente se presenta la etapa de funcionamiento real o etapa de ejecución, durante la cual la ANN ya es operativa y, tanto su estructura interna como los valores de los pesos de las interconexiones no vuelven a ser modificados. Durante esta última etapa se utiliza la ANN como si se tratara de cualquier otro programa informático convencional, y es cuando se emplea de forma efectiva para resolver los problemas para los que ha sido creada.

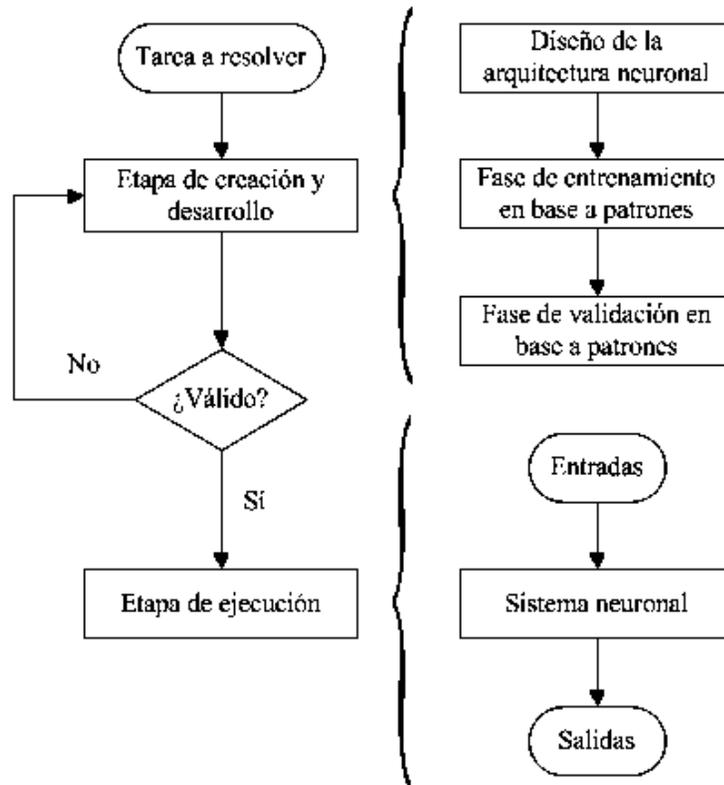


Figura 2.4. Esquema básico del trabajo con ANNs

Etapa de creación y desarrollo

Esta etapa incluye todas las fases necesarias para la creación y el desarrollo de una ANN, estas fases son [Gestal, 2009]:

- Diseño de la arquitectura. Se denomina arquitectura a la topología, estructura o patrón de interconexiones que presenta una ANN. En general, las neuronas se suelen agrupar en unidades estructurales que se denominan capas. Finalmente, el conjunto de una o más capas constituye la ANN. Es así como se definen tres tipos básicos de redes (véase Fig. 2.5). Dos tipos de redes de propagación hacia adelante (*Feedforward*), de tipo monocapa y multicapa, en las que la información fluye en un único sentido, desde la entrada hacia la salida, sin existir ciclos ni conexiones entre neuronas de una misma capa; y un tipo de red recurrente que presenta al menos un ciclo cerrado de activación neuronal, es decir, la información puede circular entre las capas de neuronas en cualquier sentido.

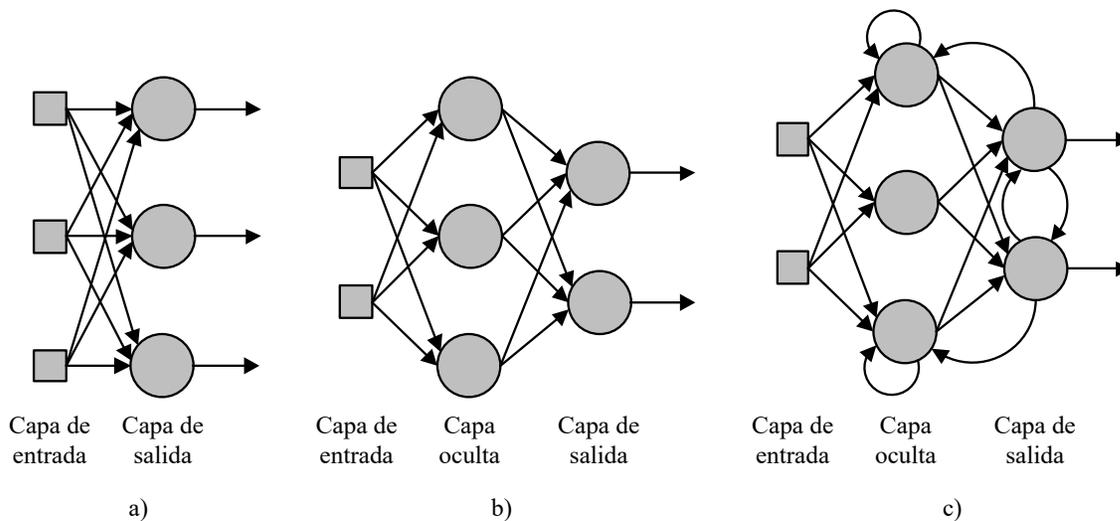


Figura 2.5. Topologías de ANNs: a) *Feedforward* monocapa; b) *Feedforward* multicapa; c) Recurrente

- Entrenamiento. Una vez determinada la arquitectura de la red y las funciones que la registrarán, se tiene que proceder a entrenarla mediante un procedimiento que ajuste los pesos de sus interconexiones para que “aprenda” el comportamiento que debe tener; es decir, para que proporcione la respuesta deseada a los estímulos o patrones de entrada que se le presenten. Las ANNs pueden ser entrenadas mediante entrenamiento supervisado o no supervisado [Gestal 2009].
 - Entrenamiento supervisado. En esta clase de entrenamiento, se le indican a la red las salidas que debe proporcionar ante las entradas que se le muestran.

Se observa su respuesta y se determina la diferencia entre ésta y la respuesta deseada para calcular el error y reducirlo con un algoritmo de aprendizaje apropiado como el *Backpropagation* (véase Fig. 2.6). Cuando los pesos de las conexiones de todas las neuronas se estabilizan en torno a unos valores óptimos, se dice que el algoritmo de aprendizaje converge y se puede dar por terminada la fase de entrenamiento.

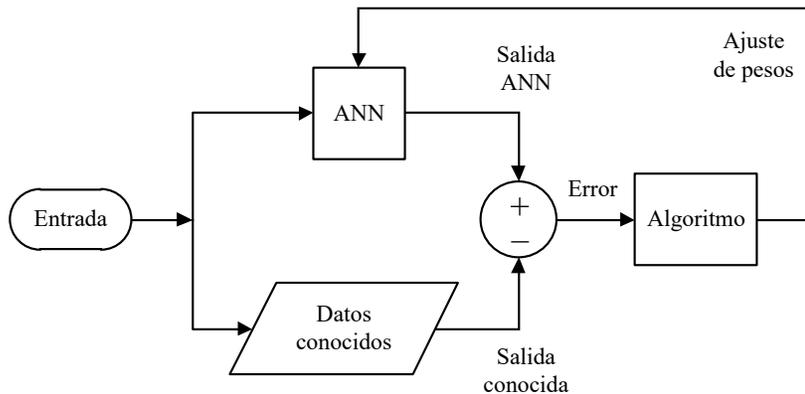


Figura 2.6. Entrenamiento supervisado de una ANN

- Entrenamiento no supervisado. En este tipo de entrenamiento no se especifica a la red cual debe ser la respuesta correcta; es decir, no hay una comparación entre la respuesta de la red y la respuesta deseada. En este caso, la red determina sus propias asociaciones agrupando, según sus características, las diferentes entradas. Por supuesto, los algoritmos de aprendizaje son diferentes a los utilizados con el modelo de entrenamiento supervisado.
- Validación. Tras la fase de entrenamiento se presenta la fase de validación donde, gracias a los ejemplos aprendidos en el entrenamiento, la ANN deberá ser capaz de generalizar y dar respuestas correctas ante estímulos nuevos.

Se debe tener en cuenta que es muy difícil conseguir la capacidad de generalización de una red sin utilizar grandes cantidades de datos y que éstos sean muy variados.

Etapa de ejecución

Para operar con una red entrenada se le presentará información de entrada, sólo que ahora

no se realizará ningún ajuste en los pesos de las interconexiones. La red reconocerá o evaluará y dará una respuesta a partir de los pesos establecidos durante el entrenamiento.

Para conseguir el mejor rendimiento de generalización, los datos usados para el entrenamiento deben cubrir un rango de hechos suficientemente amplio. En general, cuando aumenta el tamaño y variedad del conjunto de datos de entrenamiento, disminuye la necesidad de que los datos de entrada, durante la fase de ejecución normal, se parezcan mucho a los del mencionado conjunto; es decir, la red generalizará mejor. Si los datos de un problema se diferencian demasiado de todos los patrones de entrenamiento, la red tendrá dificultades para encontrar la respuesta correcta.

2.5.2. Algoritmos genéticos (GAs)

Los GAs son métodos adaptativos que pueden usarse para resolver problemas de búsqueda y optimización. Están basados en el proceso genético de los seres vivos [ISG, 2004]. A lo largo de las generaciones, las poblaciones evolucionan en la naturaleza de acuerdo con los principios de la selección natural o la supervivencia de los más adaptados, postulados por Ch. Darwin en 1859.

En [Koza, 1992] se define formalmente un GA como: un algoritmo matemático que transforma un conjunto de individuos o población (colección de objetos matemáticos representando un individuo), cada uno de los cuales tiene asociado un valor de adaptación, en una nueva población (la siguiente generación) utilizando una serie de operadores basados en los principios darwinianos de supervivencia del más adaptado.

2.5.2.1 Funcionamiento

Los GAs emplean una analogía directa con el comportamiento natural. Trabajan con una población de individuos, cada uno de los cuales representa una solución factible a un problema dado y tiene un conjunto de características que se almacenan en unas unidades llamadas genes, que a su vez se agrupan formando unos conjuntos llamados cromosomas.

La representación de cada individuo juega un papel clave en un GA, puesto que ha de ser capaz de representar toda la variedad posible de soluciones a un problema, así como las características deseadas en la solución final. A cada individuo se le asigna un valor o puntuación, relacionado con la aptitud de dicha solución. Cuanto mayor sea la adaptación

de un individuo al problema, mayor será la probabilidad de que sea seleccionado para reproducirse, cruzando su material genético con otro individuo seleccionado de la misma forma, y de que su material genético se propague en sucesivas generaciones.

La principal peculiaridad de un GA es el uso de un operador de cruzamiento, también llamado de recombinación, como mecanismo fundamental de búsqueda encargado de construir una descendencia a partir de una población, de forma que se mantengan ciertas de sus características. Adicionalmente al operador de cruzamiento, se utiliza un operador de mutación que se ocupará de mantener un nivel de diversidad adecuado en cada población. Posteriormente, mediante el operador de selección, se escogen subconjuntos de individuos (progenitores) de acuerdo a su valor de aptitud, para combinarlos y producir nuevos individuos (descendencia) que posean características de ambos. De esta manera, se produce una nueva población de posibles soluciones, la cual reemplaza a la anterior y verifica la interesante propiedad de que contiene una mayor proporción de buenas características. Así a lo largo de las generaciones las buenas características se propagan a través de las nuevas poblaciones.

Con todo esto, un esquema del funcionamiento general de un GA es el siguiente (véase Fig. 2.7) [Holland, 1975]:

Algoritmo genético:

- Generar una población inicial.
- Evaluar cada individuo de la población.
- Seleccionar los progenitores.
- Aplicar los operadores de cruzamiento y de mutación a estos progenitores.
- Incluir la nueva descendencia para formar una nueva generación (reemplazo).
- Iterar hasta un criterio de paro.

De acuerdo al proceso descrito anteriormente, los GAs son capaces de ir creando soluciones para problemas del mundo real. Favoreciendo el cruce de los individuos mejor adaptados, van siendo exploradas las áreas más prometedoras del espacio de búsqueda. Si el GA ha sido bien diseñado, la población convergerá hacia una solución óptima del problema.

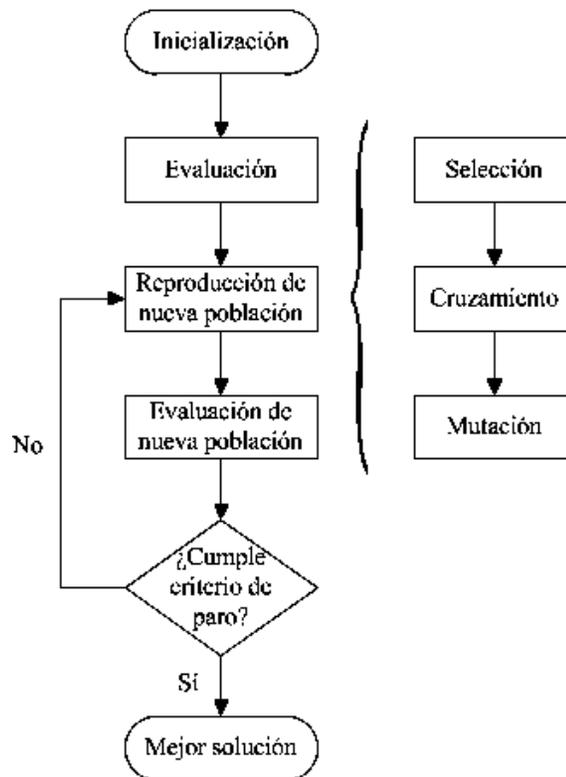


Figura 2.7. Proceso de un GA básico

La capacidad de los GAs proviene del hecho de que se trata de una técnica robusta, es decir, equilibrada entre la eficiencia y la eficacia suficiente para tratar con éxito una gran variedad de problemas provenientes de diferentes áreas [Goldberg, 1989]. Si bien no se garantiza que el GA encuentre la solución óptima del problema, existe evidencia empírica de que se encuentran soluciones de un nivel aceptable, en un tiempo competitivo con el resto de algoritmos de optimización. El gran campo de aplicación de los GAs se relaciona con aquellos problemas para los cuales no existen técnicas especializadas [ISG, 2004].

En los siguientes apartados se describirá con más detalle cada uno de los elementos de un GA básico.

2.5.2.2 Tipos de representación

Antes de aplicar un GA para solucionar un problema, es necesario codificar sus individuos (posibles soluciones). Cualquier solución potencial puede ser representada dando valores a una serie de parámetros, los genes. El conjunto de todos los parámetros se codifica en un cromosoma. El conjunto de los parámetros representado por un cromosoma particular

recibe el nombre de genotipo, conteniendo la información necesaria para la construcción del individuo; es decir, la solución real al problema, denominada fenotipo.

En general, una representación ha de ser capaz de identificar las características constituyentes de un conjunto de soluciones, de forma que distintas representaciones dan lugar a distintas perspectivas y por tanto distintas soluciones. Se pueden considerar tres tipos básicos de representaciones [Caballero *et al.*, 2003]:

- Representación binaria: Cada gen es un valor 1 ó 0.

1	0	1	1	0	0	...	0
---	---	---	---	---	---	-----	---

- Representación entera: Cada gen es un valor entero.

1	0	3	-1	0	4	...	5
---	---	---	----	---	---	-----	---

- Representación real: Cada gen es un valor real.

1.7	2.6	7	0	1.2	6.5	...	-4
-----	-----	---	---	-----	-----	-----	----

2.5.2.3 Población

La composición inicial y su tamaño son los aspectos más importantes a considerar relacionados con la población de un GA.

- Población inicial. Es la fuente principal de material genético y está constituida por un conjunto de cromosomas que representan posibles soluciones del problema. Es importante garantizar que tenga diversidad estructural para considerar una representación de la mayor parte de la población posible. Puede ser creada de diversas formas; por ejemplo, utilizar una generación predefinida o generar alguna parte de cada individuo y luego aplicar una búsqueda local. Sin embargo, habitualmente se genera un valor aleatorio para cada gen de cada individuo de la población [Goldberg, 1989].
- Tamaño de la población. Debe de ser suficiente para garantizar la diversidad de las posibles soluciones. Parece intuitivo que las poblaciones pequeñas corren el riesgo

de no cubrir adecuadamente el espacio de búsqueda, mientras que el trabajar con poblaciones de gran tamaño puede acarrear problemas relacionados con el excesivo costo computacional [ISG, 2004].

2.5.2.4 Función de evaluación

La función de evaluación debe ser diseñada para cada problema de manera específica y constituye una forma de medir la adaptación de cada uno de los individuos; es decir, la calidad de cada solución del problema y depende fundamentalmente de la representación elegida, puesto que la única información que puede evaluar esta función va a ser la contenida en los genes de la representación utilizada. Cuando se utiliza un GA para resolver un problema de optimización, la función de evaluación será la función a optimizar $f(x)$, aunque dicha función puede ser modificada para penalizar de cierta forma la violación de restricciones o para fomentar la diversidad [Caballero *et al.*, 2003].

2.5.2.5 Operador de selección

El operador de selección es el encargado de transmitir y conservar aquellas características de las soluciones que se consideran valiosas a lo largo de las generaciones. El principal medio para que la información útil se transmita es que aquellos individuos mejor adaptados (mejor valor de función de evaluación) tengan más probabilidades de reproducirse. Sin embargo, es necesario también incluir un factor aleatorio que permita reproducirse a individuos que aunque no estén muy bien adaptados, puedan contener alguna información útil para posteriores generaciones, con el objeto de mantener además una cierta diversidad en cada población. Existen numerosos operadores de selección, así como innumerables combinaciones de los mismos, algunos de ellos son [Caballero *et al.*, 2003] [ISG, 2004]:

- Selección proporcional o ruleta.
- Selección por *ranking*.
- Selección por torneo.
- Selección uniforme estocástica.
- Selección elitista.

2.5.2.6 Operador de cruzamiento

Una vez seleccionados los individuos, éstos son recombinados para producir la descendencia que se incorporará en la siguiente generación. El operador de cruzamiento permite realizar una exploración de toda la información almacenada hasta el momento en la población y combinarla para crear mejores individuos. Dentro de los métodos de cruzamiento habituales se destacan los siguientes [Caballero *et al.*, 2003] [ISG 2004]:

- Cruce de un punto.
- Cruce de n puntos.
- Cruce uniforme.

2.5.2.7 Operador de mutación

El objetivo del operador de mutación es producir nuevas soluciones a partir de la modificación de un cierto número de genes de una solución existente, con la intención de fomentar la variabilidad dentro de la población. Existen muy diversas formas de realizar la mutación; desde la más sencilla (puntual), donde cada gen muta aleatoriamente con independencia del resto de genes, hasta configuraciones más complejas donde se toma en cuenta la estructura del problema y la relación entre los distintos genes [Caballero *et al.*, 2003]. La Fig. 2.8 muestra la mutación del cuarto gen del cromosoma en el descendiente.

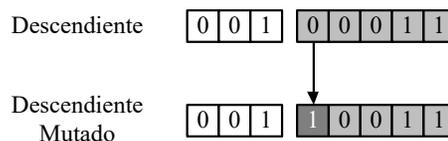


Figura 2.8. Operador de mutación

2.5.2.8 Reemplazo de la población

Cada vez que se aplican los operadores de cruzamiento y de mutación, se tiene un número de nuevos individuos (la descendencia) que se incorporarán en la población para formar la siguiente generación mediante un proceso de reducción al tamaño de la población original. Para llevar a cabo dicho proceso existen tres métodos fundamentales [Caballero *et al.*, 2003]:

- Cuando la cantidad de individuos llega a un cierto número, se elimina un subconjunto de la población conteniendo a los individuos peor adaptados.
- Cada vez que se crea un nuevo individuo, se elimina el peor adaptado para dejar su lugar en la población a este nuevo individuo.
- Cada vez que se crea un nuevo individuo, se elimina aleatoriamente una solución de la población, independientemente de su adaptación.

2.5.2.9 Criterio de paro

Generalmente el criterio de paro está determinado por razonamientos *a priori* sencillos, como alcanzar un número máximo de generaciones, un tiempo máximo de resolución o, más eficientemente, por estrategias relacionadas con indicadores del estado de evolución de la población; como el no presentarse un cambio acumulativo en el valor de su aptitud menor a una tolerancia preestablecida, porque el valor de la aptitud no cambie durante el transcurso de las generaciones, o bien, las restricciones son violadas en menor medida que un valor de tolerancia. También un GA se puede detener por la pérdida de diversidad en la población, siendo por lo general una condición mixta lo más utilizado, es decir, limitar el tiempo de ejecución a un número de iteraciones y tener en cuenta algún indicador del estado de la población para considerar la convergencia antes de alcanzar tal limitación [Caballero *et al.*, 2003].

2.6. Conclusiones

En este capítulo se mostró un panorama general acerca de las depresiones de voltaje revisando su origen, consecuencias, caracterización y clasificación. Además, también se revisaron las diferentes estrategias para mitigar este fenómeno en distintas partes de una red eléctrica, una de estas estrategias es la utilización de dispositivos FACTS.

Se expusieron también los conocimientos básicos relacionados con las ANNs y los GAs, aunque la variedad de conceptos acerca de estas estrategias, así como las diferentes combinaciones de ellas y el número de aplicaciones, es enorme en la literatura. En esta tesis se utilizan las rutinas del ambiente MATLAB®, correspondientes a las mencionadas técnicas de AI, en las implementaciones realizadas.

CAPÍTULO 3

Mitigación de depresiones de voltaje en nodos de carga

En este capítulo se muestra la aplicación de DVRs como una solución a problemas de PQ en nodos de carga, especialmente para mitigar depresiones de voltaje; se describe su topología y el método de control convencional, además se presenta la propuesta de un esquema de control basado en ANNs. También se revisan algunas de las nuevas topologías, basadas en convertidores directos CA/CA, y métodos de control emergentes para esta clase de dispositivos.

Asimismo, durante el desarrollo del capítulo se presentan varias simulaciones, en el ambiente MATLAB Simulink®, que permiten observar el funcionamiento de las implementaciones realizadas.

3.1. Restauradores dinámicos de voltaje (DVRs)

El DVR es uno de los dispositivos FACTS que recientemente ha emergido como una solución económicamente efectiva para la mitigación de depresiones de voltaje y otros fenómenos de PQ que ocurren en una red eléctrica, brindando la oportunidad de proteger cargas sensibles de gran potencia frente a estas variaciones de voltaje en el punto donde se conectan, evitando que lleguen a los sistemas eléctricos de las plantas industriales.

Un DVR se conecta en serie entre el suministro y la carga sensible para inyectar un voltaje, de características apropiadas, a través de un transformador (véase Fig. 3.1) y mantener el voltaje nominal en la carga durante un disturbio.

Convencionalmente, un DVR está constituido por los siguientes elementos [Nielsen y Blaabjerg, 2005]:

- Convertidor fuente de voltaje (VSC). Es una unidad de conversión CD/CA basada en un sistema de almacenamiento de energía que es suministrada cuando se requiere

la compensación de voltaje y puede ser obtenida a partir de baterías, capacitores u otras formas de almacenamiento. También consta de un inversor trifásico de voltaje, generalmente constituido de Transistores Bipolares de Compuerta Aislada (IGBTs, por sus siglas en inglés) controlados por la técnica PWM. En esta tesis la técnica SPWM es utilizada para controlar el inversor.

- Filtro pasivo LC. Es un arreglo de inductancias L y capacitancias C , utilizado para remover las altas frecuencias en la salida del inversor.
- Transformador de inyección. Es un transformador trifásico cuyo devanado de alto voltaje se conecta en serie con el suministro, mientras que el devanado de bajo voltaje se conecta al filtro LC colocado en la salida del inversor. Se debe tomar en cuenta que este transformador de inyección puede causar caídas de voltaje que deben ser consideradas en el control para compensación de voltaje del DVR.
- Sistema de control. Consiste de dos etapas, la primera de ellas controla la salida del VSC para realizar la compensación de voltaje y la segunda se encarga de detectar los disturbios.

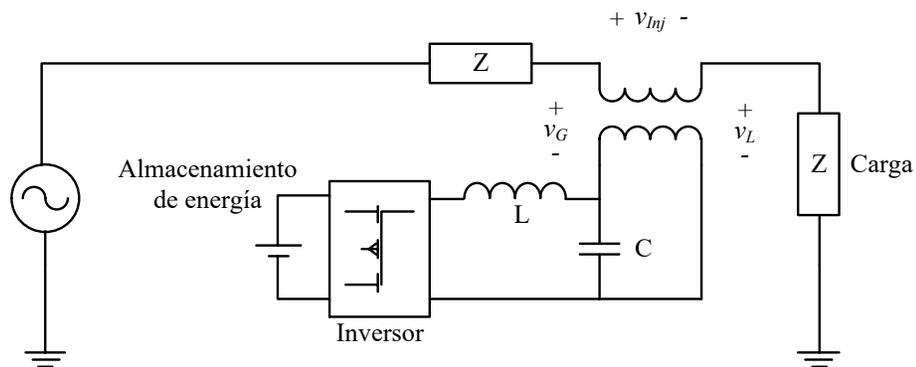


Figura 3.1. Topología convencional y conexión de un DVR

Para la topología convencional del DVR de la Fig. 3.1, el voltaje en las terminales de la carga v_L es la suma del voltaje del suministro v_G , y el voltaje inyectado por el DVR v_{Inj} , esto es:

$$v_L = v_G + v_{Inj} \quad (3.1)$$

Un DVR es diseñado para operar dentro de un cierto rango, desde un máximo hasta un mínimo de magnitud y duración del disturbio. Algunos aspectos prácticos adicionales sobre el DVR se muestran, por ejemplo, en [Middlekauff y Collings, 1998] [Nielsen y Blaabjerg, 2005].

Es importante mencionar que existen otras topologías de DVRs que no incluyen unidades de almacenamiento de energía, en donde el voltaje inyectado se obtiene directamente del mismo suministro a través de un rectificador [Nielsen y Blaabjerg, 2005] [Babaei *et al.*, 2010]. Ejemplos de estas otras topologías se muestran posteriormente en la Sección 3.3.

3.1.1. Método de control convencional

La transformación de Park $dq0$ es una de las técnicas que se utilizan para el control de un DVR.

La Ec. (3.2) define la transformación de un sistema trifásico abc , a un marco de referencia estático $dq0$. En esta transformación la fase a se alinea al eje d que está en cuadratura con el eje q . El ángulo θ se define como el ángulo entre la fase a y el eje d .

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

La Fig. 3.2 muestra el diagrama de flujo de la técnica de control para DVRs basada en la transformación mencionada. Esta técnica proporciona la profundidad de la depresión de voltaje y la información de cambio de fase con los tiempos de inicio y finalización. Las cantidades se expresan en vectores instantáneos. En primer lugar se convierten los voltajes del sistema de referencia abc a referencia $dq0$; para simplificar, los componentes de secuencia cero no son tomados en cuenta [Omar *et al.*, 2009]. El Lazo de Seguimiento de Fase (PLL, por sus siglas en inglés) se utiliza para generar una onda senoidal en fase con el voltaje del suministro [Omar *et al.*, 2009] y la señal de error se dispone como señal de

modulación, que mediante la técnica SPWM permite generar un patrón de conmutación adecuado para el VSC.

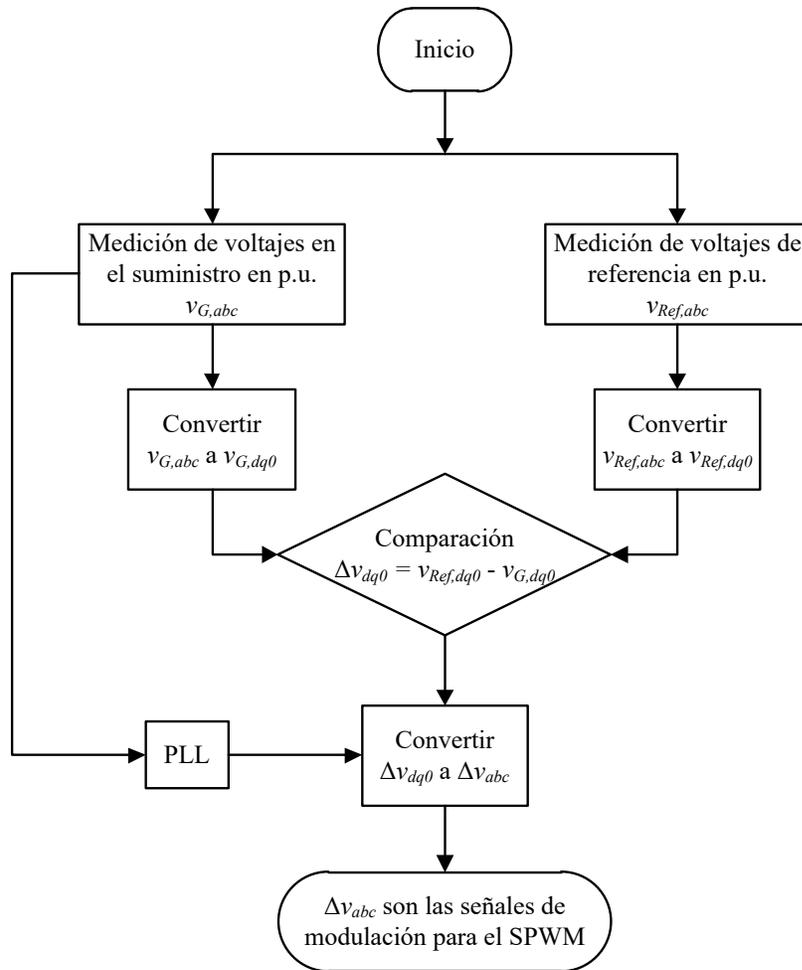


Figura 3.2. Diagrama de flujo del esquema de control basado en la transformación $dq0$ para un DVR

Por otra parte, la detección de los disturbios se lleva a cabo en cada una de las fases y consiste en la comparación entre una referencia y el voltaje eficaz medido en las terminales de la carga sensible. Por ejemplo, las depresiones de voltaje se detectan cuando el voltaje del suministro cae por debajo del 90% de su valor de referencia.

3.1.2. Simulación

Para ilustrar el funcionamiento del DVR se han llevado a cabo varias simulaciones en el ambiente MATLAB Simulink®. La Fig. 3.3 muestra el suministro eléctrico que alimenta una carga RL conectada en estrella, sensible a fenómenos de PQ, a través de un DVR convencional; se utiliza una fuente de voltaje trifásica programable para simular las diferentes condiciones de falla y también se observan la impedancia de la línea de transmisión y los medidores de voltaje en el suministro y en la carga.

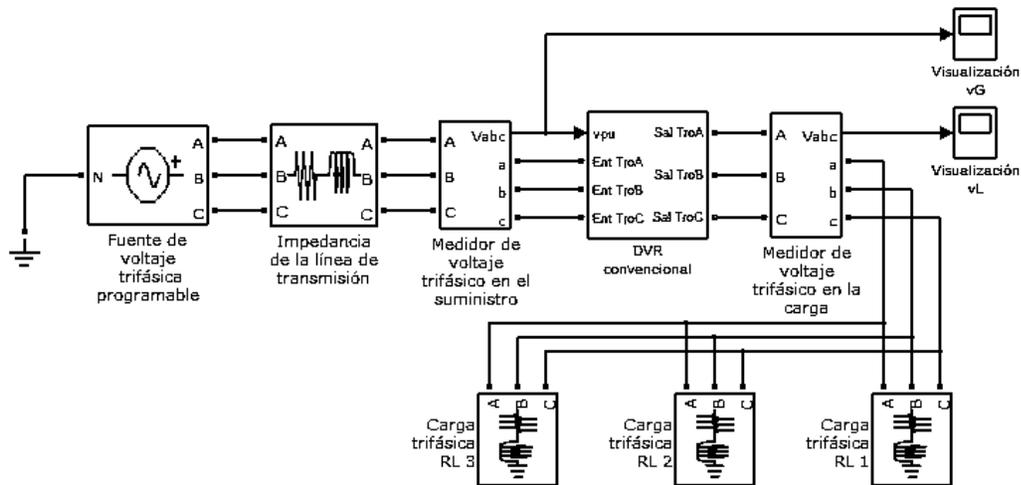


Figura 3.3. Suministro eléctrico alimentando una carga RL a través de un DVR convencional

La Fig. 3.4 muestra la implementación del DVR constituido por una fuente de voltaje de CD (unidad de almacenamiento de energía), un inversor compuesto por IGBTs, un filtro RLC, interruptores de *bypass* y un transformador trifásico para la inyección de voltaje en serie con el suministro; adicionalmente, también se observan las etapas correspondientes al control del VSC y a la detección de los disturbios. Los parámetros de simulación se listan en la Tabla 3.1.

La Fig. 3.5 muestra la implementación, de acuerdo al diagrama de bloques de la Fig. 3.2, del esquema de control en base a la transformación $dq0$, constituido por una fuente de voltaje de referencia, un PLL, los bloques correspondientes de transformación $abc-dq0$, y viceversa, y un generador de pulsos PWM discreto; además, se observan algunos bloques para operaciones algebraicas y mediciones.

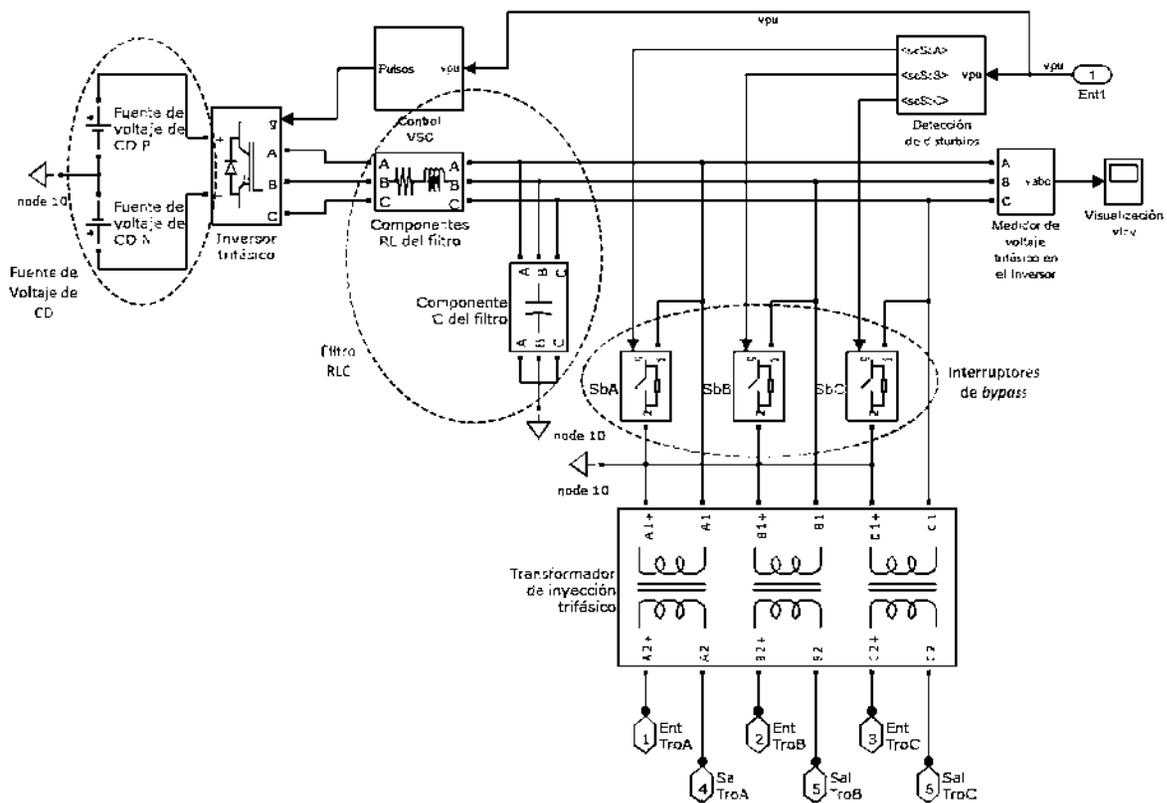


Figura 3.4. Implementación de la topología convencional de un DVR

Tabla 3.1. Parámetros de simulación de la topología convencional de un DVR

Voltaje (línea a línea)	200 V
Frecuencia	50 Hz
Resistencia de la línea	1e-3 Ω
Inductancia de la línea	1e-6 H
Voltaje de CD	800V
Resistencia del filtro	0.1 Ω
Inductancia del filtro	8e-3 H
Capacitancia del filtro	11e-6 F
Relación de transformación del transformador de inyección	1:1
Carga sensible	4250 W
Factor de potencia	0.85
Tiempo de muestreo	5e-6 s

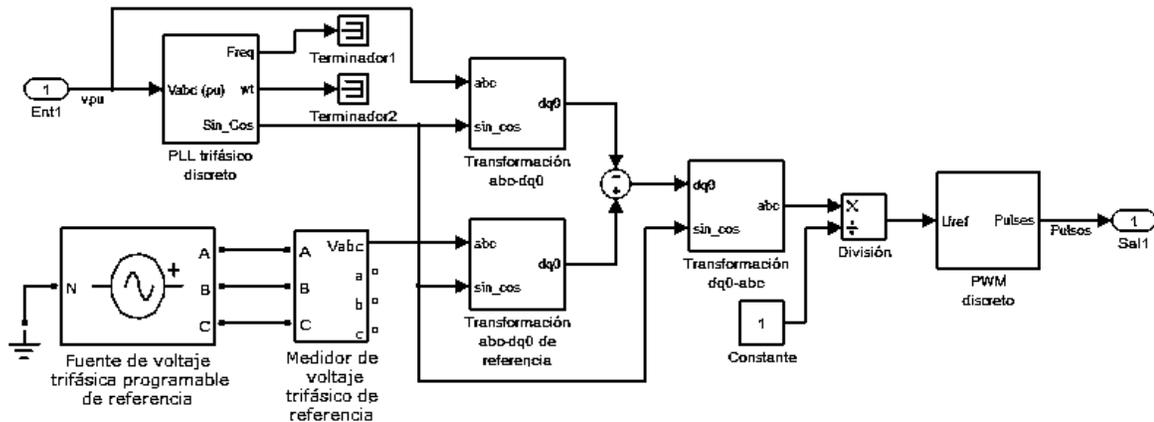


Figura 3.5. Implementación del esquema de control basado en la transformación $dq0$ para un DVR de topología convencional

En la Fig. 3.6 se ilustra el funcionamiento del DVR cuando ocurre una depresión de voltaje simétrica del 20% de profundidad en el suministro eléctrico. El disturbio ocurre al finalizar el segundo periodo y se mantiene durante cinco ciclos. Se muestra el voltaje que alimenta a la carga, observándose que durante el disturbio no permanece en su valor nominal, aunque la acción correctiva del DVR es suficiente para ya no considerarse como una depresión de voltaje. Esta diferencia puede deberse a las caídas de voltaje presentes en los elementos que conforman el dispositivo como son: el transformador de inyección, el filtro LC y los interruptores de *bypass*.

La Fig. 3.7 muestra la compensación de voltaje realizada por el DVR cuando una depresión simétrica del 50% de profundidad se presenta en el suministro. El disturbio tiene una duración de cinco ciclos a partir del tercer periodo. Se ilustra el voltaje en la carga resultado de la compensación realizada por el DVR. Se puede observar que el voltaje rms de la fase *a* presenta un retardo significativo (de un ciclo) en su medición, lo que puede ser el origen de los picos de voltaje indeseados y de la compensación errónea, tanto al inicio como al final del disturbio. Sin embargo, cuando se tiene una buena medición, el voltaje de la carga se mantiene en su valor nominal (1 p.u.) como resultado de la acción del dispositivo.

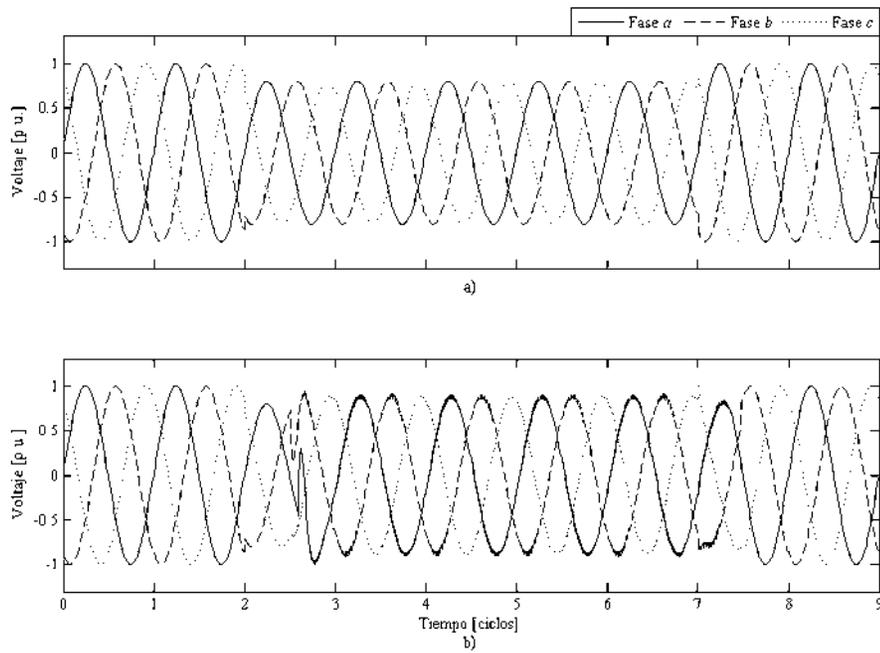


Figura 3.6. Compensación de una depresión de voltaje simétrica ($h = 0.2$, $\Delta t = 5$ ciclos): a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga.

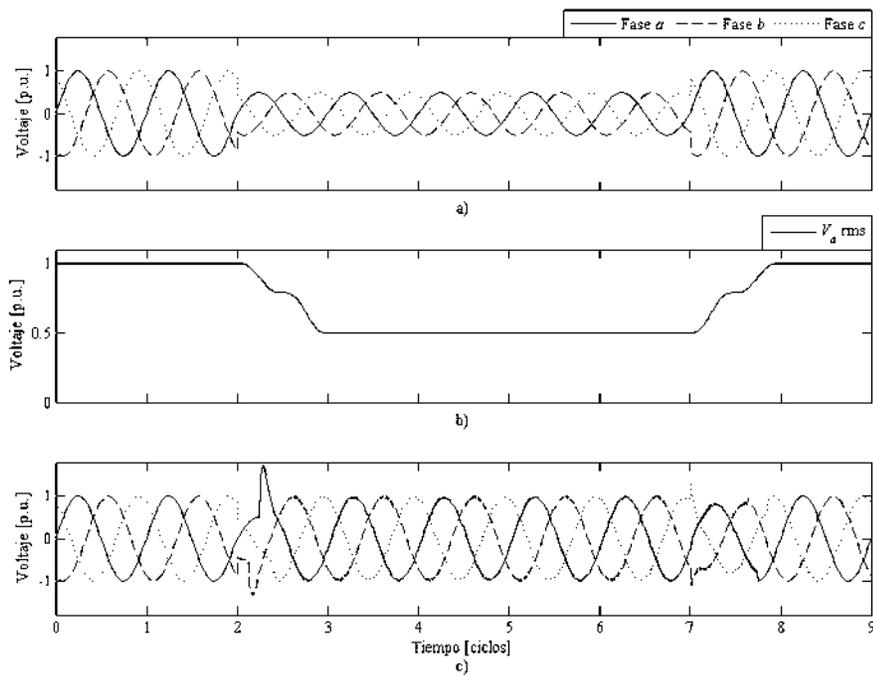


Figura 3.7. Compensación de una depresión de voltaje simétrica ($h = 0.5$, $\Delta t = 5$ ciclos): a) Voltaje del suministro; b) Medición del voltaje rms en la fase a del suministro; c) Voltaje en la carga

En la Fig. 3.8 se ilustra el funcionamiento del DVR cuando en el suministro ocurre una depresión de voltaje asimétrica del 50% de profundidad en la fase a . El disturbio se presenta durante cinco ciclos a partir del tercer periodo. Se muestra el voltaje en la carga resultado de la compensación realizada por el DVR. Como en el caso de la depresión simétrica, se puede observar que se presentan picos de voltaje indeseables al inicio y al final de la compensación, aunque el voltaje en la carga permanece en su valor nominal durante la mayor parte del tiempo en el que ocurre el disturbio.

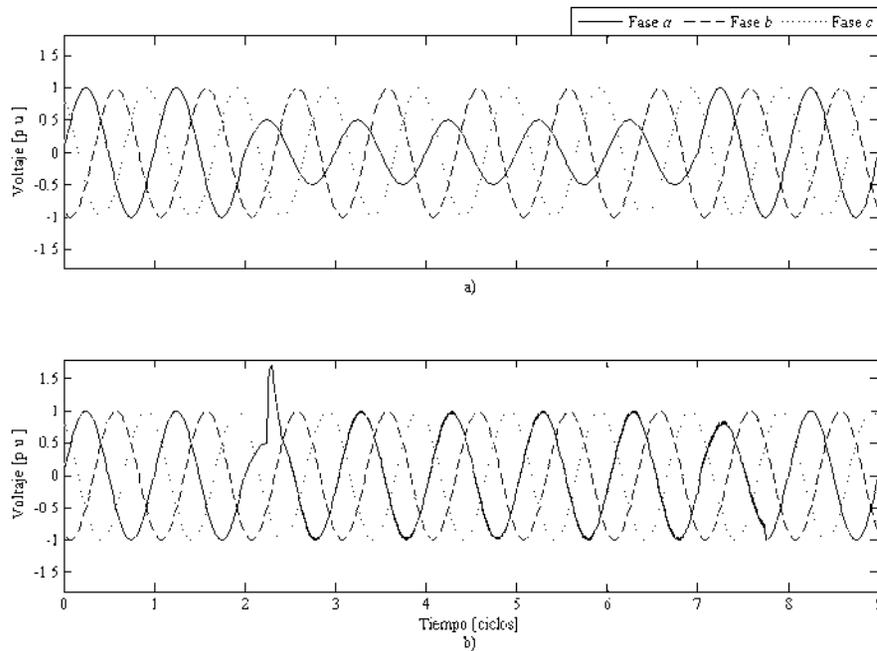


Figura 3.8. Compensación de una depresión de voltaje asimétrica ($h = 0.5$, $\Delta t = 5$ ciclos): a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga

3.2. Propuesta e implementación de un esquema de control basado en ANNs

En esta tesis se realiza la propuesta e implementación de un esquema de control basado en ANNs para un DVR de topología convencional empleando las herramientas del “*Neural Network Toolbox*” de MATLAB® [MathWorks 2008b]. Las ANNs son utilizadas tanto en la etapa de control del VSC, como también en la etapa de detección del disturbio, con la finalidad de lograr la mitigación completa y casi instantánea de depresiones y elevaciones de voltaje cuando se considera una caracterización no ideal, tanto de los componentes de la red eléctrica como de los elementos que constituyen el dispositivo. Esto representa una

ventaja respecto al funcionamiento de un DVR controlado con un esquema basado en la transformación $dq0$, en el cual se pueden presentar retardos en la detección de los disturbios y diferencias entre el voltaje compensado y el requerido por la carga.

3.2.1. Etapa de control del VSC

En la implementación de esta etapa de control, las ANNs se utilizan en el cálculo del voltaje de compensación suministrado por el VSC, evitando que las posibles caídas de voltaje en el transformador de inyección y en otros componentes del DVR, como el filtro LC, afecten en la compensación de voltaje en la carga cuando se presenta un disturbio. A continuación se describen las características y el proceso de creación de las ANNs para esta etapa de control:

- Conjunto de datos de entrenamiento “*Trainingset*”. Está compuesto por mediciones discretas de voltaje rms en cada fase en el lado del suministro eléctrico (entradas) y por los voltajes de compensación correspondientes (salidas) obtenidos a partir de las diferencias respecto al valor nominal, del voltaje en el suministro y del voltaje en la carga. Las diversas condiciones de falla fueron simuladas con una fuente programable comprendiendo voltajes entre 0.1 y 1.8 p.u. con la finalidad de cubrir la mayoría de valores posibles de acuerdo a las definiciones de depresiones y de elevaciones de voltaje. La Fig. 3.9 muestra la implementación del esquema de medición mencionado y la Fig. 3.10 ilustra las mediciones de voltaje rms de acuerdo a las variaciones programadas en el suministro.

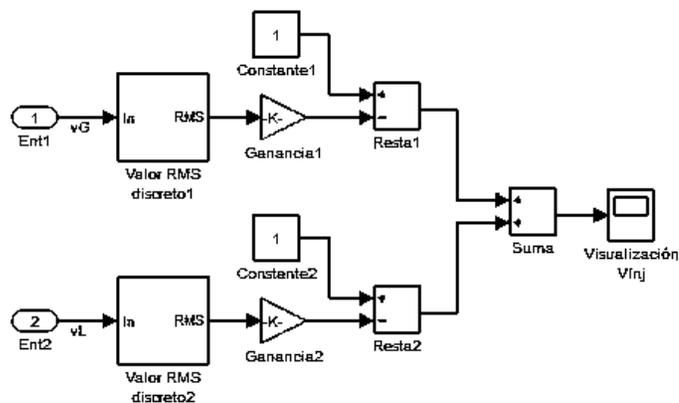


Figura 3.9. Implementación del esquema de medición para obtener el *trainingset* de la etapa de control del VSC

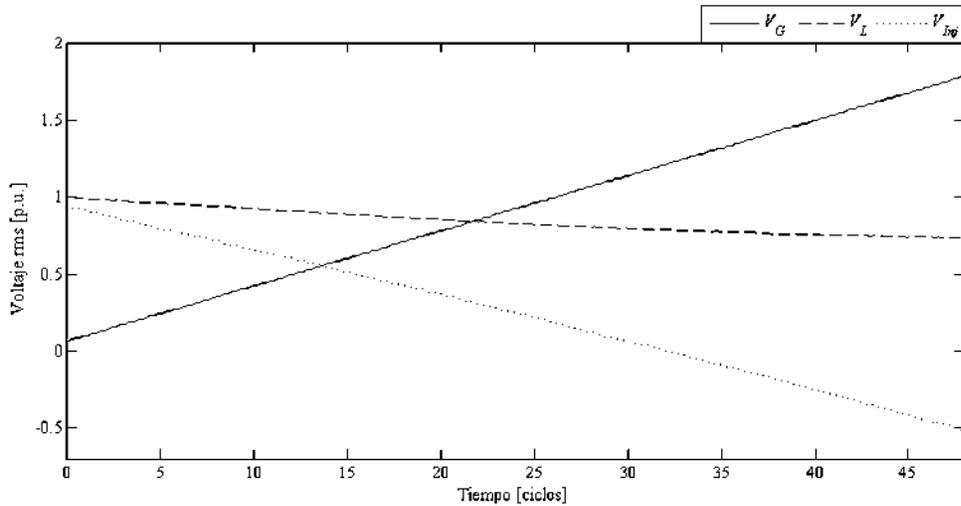


Figura 3.10. Mediciones de voltaje rms para obtener el *trainingset* de la etapa de control del VSC

- Arquitectura. En el diseño de la topología se propone utilizar ANNs *Feedforward Backpropagation* (creadas con la función “*newff*”) de una capa de entrada, una capa oculta de dos neuronas y una capa de salida. Se emplean las funciones de transferencia “*tansig*” para la capa oculta y “*pureline*” para la capa de salida; correspondientes a las opciones establecidas por *default*. La Fig. 3.11 muestra una representación esquemática y la implementación de la arquitectura en Simulink®.

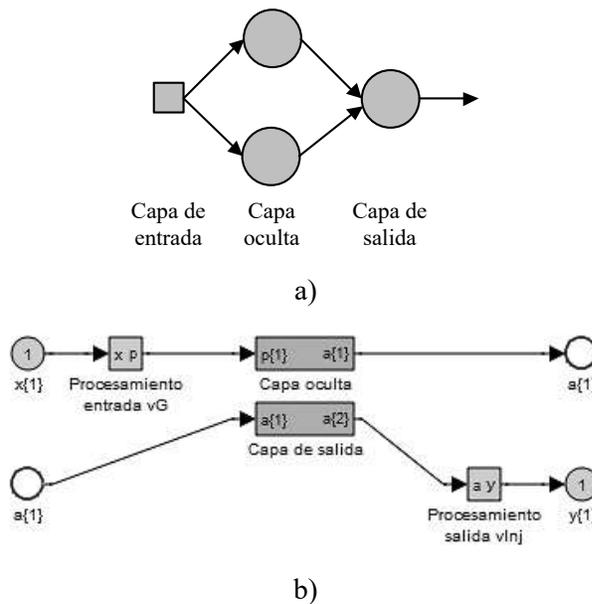


Figura 3.11. Topología de una ANN correspondiente a la etapa de control del VSC:

a) Representación esquemática; b) Implementación en Simulink®

- Entrenamiento. Ya que se cuenta con el *trainingset* y con la topología de la ANN, se procede al entrenamiento de la misma mediante la función “*trainln*”, establecida por *default*, que utiliza el algoritmo Levenberg-Marquardt [Lourakis, 2005] para ajustar los valores de los pesos y los *bias*. La Fig. 3.12 muestra la comparación entre la característica “entrada-salida” deseada y la obtenida mediante la ANN, observándose una buena aproximación, con un error relativo promedio de 0.41%, resultado del entrenamiento adecuado.

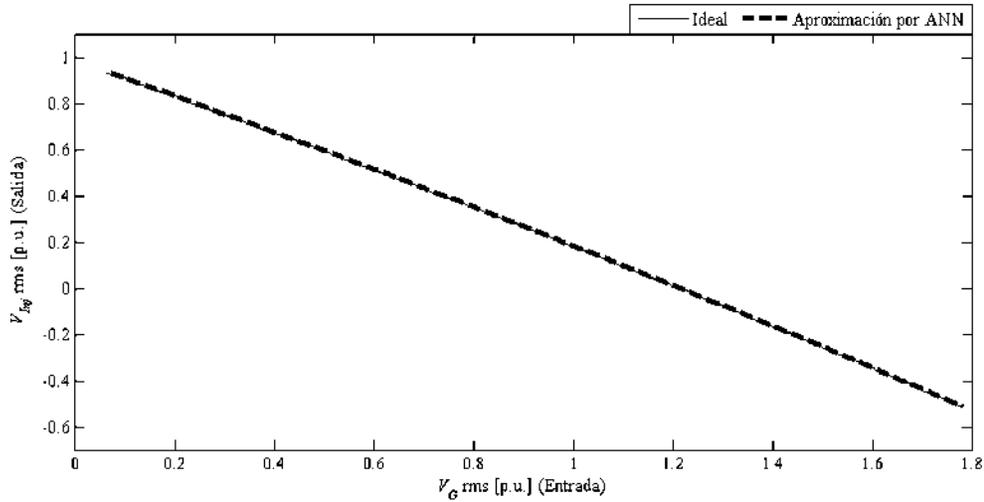


Figura 3.12. Característica entrada-salida de la etapa de control del VSC

La Fig. 3.13 muestra la implementación del esquema basado en ANNs para el control de la salida del VSC de un DVR y la compensación de voltaje posterior. Debido a que las ANNs tienen a su salida valores de voltaje rms p.u. (V_a, V_b, V_c), se debe agregar un bloque adicional, de acuerdo a la Ec. (3.3), para adecuar un voltaje trifásico de referencia al SPWM. La Fig. 3.14 muestra la implementación de éste bloque adicional.

$$\begin{aligned}
 v_a &= V_a \sin(\omega t) \\
 v_b &= V_b \sin(\omega t - 120^\circ) \\
 v_c &= V_c \sin(\omega t + 120^\circ)
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

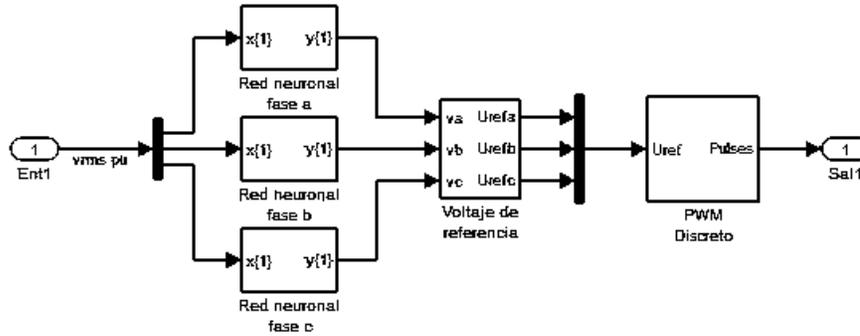


Figura 3.13. Implementación de la etapa de control del VSC utilizando ANNs

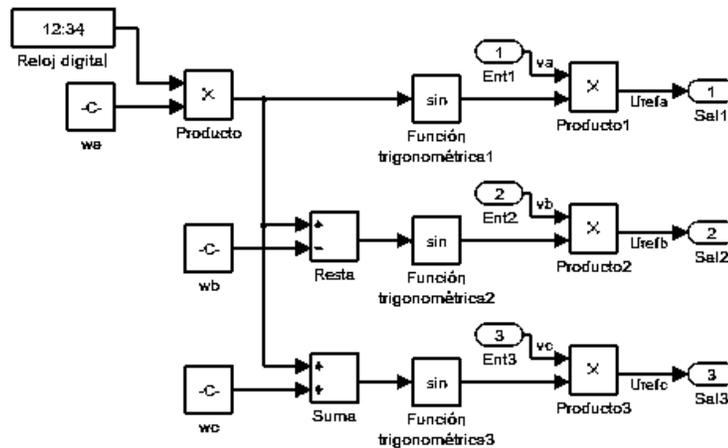


Figura 3.14. Bloque para adecuar el voltaje trifásico de referencia del SPWM

3.2.2. Etapa de control para detectar disturbios

En la implementación de esta etapa de control, las ANNs se utilizan para calcular el voltaje rms del suministro y detectar, casi instantáneamente, tanto el inicio como la finalización de los disturbios de acuerdo con [Chung *et al.*, 2007], evitando el retardo de un ciclo en la compensación de voltaje correcta realizada por el DVR cuando se utiliza para su control el esquema basado en la transformación $dq0$. A continuación se describen las características y el proceso de creación de las ANNs para esta etapa de control:

- Conjunto de datos de entrenamiento *trainingset*. Está compuesto por mediciones de voltaje en el lado del suministro y las mediciones correspondientes de ωt dentro del rango $0 \leq \omega t \leq \pi$ (entradas) considerando, de manera similar a la etapa de control del VSC, variaciones del tipo rampa desde 0.1 hasta 1.8 p.u. También se tienen las

mediciones de voltajes rms p.u. (salidas) correspondientes. La Fig. 3.15 muestra las mediciones que componen el *trainingset* mencionado.

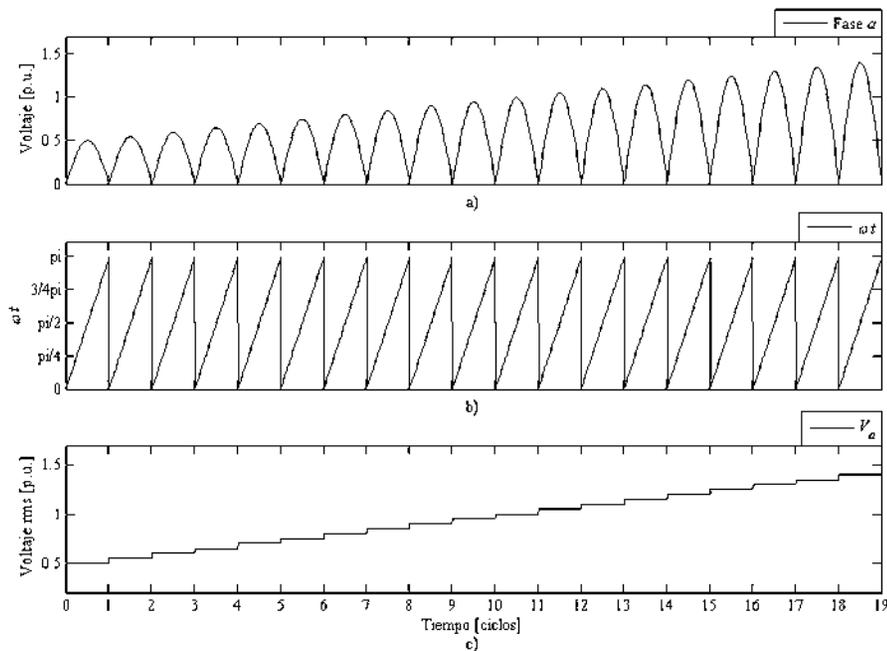


Figura 3.15. Mediciones que componen el *trainingset* de la etapa de control para detectar disturbios en la fase a : a) Voltaje instantáneo p.u.; b) ωt para cada ciclo; c) Voltaje rms p.u.

- **Arquitectura.** En el diseño de la topología se propone utilizar ANNs *Feedforward Backpropagation* de una capa de entrada de dos neuronas, dos capas ocultas de diez neuronas con funciones de transferencia “*tansig*” y una capa de salida con función de transferencia “*pureline*”; creadas con la función “*newff*”.
- **Entrenamiento.** Ya que se cuenta con el *trainingset* y con la topología de la ANN, se procede al entrenamiento de la misma mediante la función “*trainln*” que, como se mencionó anteriormente, utiliza el algoritmo Levenberg-Marquardt para ajustar los valores de los pesos y los *bias*. Un entrenamiento correcto permite la detección casi instantánea de disturbios mediante el cálculo de los voltajes rms p.u. La Fig. 3.16 muestra la salida característica del *trainingset*, observándose que la aproximación obtenida mediante la ANN se ajusta de buena forma a la salida deseada teniendo un error absoluto promedio de 0.08%.

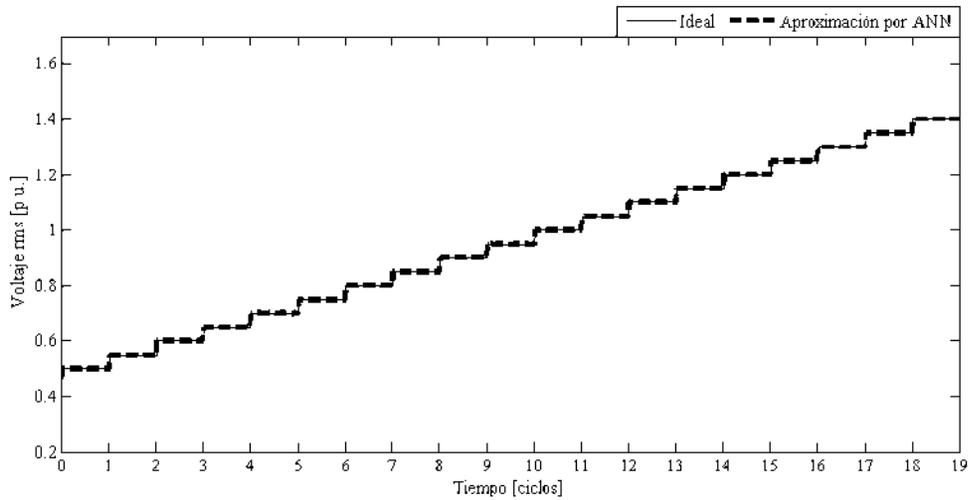


Figura 3.16. Característica de la salida de la etapa de control para detectar disturbios

La Fig. 3.17 muestra la implementación del esquema para calcular ωt y el voltaje rms p.u. en cada fase para la posterior detección de disturbios en base a ANNs. La Fig. 3.18 ilustra el bloque de la fase a , donde se puede observar la red neuronal con sus correspondientes entradas y su única salida, la detección de los disturbios se lleva a cabo cuando el voltaje del suministro cae por debajo del 0.9 p.u. o es superior al 1.1 p.u. de su valor de referencia.

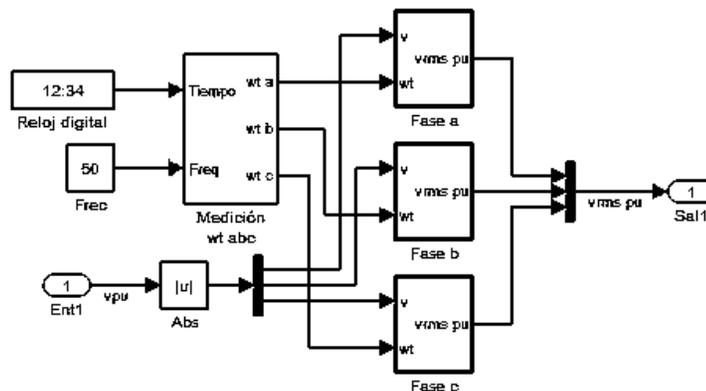


Figura 3.17. Implementación de la etapa de control para detectar disturbios utilizando ANNs

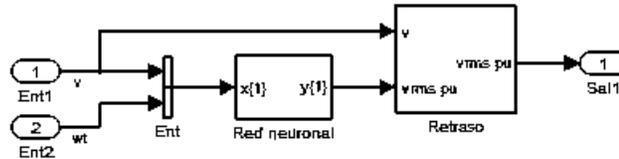


Figura 3.18. Implementación del esquema de cálculo del voltaje rms p.u. en la fase *a* utilizando una ANN

3.2.3. Simulación

Para ilustrar la operación del DVR controlado con el esquema basado en ANNs, descrito en esta sección, se llevaron a cabo varios casos de estudio en el ambiente MATLAB Simulink®.

En la Fig. 3.19 se ilustra el funcionamiento del DVR cuando ocurre una depresión de voltaje simétrica del 20% de profundidad en el suministro eléctrico. El disturbio ocurre al finalizar el segundo periodo y se mantiene durante cinco ciclos. Se muestra el voltaje que alimenta a la carga, observándose que permanece en su valor nominal (1 p.u.) como resultado de la acción correctiva del DVR. Cabe mencionar que en esta misma situación, con el DVR controlado por medio del esquema basado en la transformación $dq0$, no se logra compensar adecuadamente el disturbio (véase Fig. 3.6b).

La Fig. 3.20 muestra la compensación de voltaje realizada por el DVR cuando una depresión simétrica del 50% de profundidad se presenta en el suministro. El disturbio tiene una duración de cinco ciclos a partir del tercer periodo. Se ilustra que el voltaje en la carga se mantiene en su valor nominal (1 p.u.) como resultado de la acción del dispositivo. Se puede observar que debido al cálculo casi instantáneo del voltaje rms mediante ANNs, se logra la completa mitigación del disturbio sin que se presenten retardos o picos de voltaje indeseables.

En la Fig. 3.21 se ilustra el funcionamiento del DVR cuando en el suministro se presenta una depresión de voltaje asimétrica del 50% de profundidad en la fase *a*. El disturbio se presenta durante cinco ciclos a partir del tercer periodo. Se muestra el voltaje en la carga resultado de la compensación realizada por el DVR. Como en el caso de la depresión simétrica, el voltaje en la carga permanece en su valor nominal sin observarse picos de voltaje indeseados ni retardos en la completa mitigación del disturbio.

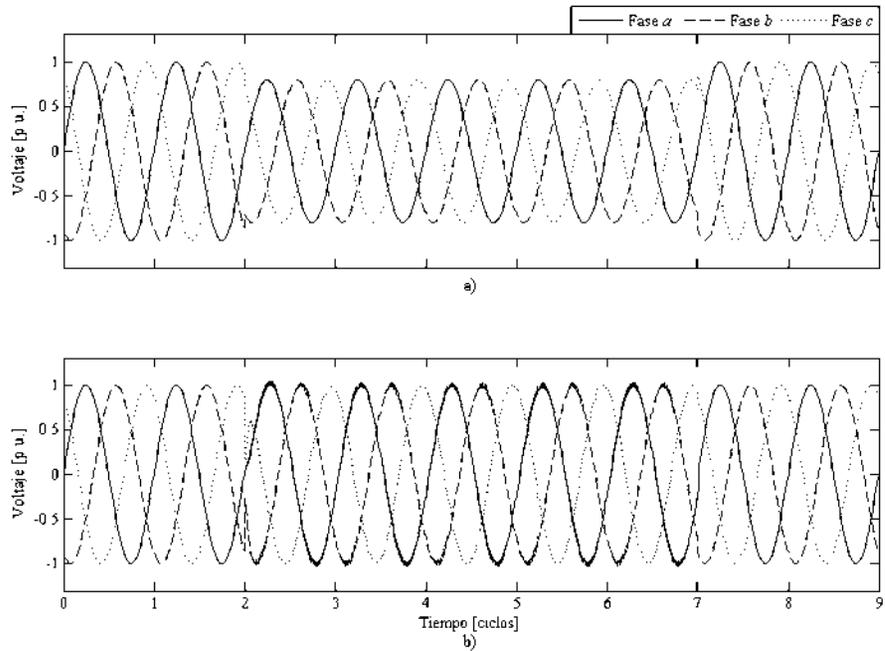


Figura 3.19. Compensación de una depresión de voltaje simétrica ($h = 0.2$, $\Delta t = 5$ ciclos) realizada por un DVR controlado con un esquema basado en ANNs: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga.

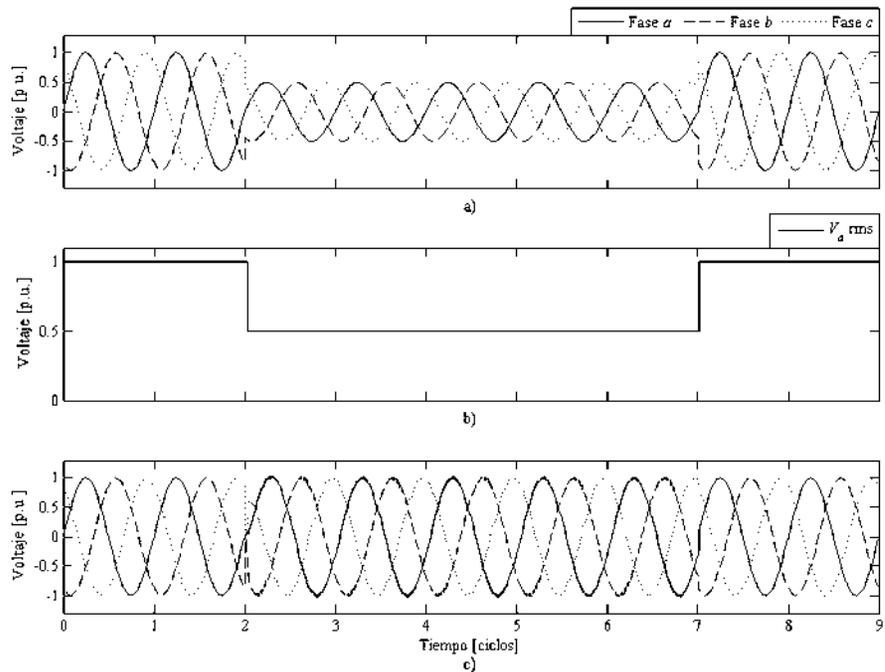


Figura 3.20. Compensación de una depresión de voltaje simétrica ($h = 0.5$, $\Delta t = 5$ ciclos) realizada por un DVR controlado con un esquema basado en ANNs: a) Voltaje del suministro; b) Cálculo del voltaje rms en la fase a del suministro; c) Voltaje en la carga

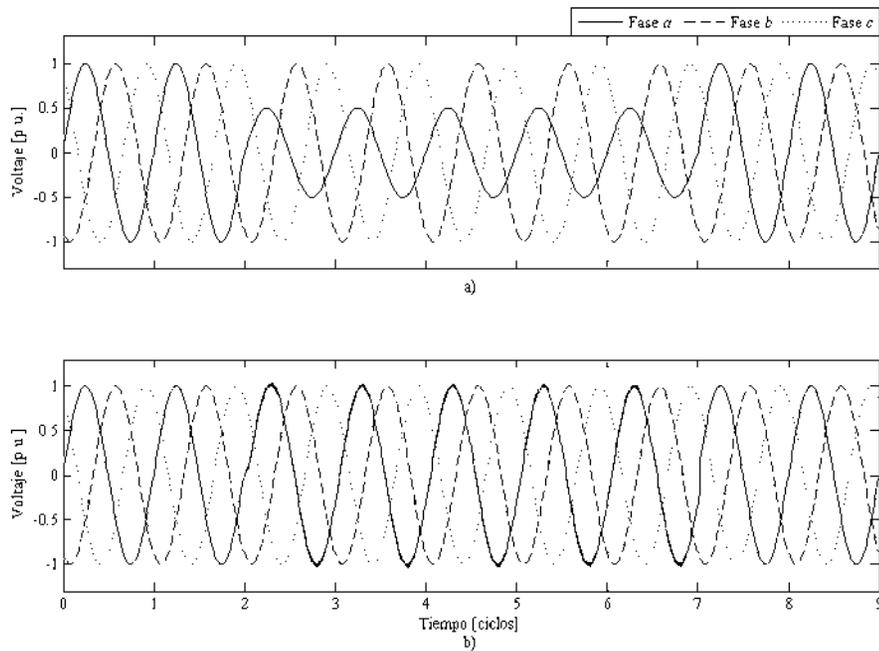


Figura 3.21. Compensación de una depresión de voltaje asimétrica ($h = 0.5$, $\Delta t = 5$ ciclos) realizada por un DVR controlado con un esquema basado en ANNs: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga

La Fig. 3.22 muestra el desempeño del DVR cuando una elevación de voltaje simétrica de 0.3 p.u. sobre su valor nominal se presenta en el suministro. El disturbio ocurre al finalizar el segundo periodo y se mantiene durante cinco ciclos. De manera similar al caso de la depresión de voltaje, se observa que la alimentación de la carga permanece en su valor nominal debido a la correcta compensación realizada por el DVR.

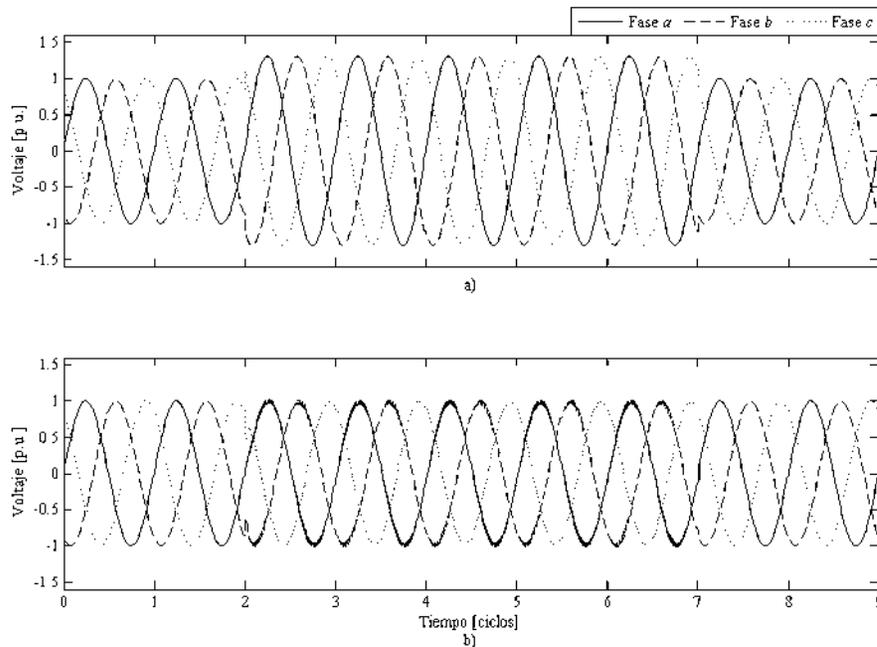


Figura 3.22. Compensación de una elevación de voltaje simétrica (1.3 p.u., $\Delta t = 5$ ciclos) realizada por un DVR controlado con un esquema basado en ANNs: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga

3.3. DVR basado en convertidores directos CA/CA

En [Babaei *et al.*, 2010] se proponen dos nuevas topologías de DVRs trifásicos que son capaces de compensar disturbios de voltaje de una mayor duración que las topologías típicas debido a que la energía requerida se obtiene directamente de la misma red eléctrica, por lo que no necesitan elementos de almacenamiento ni enlaces de CD y, como resultado, tienen menor volumen, peso y costo. Estas nuevas topologías se componen de tres convertidores directos CA/CA trifásico-monofásicos independientes que permiten compensar adecuadamente tanto disturbios simétricos como asimétricos. Los rangos de compensación dependen de la estructura utilizada, la cual puede ser de cuatro o seis interruptores de potencia en los convertidores, y de la relación de transformación de los transformadores de inyección. Asimismo, se propone un método de control para dichos convertidores que permite generar cualquier forma de onda de voltaje a partir de una función arbitraria. Esta capacidad, además de aplicarse en la compensación de depresiones de voltaje, se puede utilizar para mitigar otros fenómenos de PQ, tales como elevaciones de voltaje, distorsión armónica y parpadeo.

En esta tesis se han simulado las nuevas topologías mencionadas de DVRs de acuerdo a [Babaei *et al.*, 2010] para compensar depresiones y elevaciones de voltaje, además de comparar su desempeño con el DVR de topología convencional controlado mediante el esquema basado en ANNs propuesto en la sección anterior.

3.3.1. Descripción de las topologías

La Fig. 3.23 muestra los diagramas esquemáticos de las nuevas topologías de DVRs propuestas en [Babaei *et al.*, 2010]. En cada fase se utiliza un convertidor directo CA/CA trifásico-monofásico, un filtro RLC, un interruptor de *bypass* y un transformador de inyección con una relación de transformación de $1:\alpha$ (α para el lado de la red eléctrica). Los convertidores están directamente conectados al suministro eléctrico sin ningún enlace de CD. Como ya se ha mencionado, los DVRs convencionales utilizan capacitores en este enlace relacionados con un rizado de voltaje específico y para reducirlo se debe incrementar el tamaño de dichos capacitores, lo que tiene un impacto significativo en el costo, peso y tamaño físico del dispositivo [Soto y Green, 2002].

Otras de las características de las topologías mencionadas, es su capacidad para superar el problema del límite de energía almacenada en el capacitor del enlace de CD en presencia de un disturbio y su habilidad para compensar fenómenos de voltaje asimétricos debido a la configuración independiente de los convertidores trifásico-monofásicos.

Cada convertidor trifásico-monofásico está estructurado por cuatro o seis interruptores de potencia bidireccionales (véase Fig. 3.23). Con el diseño de seis interruptores, para una misma relación de transformación de los transformadores de inyección, el rango de compensación es más amplio que para el diseño de cuatro interruptores. Si se elige una relación de transformación unitaria, el primer diseño es capaz de compensar depresiones de voltaje hasta de 33.33% de profundidad y elevaciones de voltaje hasta 100% superiores a su valor nominal. Los rangos de compensación de depresiones y elevaciones de voltaje para el segundo diseño son 60% de profundidad y 100% superiores al valor nominal, respectivamente.

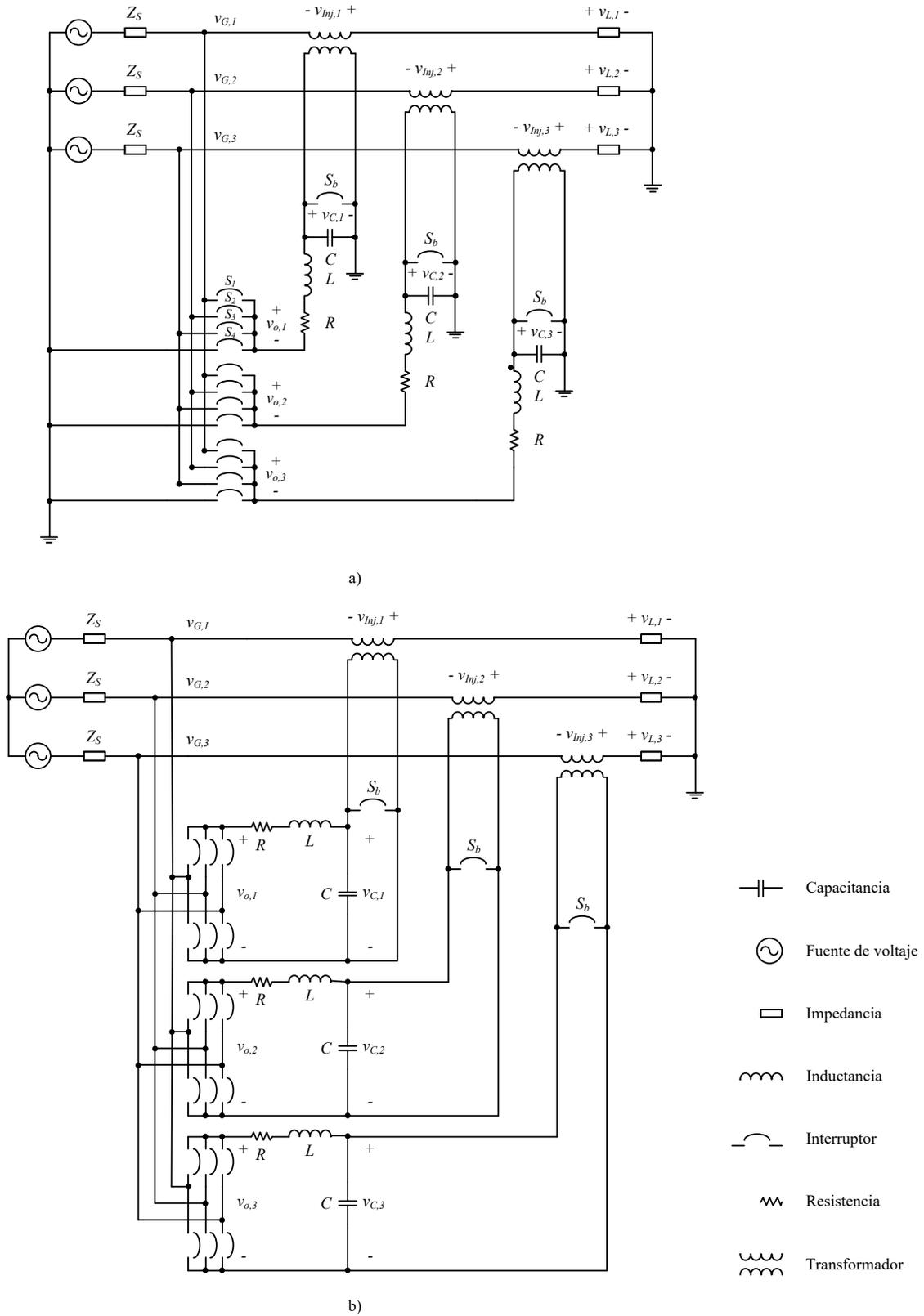


Figura 3.23. Topologías de DVRs basadas en convertidores directos CA/CA: a) Diseño con cuatro interruptores; b) Diseño con seis interruptores

El método de control utilizado en los convertidores directos se basa en una técnica de modulación PWM. Por lo tanto, la forma de onda generada presenta componentes armónicos de alto orden debido a la alta frecuencia de conmutación. Dichos armónicos deben ser suprimidos por un filtro adecuado antes de ser inyectados a la red eléctrica. Este filtro es ubicado en el lado del convertidor (como en la Fig. 3.23) o en el lado de la red. La instalación en el lado del convertidor tiene algunas ventajas; en esta condición, el filtro suprime los armónicos generados por la fuente y, como resultado, mejora su operación. Adicionalmente, las corrientes armónicas de alto orden no entrarán en el transformador y, esto se traduce en un incremento de su vida útil. El filtro utilizado es un filtro pasivo RLC de segundo orden con una resistencia, que es conectada en serie al inductor para estabilizar el sistema de una forma más efectiva y reducir los efectos transitorios.

Los voltajes filtrados son inyectados a la red a través de tres transformadores monofásicos con relación de transformación de $1:\alpha$.

Considerando la Fig. 3.23 se puede obtener la siguiente ecuación:

$$v_{L,p}(t) = v_{G,p}(t) + v_{Inj,p}(t), \text{ para } p = 1, 2, 3 \quad (3.4)$$

Donde los subíndices L , G e Inj son utilizados para la carga, la red eléctrica y las cantidades inyectadas, respectivamente. Además, el subíndice p se refiere al número de fase y su valor es de 1, 2 y 3 para la primera, segunda y tercera fase, respectivamente. Asumiendo formas de onda senoidales, estos voltajes se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} v_{L,p}(t) &= V_{PeakL,p} \sin[\omega t - (p-1) \times 120^\circ] \\ v_{G,p}(t) &= V_{PeakG,p} \sin[\omega t - (p-1) \times 120^\circ] \\ v_{Inj,p}(t) &= V_{PeakInj,p} \sin[\omega t + \phi - (p-1) \times 120^\circ], \text{ para } p = 1, 2, 3 \end{aligned} \quad (3.5)$$

Donde V_{PeakL} , V_{PeakG} y $V_{PeakInj}$ representan los valores pico de los voltajes de la carga, de la red e inyectados, respectivamente. Además ϕ representa el ángulo del voltaje inyectado y es definido de la siguiente forma:

$$\phi = \begin{cases} 0^\circ, & \text{Para condición de depresión de voltaje} \\ 180^\circ, & \text{Para condición de elevación de voltaje} \end{cases} \quad (3.6)$$

Los interruptores de *bypass* S_b están normalmente cerrados cortocircuitando el DVR. En caso de que un disturbio de voltaje ocurra en la red eléctrica, dichos interruptores se abren y el DVR comienza el proceso de compensación.

3.3.2. Método de control

Como ya se mencionó anteriormente, el método de control de los convertidores directos se basa en una técnica PWM que utiliza conmutación de alta frecuencia entre los niveles de voltaje más altos y cero para controlar su funcionamiento. Para explicar el método de control, se considera la frecuencia de conmutación como $f_s = 1/T_s$. Durante el j -ésimo periodo de muestreo T_s , cada periodo se divide en dos intervalos de tiempo t_{\max} y t_{zero} de manera que:

$$T_s = t_{\max,p}^j + t_{\text{zero},p}^j, \text{ para } p = 1, 2, 3 \quad (3.7)$$

Asimismo, $t_{\max,k}^j$ y $t_{\text{zero},k}^j$ deben ser válidos en la Ec. (3.7) y en las siguientes desigualdades:

$$\begin{aligned} 0 &\leq t_{\max,p}^j \leq T_s \\ 0 &\leq t_{\text{zero},p}^j \leq T_s \end{aligned}, \text{ para } p = 1, 2, 3 \quad (3.8)$$

En el intervalo de tiempo t_{zero} , dependiendo de la topología seleccionada, los interruptores que causan un voltaje igual a cero en la salida del convertidor v_o son puestos en conducción. De manera similar, en el intervalo de tiempo t_{\max} , los interruptores con el máximo valor de voltaje positivo a la salida deben ser puestos en conducción si el voltaje de salida del convertidor está en su semiciclo positivo e inversamente, los interruptores con el máximo valor de voltaje negativo a la salida deben ser puestos en conducción si el voltaje de salida del convertidor está en su semiciclo negativo. Entonces en cada periodo de

muestreo, durante el intervalo de tiempo t_{max} se presenta el nivel de voltaje $v_{max}(t)$ y durante el intervalo de tiempo t_{zero} se presenta el nivel de voltaje cero en la salida del convertidor, continuando de esta misma forma para todos los periodos de muestreo.

El procedimiento de conmutación de los convertidores directos en ambas topologías tiene el mismo principio. Es evidente que en la operación de dichos convertidores se utilizan voltajes de fase a tierra y voltajes de línea a línea para la primera y para la segunda topología, respectivamente. La Fig. 3.24 ilustra el procedimiento de conmutación para la primera fase del diseño con cuatro interruptores y muestra que cada ciclo del voltaje de salida se divide en seis modos de operación.

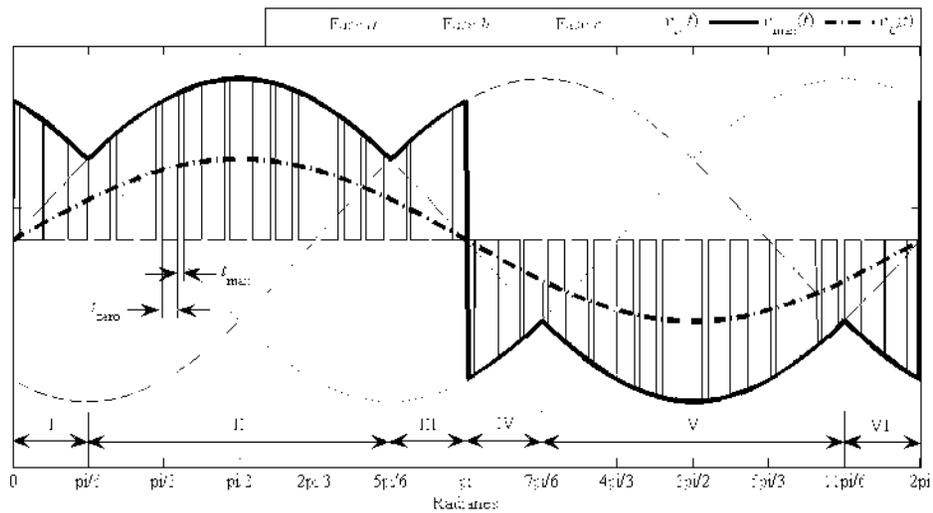


Figura 3.24. Procedimiento de conmutación de la primera fase para el DVR basado en convertidores directos CA/CA con cuatro interruptores

La Tabla 3.2 indica el estado de los interruptores durante los diferentes modos de operación mencionados. Se utiliza el mismo procedimiento para la segunda y la tercera fase. Seleccionar el valor pico en diferentes instantes de tiempo daría lugar a un incremento de la relación del voltaje de transferencia de los convertidores. Ahora en cada periodo de muestreo, t_{max} y t_{zero} deben ser considerados de tal forma que el voltaje deseado sea proporcionado a la salida del convertidor. Si la frecuencia de conmutación f_s es considerada muy grande en comparación con la frecuencia de la red eléctrica, el promedio de $v_{max}(t)$ durante un periodo de muestreo será constante y, como resultado, el promedio del voltaje a la salida del convertidor $v_{o,av}$ puede ser calculado de la siguiente manera:

$$v_{o,av,p}(t) = \frac{1}{T_s} [t_{\max,p} v_{\max,p} + t_{zero,p} \times 0], \text{ para } p = 1, 2, 3 \quad (3.9)$$

Entonces el voltaje de salida del convertidor en cada periodo se genera sumando las porciones obtenidas en cada periodo de muestreo, esto se puede expresar de la siguiente forma:

$$v_{o,av}(t) = \frac{1}{T_s} \sum_j t_{\max}^j v_{\max}^j(t) \quad (3.10)$$

Tabla 3.2. Estado de los interruptores y v_{\max} durante los diferentes modos de operación en la primera fase para el DVR basado en convertidores directos CA/CA con cuatro interruptores

Modos de operación	v_{\max}	Interruptores en conducción	
		t_{\max}	t_{zero}
I, IV	$v_{G,3}$	S_3	S_4
II, V	$v_{G,1}$	S_1	S_4
III, VI	$v_{G,2}$	S_2	S_4

Considerando la Ec. (3.9) es obvio que la combinación de $v_{\max}(t)$ con el voltaje cero durante los intervalos t_{\max} y t_{zero} puede proporcionar el voltaje de inyección deseado. Utilizando las Ecs. (3.7) y (3.9) los intervalos t_{\max} y t_{zero} se obtienen como sigue:

$$t_{\max,p} = T_s \frac{v_{o,av,p}(t)}{v_{\max,p}(t)}, \text{ para } p = 1, 2, 3 \quad (3.11)$$

$$t_{zero,p} = T_s - t_{\max,p}$$

Donde $v_{\max,p}(t)$ se determina con las Ecs. (3.12) y (3.13) para el primero y el segundo diseño, respectivamente como:

$$v_{\max,p}(t) = \begin{cases} \max(v_{G,p}), & \text{para } v_{C,p} \geq 0 \\ \min(v_{G,p}), & \text{para } v_{C,p} < 0 \end{cases}, \text{ para } p = 1, 2, 3 \quad (3.12)$$

$$v_{\max,p}(t) = \pm \max(|\text{voltajes línea a línea de la red eléctrica}|) \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} &+ \text{ para } v_{C,p} \geq 0 \\ &- \text{ para } v_{C,p} < 0 \end{aligned}$$

Por ejemplo, cuando ocurre una depresión o una elevación de voltaje, se afecta $v_{G,p}$ y consecuentemente se afecta $v_{\max,p}$ en las Ecs. (3.12) y (3.13).

Es significativo observar que los voltajes de la red eléctrica son medidos delante de la impedancia de la fuente Z_S y, por lo tanto, la caída de voltaje en esta impedancia no perturba el sistema de control durante la compensación.

Para calcular t_{\max} y t_{zero} en la Ec. (3.11), t adopta valores discretos como $t = 0, T_s, 2T_s, \dots$ durante cada periodo del voltaje de salida. Con respecto a la frecuencia de conmutación, mucho más grande que la frecuencia fundamental, en cada periodo de conmutación $v_{o,av,p}$ y $v_{\max,p}$ pueden considerarse como constantes de valor igual a su valor al comienzo de dicho periodo.

Es importante notar que la Ec. (3.11) es válida para cualquier función matemática de $v_{o,av}(t)$. En otras palabras, el método de control descrito puede generar cualquier voltaje esperado con una función arbitraria siendo ésta una de sus ventajas más importantes. Una posible aplicación de esta característica es la compensación de la distorsión de la onda de voltaje, fenómenos tales como: depresiones y elevaciones de voltaje, distorsión armónica y parpadeo.

La relación entre $v_C(t)$ que representa la salida de voltaje deseada de los convertidores después del filtro y v_{Inj} , se puede expresar por:

$$v_{Inj,p}(t) = \alpha v_{C,p}(t), \text{ para } p = 1,2,3 \quad (3.14)$$

Considerando las Ecs. (3.4) y (3.14), $v_C(t)$ se calcula de la siguiente manera:

$$v_{C,p}(t) = \frac{v_{L,Nom,p}(t) - v_{G,p}(t)}{\alpha}, \text{ para } p = 1,2,3 \quad (3.15)$$

Donde $v_{L,Nom,p}(t)$ es el voltaje nominal instantáneo de referencia en la carga.

Despreciando las caídas de voltaje y el cambio de fase en la rama serie del filtro RLC, la salida promedio de los voltajes de baja frecuencia de los convertidores es casi igual a la salida de voltaje filtrada ($v_{o,av} \approx v_C$). Por lo tanto, utilizando las Ecs. (3.11) y (3.15), t_{\max} y t_{zero} se pueden calcular de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} t_{\max,p} &= T_s \frac{v_{L,Nom,p}(t) - v_{G,p}(t)}{\alpha v_{\max,p}(t)}, \text{ para } p = 1,2,3 \\ t_{zero,p} &= T_s - t_{\max,p} \end{aligned} \quad (3.16)$$

Donde $v_{G,p}(t)$ está disponible vía medición y $v_{\max,p}(t)$ se calcula utilizando las Ecs. (3.12) y (3.13).

Para detectar los disturbios de voltaje, se utiliza el siguiente criterio:

$$\left| \frac{v_{L,Nom,p}(t) - v_{G,p}(t)}{V_{L,Nom}} \right| > \varepsilon, \text{ para } p = 1,2,3 \quad (3.17)$$

Donde $V_{L,Nom}$ es el valor pico del voltaje nominal en la carga y ε denota la diferencia entre el voltaje nominal de la carga y el voltaje de la red, asumiendo un valor propuesto de 0.02. Si el valor de ε es más grande que 0.02 se detecta un disturbio de voltaje y los interruptores de *bypass* se abren, entonces el DVR inicia el proceso de compensación.

3.3.3. Simulación

Para comprender y observar el funcionamiento de las topologías de DVRs basadas en convertidores directos CA/CA propuestas en [Babaei *et al.*, 2010] que se describieron anteriormente, se implementaron los diseños de cuatro y seis interruptores de potencia en el ambiente MATLAB Simulink® mostrando resultados satisfactorios en la mitigación de diversos fenómenos de PQ como: depresiones y elevaciones de voltaje, distorsión armónica y parpadeo. Estas condiciones de falla son simuladas por medio de una fuente programable de voltaje. Los parámetros de simulación se listan en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Parámetros de simulación de las topologías de DVRs basadas en convertidores directos CA/CA

Voltaje (línea a línea)	220 V
Frecuencia	50 Hz
Resistencia de la línea	1e-3 Ω
Inductancia de la línea	1e-6 H
Resistencia del filtro	0.1 Ω
Inductancia del filtro	8e-3 H
Capacitancia del filtro	11e-6 F
Relación de transformación de los transformadores de inyección	1:1
Resistencia de carga	65 Ω
Inductancia de carga	55e-3 H
Tiempo de muestreo	5e-6 s

3.3.3.1 Topología con cuatro interruptores de potencia

La Fig. 3.25 muestra la implementación del suministro eléctrico alimentando una carga RL, conectada en estrella, a través de un DVR de cuatro interruptores de potencia en cada uno de los tres convertidores directos CA/CA. El DVR consiste además de un filtro RLC, un interruptor de *bypass* y un transformador de inyección para cada una de las fases; también se muestran la impedancia de la línea de transmisión y algunos medidores de voltaje.

Asimismo, el dispositivo cuenta con una etapa de control, ilustrada en la Fig. 3.26, basada en la técnica PWM que se explicó en la Subsección 3.3.2 de acuerdo con [Babaei *et al.*, 2010]. Los bloques “Cálculo de numeradores” y “Cálculo de vCs ” calculan las salidas de voltaje deseadas de los convertidores después del filtro de acuerdo a la Ec. (3.15), el bloque “Determinación de $vMax$ ” establece los niveles de voltaje v_{max} de acuerdo a la Ec. (3.12), el bloque “Ciclos de trabajo” calcula los ciclos de trabajo para los PWM de cada fase de acuerdo a los intervalos de conmutación calculados con la Ec. (3.16), el bloque “Identificación de fase” reconoce la correspondencia de fase de los diferentes modos de operación durante la conmutación y el bloque “Detección de disturbio” establece la condición de disturbio de acuerdo al criterio establecido por la Ec. (3.17).

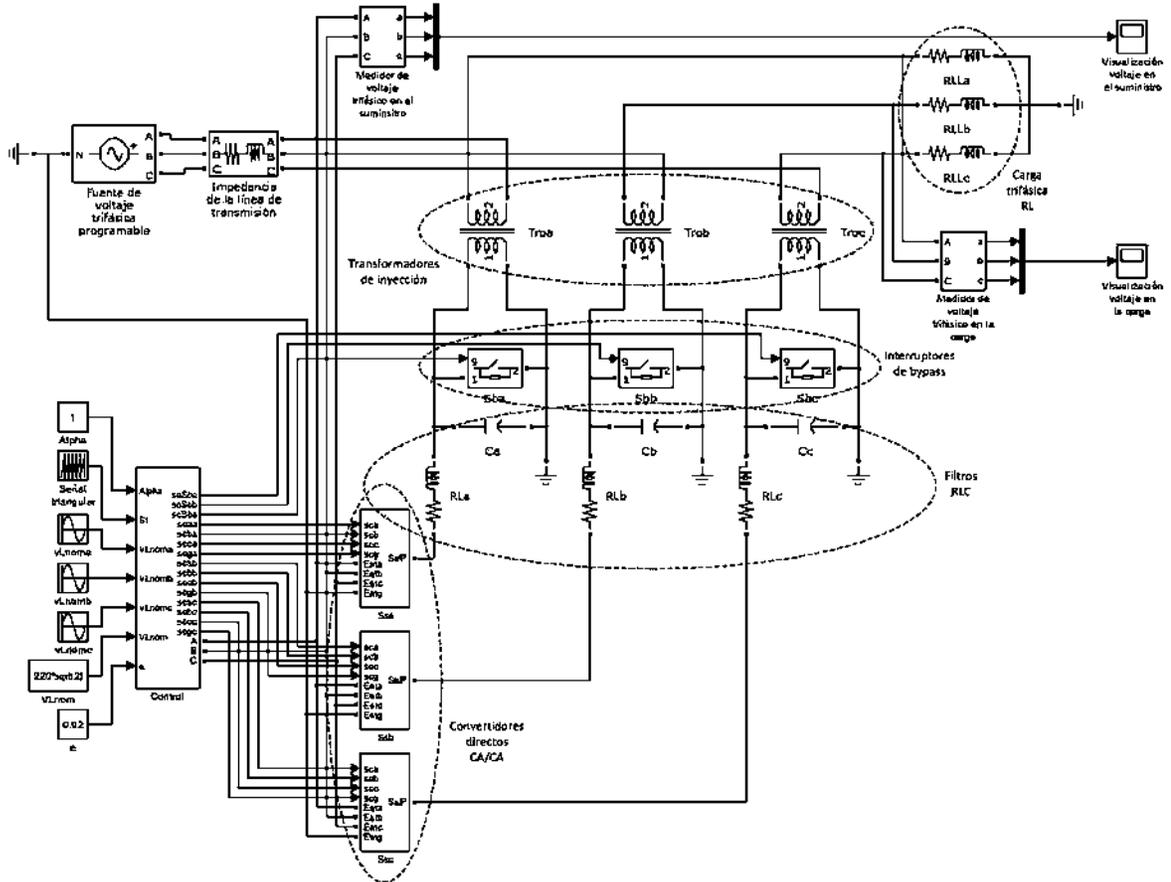


Figura 3.25. Implementación del DVR basado en convertidores directos CA/CA con cuatro interruptores de potencia

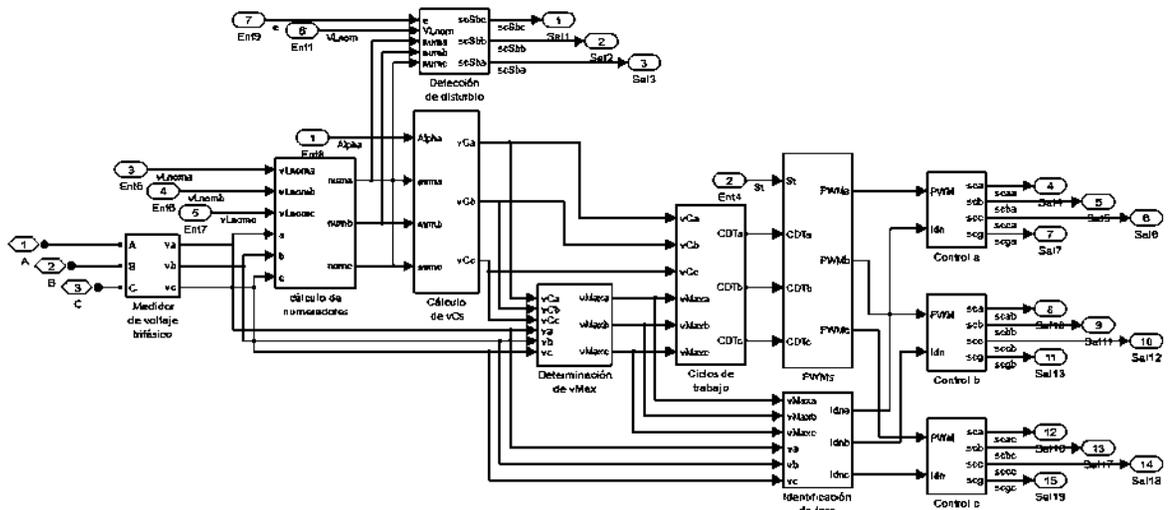


Figura 3.26. Implementación de la etapa de control del DVR basado en convertidores directos CA/CA con cuatro interruptores de potencia

Una de las principales aplicaciones de los DVRs es la compensación de depresiones y elevaciones de voltaje. La Fig. 3.27 muestra el funcionamiento del dispositivo cuando en el suministro ocurre una depresión del 20% de profundidad seguida de una elevación de voltaje de 1.3 p.u. respecto a su valor nominal, ambos disturbios simétricos. La depresión se presenta a partir del tercer ciclo y se mantiene hasta el séptimo, justo cuando ocurre la elevación de voltaje que permanece durante cinco ciclos más. Se observa la casi inmediata y correcta compensación de voltaje en terminales de la carga, permaneciendo en su valor nominal (1 p.u.), durante los disturbios en el suministro.

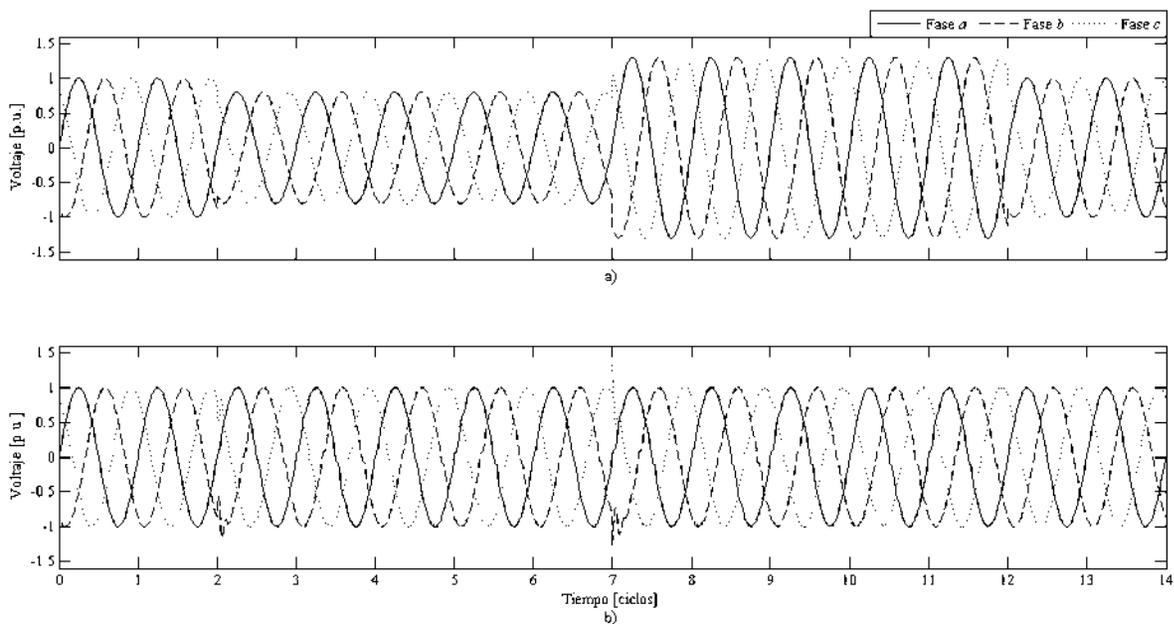


Figura 3.27. Compensación de una depresión de voltaje ($h = 0.2$, $\Delta t = 5$ ciclos) seguida de una elevación (1.3 p.u., $\Delta t = 5$ ciclos), ambas simétricas: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga

En la Fig. 3.28 se ilustra la compensación de voltaje realizada por el DVR cuando se presenta en el suministro una depresión del 30% de profundidad seguida de una elevación de voltaje de 1.4 p.u. respecto a su valor nominal, ambos disturbios asimétricos. La depresión ocurre al inicio del cuarto periodo manteniéndose durante tres ciclos, cuando inmediatamente ocurre la elevación de voltaje que persiste tres ciclos más. Se puede

apreciar que la alimentación de la carga permanece en su valor nominal sin observarse picos de voltaje indeseables ni retardos en la completa mitigación de los disturbios.

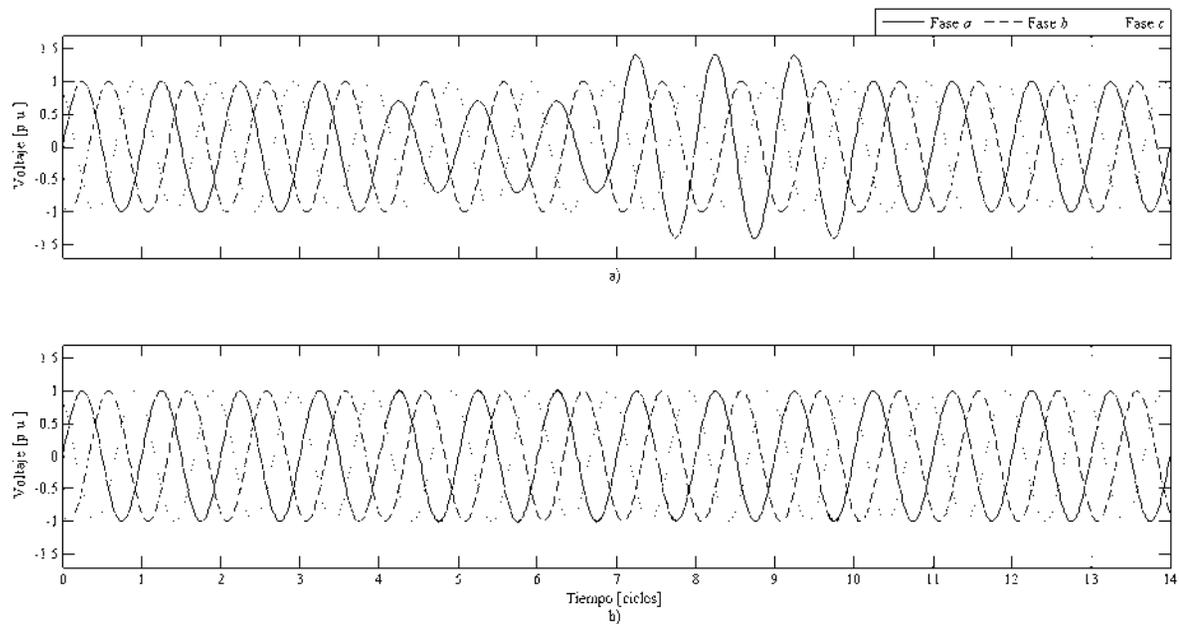


Figura 3.28. Compensación de una depresión de voltaje ($h = 0.3$, $\Delta t = 3$ ciclos) seguida de una elevación (1.4 p.u., $\Delta t = 3$ ciclos), ambas asimétricas: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga

Otro de los fenómenos de PQ que pueden ser mitigados por un DVR es el parpadeo. La Fig. 3.29 muestra el funcionamiento del dispositivo cuando se presenta en el suministro una fluctuación de la magnitud del voltaje comprendida entre 0.7 y 1.3 p.u. respecto a su valor nominal. El disturbio ocurre desde el inicio del tercer ciclo y persiste durante diez más. Se observa que el voltaje en la carga permanece en un valor muy cercano al nominal debido a compensación realizada por el dispositivo aunque se presentan algunos picos de voltaje indeseables.

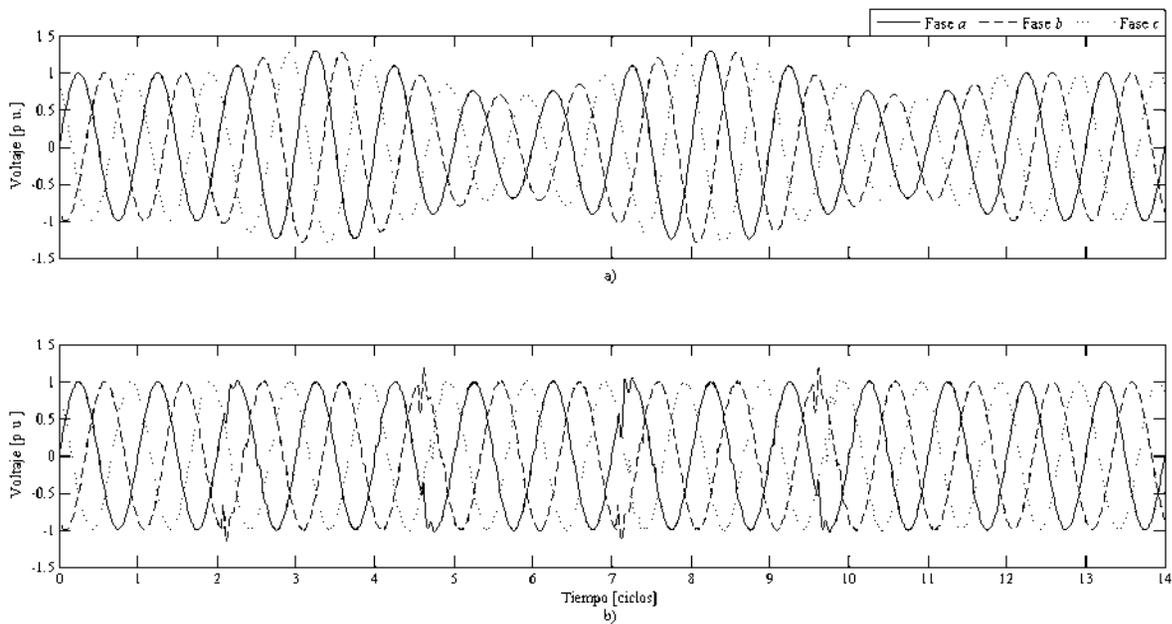


Figura 3.29. Compensación de una fluctuación de voltaje entre 0.7 y 1.3 p.u. de magnitud y $\Delta t = 10$ ciclos: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga

3.3.3.2 Topología con seis interruptores de potencia

La Fig. 3.30 muestra la implementación del suministro eléctrico alimentando una carga RL, conectada en estrella, a través de un DVR de seis interruptores de potencia en cada uno de los tres convertidores directos CA/CA. Además, se tienen los elementos ya antes mencionados en cada una de las fases, es decir, el filtro RLC, el interruptor de *bypass* y el transformador de inyección; también se muestran la impedancia de la línea de transmisión y algunos medidores de voltaje. La Fig. 3.31 ilustra la etapa de control para esta topología implementada también de acuerdo a [Babaei *et al.*, 2010] y explicada en la Subsección 3.3.2. Los diferentes bloques de esta etapa tienen la misma función que los correspondientes a la topología de cuatro interruptores de potencia sólo que ahora se consideran voltajes de línea a línea.

Para mostrar el funcionamiento de la estructura de seis interruptores de potencia en los convertidores directos CA/CA de un DVR en la mitigación de depresiones y elevaciones de voltaje, se simula una depresión del 40% de profundidad seguida de una elevación de voltaje de 1.5 p.u. respecto a su valor nominal, ambos fenómenos simétricos (véase Fig. 3.32). La depresión se presenta a partir del cuarto ciclo y se mantiene hasta el séptimo, justo cuando ocurre la elevación de voltaje que permanece durante cuatro ciclos más. En la Fig. 3.32 se observa la compensación correcta de los disturbios, de manera que el voltaje en terminales de la carga permanece muy cerca de su valor nominal (1 p.u.).

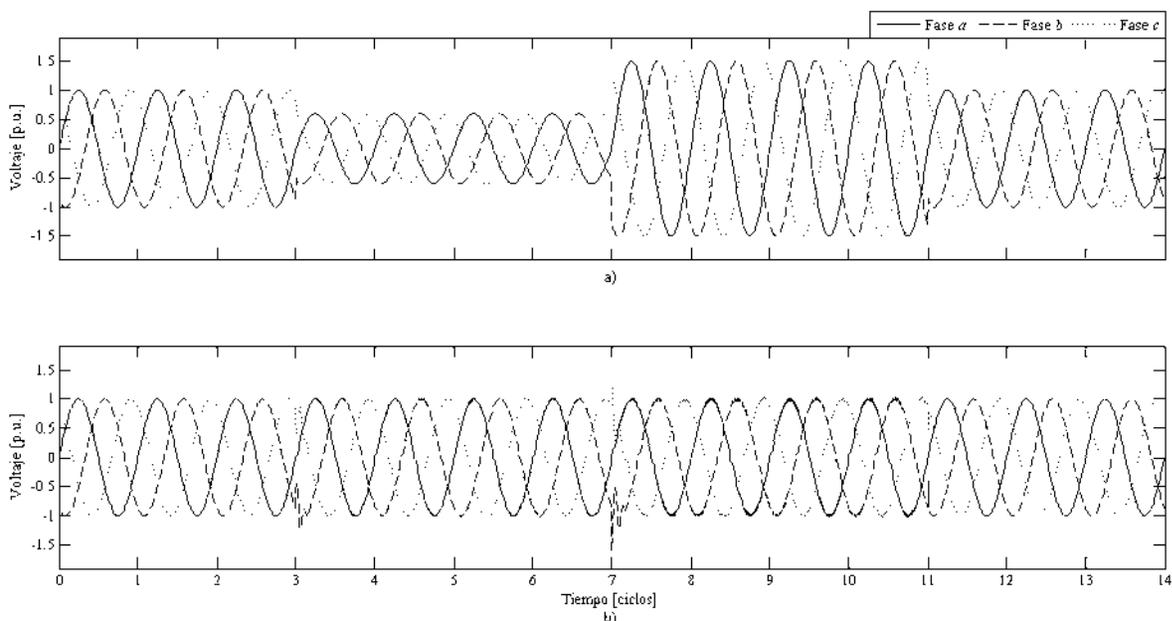


Figura 3.32. Compensación de una depresión de voltaje ($h = 0.4$, $\Delta t = 4$ ciclos) seguida de una elevación (1.5 p.u., $\Delta t = 4$ ciclos), ambas simétricas: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga

La Fig. 3.33 muestra la compensación de voltaje realizada por el DVR cuando se presenta en el suministro una depresión del 50% de profundidad seguida de una elevación de voltaje de 1.6 p.u. respecto a su valor nominal, ambos fenómenos asimétricos. La depresión ocurre al inicio del quinto periodo manteniéndose durante dos ciclos, cuando inmediatamente ocurre la elevación de voltaje que persiste dos ciclos más. En este caso también la alimentación de la carga permanece en su valor nominal sin observarse picos de voltaje ni retardos en la completa mitigación de los fenómenos.

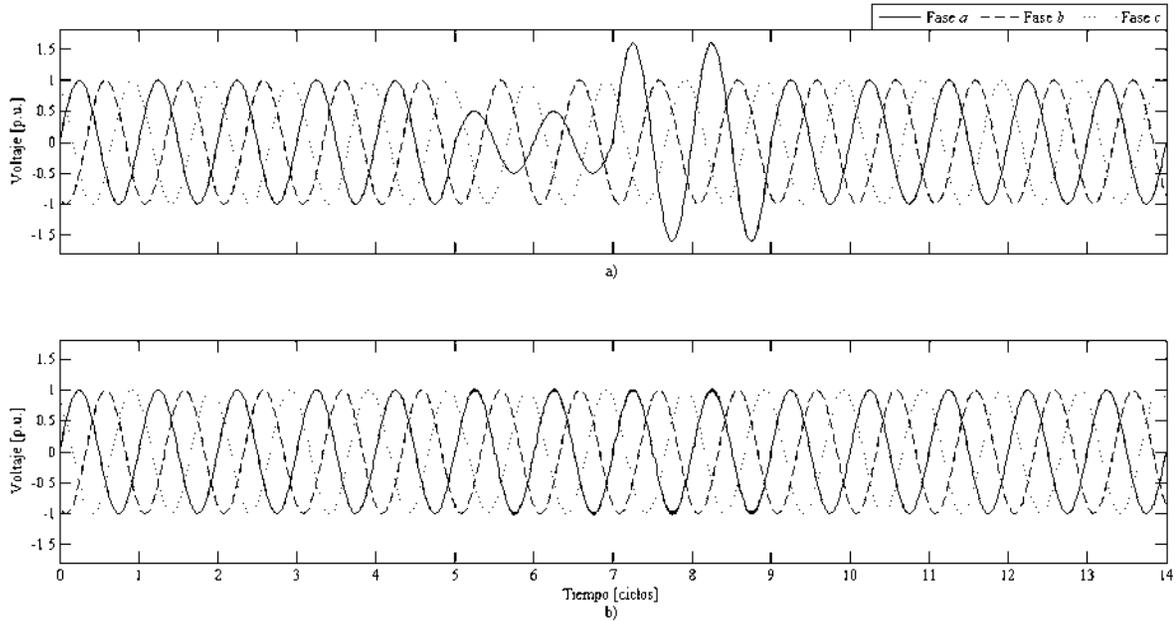


Figura 3.33. Compensación de una depresión de voltaje ($h = 0.5$, $\Delta t = 2$ ciclos) seguida de una elevación (1.6 p.u., $\Delta t = 2$ ciclos), ambas asimétricas: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga

Otros de los problemas de PQ que pueden ser mitigados instalando un DVR son la distorsión armónica y el desbalance de voltaje. La Fig. 3.34 muestra la compensación de voltaje cuando el suministro presenta un contenido armónico importante de acuerdo a la Ec. (3.14) durante diez ciclos a partir del tercer periodo. Asimismo, se ilustra que el voltaje en la carga permanece en un valor muy cercano al nominal debido a la eliminación del contenido armónico por la correcta operación del DVR.

$$\begin{aligned}
 v_{G,1}(t) &= V_G \sin(\omega t) + 0.15V_G \sin(3\omega t + 30^\circ) \\
 v_{G,2}(t) &= 0.9V_G \sin(\omega t - 60^\circ) + 0.25V_G \cos(5\omega t) \\
 v_{G,3}(t) &= 1.1V_G \sin(\omega t + 145^\circ) - 0.1V_G \sin(3\omega t)
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

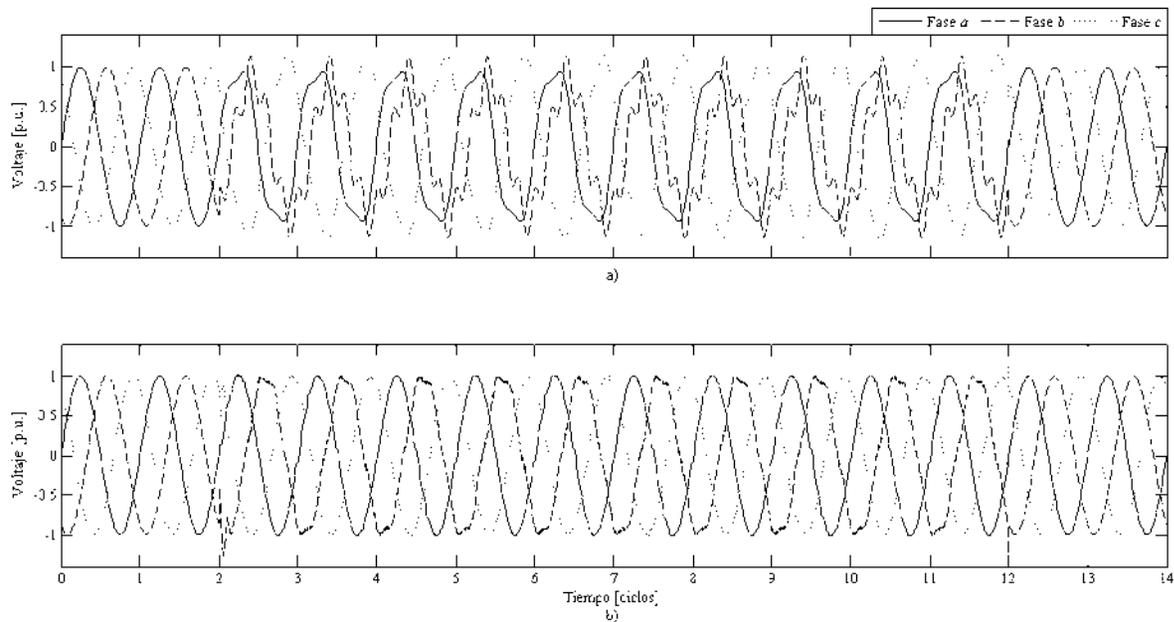


Figura 3.34. Compensación de la distorsión armónica y el desbalance de voltaje presente en el suministro eléctrico durante $\Delta t = 10$ ciclos: a) Voltaje del suministro; b) Voltaje en la carga

Con las simulaciones presentadas en esta sección se observó y demostró la efectividad de las nuevas topologías de DVRs, basadas en convertidores directos CA/CA de cuatro y seis interruptores de potencia, en la mitigación de diversos fenómenos de PQ como son las depresiones y elevaciones de voltaje, el parpadeo y la distorsión armónica.

3.4. Conclusiones

En este capítulo se presentó la utilización del DVR, uno de los dispositivos FACTS más conocidos, como una solución a los disturbios de PQ en nodos de carga. Se explicó su funcionamiento y se describieron tanto su configuración típica, como su método de control. Se realizó su implementación en el ambiente MATLAB Simulink® y mediante simulaciones se ilustró su efectividad en la mitigación de depresiones de voltaje.

También se presentó la propuesta e implementación de un esquema de control basado en ANNs para DVRs, con el propósito de mitigar depresiones y elevaciones de voltaje simétricas y asimétricas. Con las simulaciones llevadas a cabo, se demostró que dicha implementación puede lograr, de manera casi instantánea, la completa mitigación de los

disturbios mencionados aun cuando se consideran no ideales, tanto los elementos del propio dispositivo como los de la red eléctrica.

Asimismo se revisaron, implementaron y simularon dos nuevas topologías de DVRs basadas en convertidores directos CA/CA propuestas en [Babaei *et al.*, 2010], observándose su buen funcionamiento y su efectividad en la mitigación de diversos disturbios de PQ como son: depresiones y elevaciones de voltaje, parpadeo y distorsión armónica. Su capacidad de compensación depende de la topología utilizada y de la relación de transformación de los transformadores de inyección; a diferencia de la configuración convencional del DVR que está limitada por la capacidad de la unidad de almacenamiento de energía.

CAPÍTULO 4

Mitigación de depresiones de voltaje en redes eléctricas

En este capítulo se muestra el emplazamiento de STATCOMs como una solución a los problemas relacionados con la PQ en redes eléctricas, especialmente en la mitigación de depresiones de voltaje; se describe su modelado e incorporación en el estudio de cálculo de fallas y se realiza la formulación de dos problemas de optimización, el primero de ellos para emplazar una cantidad fija de dispositivos buscando minimizar el número total de depresiones de voltaje por año que ocurren en una red eléctrica, y el segundo para determinar el número mínimo de STATCOMs y su emplazamiento de manera que se reduzca el número de depresiones de voltaje por año de acuerdo con un valor de referencia especificado para todos los nodos de una red. Se propone una metodología de solución basada en GAs para resolver ambos problemas de optimización.

Asimismo, durante el desarrollo del capítulo se presentan diversos casos de estudio en el ambiente MATLAB®, con las redes IEEE RTS-24 e IEEE TC-118, que permiten observar el desempeño de los planteamientos y de las herramientas desarrolladas.

Para estimar el número de depresiones de voltaje por año se utiliza el método de posición de fallas combinado con la información estadística de probabilidad de falla en las respectivas redes eléctricas.

4.1. Estimación estocástica de depresiones de voltaje

Para cuantificar la PQ en una red eléctrica, o en algún nodo específico de ésta, se utilizan índices que, en el caso de depresiones de voltaje, se refieren a la frecuencia de ocurrencia y severidad. Una forma de registrar dichos índices es a través del monitoreo; sin embargo, para obtener buenos niveles de precisión se requiere un tiempo elevado de registro además, por limitaciones económicas, generalmente no se dispone de mediciones en todos los nodos de la red, constituyendo así un proceso costoso que demanda mucho tiempo [Bollen, 2000]

[Olguin *et al.*, 2006]. Debido a lo elevado de estos requerimientos es necesario aplicar métodos de predicción, uno de los cuales es la estimación estocástica. Una de las ventajas principales de aplicar este tipo de métodos, como los presentados en [Sherif *et al.*, 2005] [Espinosa y Hernández, 2006], es que permiten realizar predicciones considerando distintas características y condiciones de operación de la red.

Los resultados de una estimación de depresiones de voltaje son útiles para ser comparados con la compatibilidad de equipos sensibles a este tipo de perturbaciones. Para realizar estudios específicos se puede emplear, por ejemplo, el método de posición de fallas [Bollen, 2000], que es una herramienta poderosa para la estimación estocástica de depresiones de voltaje de largo plazo. La precisión de los resultados en dicho método depende de las posiciones de falla consideradas, por lo que es recomendable tomar en cuenta un gran número de ellas [Espinosa y Hernández, 2006] [Arias *et al.*, 2008].

4.2. Método de posición de fallas

El método de posición de fallas es una técnica ampliamente utilizada en la estimación estocástica de depresiones de voltaje. Este método se basa en considerar un número de posiciones de falla que representan fallas distribuidas, previamente seleccionadas, en toda la red eléctrica. Un número esperado de eventos por año se asigna a cada posición de falla. Esto es, un número esperado de depresiones de voltaje debido a fallas puede ser calculado directamente [Qader *et al.*, 1999] [Bollen, 2000]. La magnitud de las depresiones de voltaje se obtiene aplicando técnicas convencionales para el cálculo de cortocircuito en sistemas eléctricos y su frecuencia de ocurrencia se calcula mediante la combinación con los datos estadísticos de probabilidad de falla. En esta sección se describe brevemente la formulación de este método.

Sea una red eléctrica, de la cual se conoce su matriz de impedancia nodal Z_{Nodo} de n nodos, el voltaje en un nodo i V_i , a consecuencia de una falla en un nodo f de la red se calcula como sigue:

$$V_i = V_i^{pf} + \Delta V_i \quad (4.1)$$

Donde es V_i^{pf} es el voltaje de prefalla en el nodo i y ΔV_i indica la diferencia o el cambio en el voltaje del nodo i debido a la falla en el nodo f , el cual se calcula mediante:

$$\Delta V_i = -Z_{if} I_f \quad (4.2)$$

Siendo Z_{if} la impedancia del elemento (i, f) de la matriz de impedancia nodal e I_f la corriente de falla en el nodo f . En términos generales, cuando ocurre una falla trifásica balanceada, I_f se calcula como:

$$I_f = -\frac{V_f^{pf}}{Z_{ff}} \quad (4.3)$$

Donde Z_{ff} es el elemento (f, f) de la matriz de impedancia nodal y V_f^{pf} es el voltaje de prefalla del nodo f . Sustituyendo las Ecs. (4.2) y (4.3) en (4.1), se puede replantear la ecuación para calcular el voltaje en cualquier nodo i , durante una falla en un nodo f , de la siguiente manera:

$$V_i = V_i^{pf} - \frac{Z_{if}}{Z_{ff}} V_f^{pf} \quad (4.4)$$

Siguiendo los procedimientos convencionales para el estudio de cortocircuito se pueden obtener ecuaciones de voltaje análogas a la Ec. (4.4) para considerar otro tipo de fallas [Grainger y Stevenson, 1996].

Para tomar en cuenta fallas a lo largo de las líneas de transmisión del sistema, se deben de suponer nodos ficticios en cada una de las posiciones de falla que se consideren a lo largo de la misma.

En resumen, el método de posición de fallas consiste en calcular el voltaje residual originado en todos los nodos de una red eléctrica cuando ocurren fallas en todas las posiciones de falla preseleccionadas, esto incluye los nodos del sistema y los nodos ficticios de las líneas de transmisión, mediante expresiones análogas a la Ec. (4.4).

La estimación de la frecuencia de ocurrencia de las depresiones de voltaje se realiza utilizando datos de todos los componentes del sistema. En el caso de las líneas de transmisión, generalmente se dispone del número de fallas en la línea por kilómetro para un periodo de tiempo, típicamente un año; por lo cual, es posible asignar a cada una de las posiciones de falla seleccionadas un número de fallas al año λ_f , proporcional a la longitud del segmento representado por dicha posición. Esta información, combinada con las características calculadas del voltaje residual de la depresión producida al ocurrir una falla, proporciona una predicción anual del número esperado de depresiones de voltaje.

Generalmente se agrupa la frecuencia de ocurrencia de depresiones de voltaje clasificándolos dentro de rangos de voltaje residual [Qader *et al.*, 1999] [Bollen, 2000] [IEC 61000-4-30, 2002]. Debido a que la precisión de este método depende del número de posiciones de falla, es necesario que un gran número de éstas tengan que ser simuladas para tener una predicción más precisa.

4.3. Compensadores estáticos síncronos (STATCOM)

El STATCOM es un dispositivo que se conecta en derivación, capaz de intercambiar tanto potencia reactiva como activa con el sistema eléctrico de potencia para controlar parámetros específicos de éste. Su funcionamiento es equivalente al de un VSC con una reactancia en sus terminales; el inversor de voltaje genera un voltaje de CA a la frecuencia fundamental con amplitud y ángulo controlables atrás de la reactancia de dispersión del transformador de acoplamiento, de modo que la diferencia de voltaje a través de la reactancia produce el intercambio de potencia entre el dispositivo y la red eléctrica. El diagrama simple de un dispositivo STATCOM se muestra en la Fig. 4.1. Este dispositivo puede operar en dos modos: control de corriente y control de voltaje. El primero de estos modos le permite operar como regulador de carga trabajando como filtro activo, corrector de factor de potencia e incluso balancear la carga; al efectuar control del voltaje, protege contra perturbaciones, tales como depresiones y elevaciones de voltaje, desbalance e incluso breves interrupciones [Mishra *et al.*, 2003].

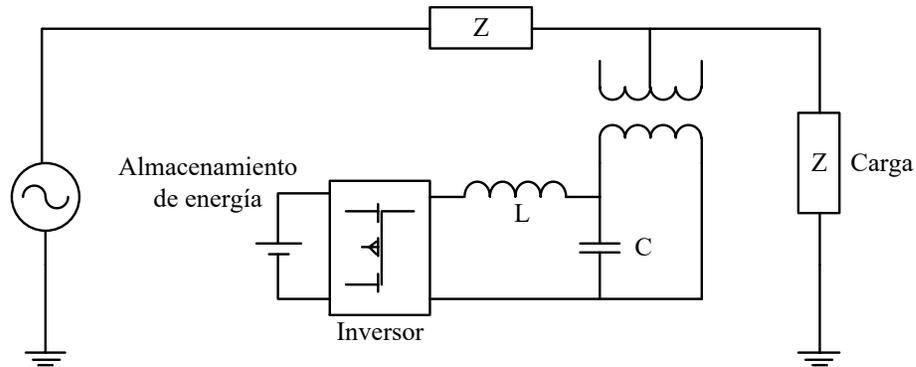


Figura 4.1. Topología convencional y conexión de un STATCOM

La característica V-I típica del STATCOM [Hingorani y Gyugyi, 2000] se muestra en la Fig. 4.2. Mientras la corriente reactiva se mantiene dentro de sus límites ($-I_{max}$, I_{max}), impuestos por la capacidad del VSC, el voltaje V está regulado en su valor de referencia V_{Ref} . Sin embargo, normalmente se utiliza una caída de voltaje (por lo general entre 1% y 4% en la máxima salida de potencia reactiva) y la característica V-I tiene la pendiente X_S indicada en la figura. En el modo control de voltaje, la característica V-I se describe mediante la siguiente ecuación:

$$V = V_{Ref} + X_S I \quad (4.5)$$

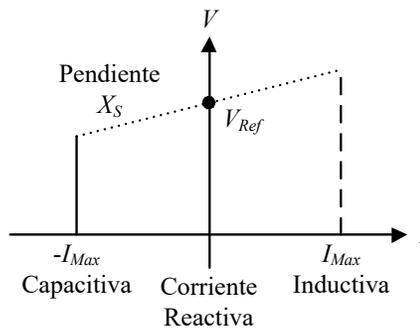


Figura 4.2. Característica V-I del STATCOM

4.3.1. Cálculo de fallas incorporando dispositivos STATCOM

Como se mencionó anteriormente en la Sección 4.2, el cálculo de fallas se lleva a cabo haciendo un estudio de corto circuito utilizando la matriz Z_{Nodo} . Los dispositivos STATCOM son modelados de acuerdo a [Milanovic y Zhang, 2010] como una fuente de corriente e incorporados al estudio de corto circuito de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_f \\ V_{sh} \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_f \\ V_{sh} \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}^{pf} - \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{1f} & Z_{1sh} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{2f} & Z_{2sh} & \cdots & Z_{2n} \\ Z_{f1} & Z_{f2} & Z_{ff} & Z_{f,sh} & \cdots & Z_{fn} \\ Z_{sh1} & Z_{sh2} & Z_{sh,f} & Z_{sh,sh} & \cdots & Z_{sh,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & Z_{nf} & Z_{n,sh} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_f \\ -I_{sh} \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Donde $[V_1 \ V_2 \ V_f \ V_{sh} \ \dots \ V_n]^{pf}$, es una columna de voltajes de prefalla para los nodos 1 a n y $Z_{i,j}$ es el elemento (i, j) de la matriz de impedancia nodal Z_{Nodo} . Los subíndices f y sh representan el nodo en donde ocurre la falla y en donde se ubica el STATCOM, respectivamente.

Si se hace un análisis de cortocircuito para una falla trifásica balanceada y se toman en cuenta sólo los voltajes en el nodo fallado y en el nodo donde se encuentra el dispositivo, se tienen las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} V_f &= V_f^{pf} - Z_{ff} I_f + Z_{f,sh} I_{sh} \\ V_{sh} &= V_{sh}^{pf} - Z_{sh,f} I_f + Z_{sh,sh} I_{sh} \\ V_f &= Z_{fault} I_f \end{aligned} \quad (4.7)$$

Donde Z_{fault} es la impedancia de falla. De manera matricial se tiene la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} V_{sh} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{sh} \\ V_f \end{bmatrix}^{pf} - \begin{bmatrix} -Z_{sh,sh} & Z_{sh,f} \\ -Z_{f,sh} & Z_{ff} + Z_{fault} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sh} \\ I_f \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

Resolviendo para la columna de corrientes resulta la siguiente igualdad:

$$\begin{bmatrix} I_{sh} \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z_{sh,sh} & Z_{sh,f} \\ -Z_{f,sh} & Z_{ff} + Z_{fault} \end{bmatrix}^{-1} \left(\begin{bmatrix} V_{sh} \\ V_f \end{bmatrix}^{pf} - \begin{bmatrix} V_{sh} \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (4.9)$$

En esta tesis se considera que todos los voltajes de prefalla tienen un valor de 1 p.u. Además, también se considera que todo dispositivo STATCOM es capaz de proporcionar una corriente suficiente para mantener el voltaje, en el nodo donde está ubicado V_{sh} en 1 p.u. contra cualquier falla que se presente en un algún otro punto de la red eléctrica. Entonces la Ec. (4.9) se simplifica, obteniéndose la expresión:

$$\begin{bmatrix} I_{sh} \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -Z_{sh,sh} & Z_{sh,f} \\ -Z_{f,sh} & Z_{ff} + Z_{fault} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Así que el cálculo de la corriente de falla y de la corriente del dispositivo, sólo dependen de las impedancias propias y mutuas entre el nodo donde ocurre la falla y en nodo donde está ubicado el STATCOM.

La formulación para k dispositivos se puede generalizar de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\begin{bmatrix} I_{sh1} \\ I_{sh2} \\ \vdots \\ I_{shk} \\ I_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{sh1,sh1} & Z_{sh1,sh2} & \cdots & Z_{sh1,shk} & Z_{sh1,f} \\ Z_{sh2,sh1} & Z_{sh2,sh2} & \cdots & Z_{sh2,shk} & Z_{sh2,f} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ Z_{shk,sh1} & Z_{shk,sh2} & \cdots & Z_{shk,shk} & Z_{shk,f} \\ Z_{f,sh1} & Z_{f,sh2} & \cdots & Z_{f,shk} & Z_{f,f} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Una vez calculadas todas las corrientes de falla y las corrientes de los dispositivos, se resuelve la Ec. (4.6) para obtener el resto de los voltajes nodales en la red eléctrica.

4.4. Emplazamiento óptimo de un número fijo de dispositivos STATCOM

En esta sección se presenta la formulación y solución del problema de emplazamiento óptimo de un número fijo de dispositivos STATCOM para minimizar el número total de depresiones de voltaje en una red eléctrica de manera similar al planteamiento mostrado en [Milanovic y Zhang, 2010].

Aunque varios métodos de programación matemática pueden ser aplicados para solucionar la cuestión abordada, el empleo de GAs se debe a su simplicidad, eficiencia y eficacia para solucionar diferentes problemáticas.

El desempeño de la implementación realizada se puede observar en los casos de estudio efectuados en las redes IEEE RTS-24 e IEEE TC-118.

4.4.1. Formulación y solución del problema de optimización mediante GAs

Como ya se mencionó, el objetivo es emplazar de forma óptima un número k de dispositivos STATCOM para minimizar el número total de depresiones de voltaje en una red, esto se representa mediante la siguiente función objetivo:

$$\min \sum_{i=1}^n f_{est,i} \quad (4.12)$$

Donde $f_{est,i}$ es el número de depresiones de voltaje por año en el nodo i , estimadas utilizando el método de posición de fallas y la información estadística de probabilidad de falla, y n es el número total de nodos de la red.

Para dar solución a este problema, en esta tesis se han empleado las herramientas del “*Genetic Algorithm Toolbox*” de MATLAB® [MathWorks, 2008a]. A continuación, se hace una breve descripción de los operadores genéticos utilizados:

- Tipo de representación.

Una posible solución para la Ec. (4.12) se representa por un vector X de longitud k donde sus elementos indican los diferentes nodos en los cuales se instalan los dispositivos, adquiriendo valores enteros diferentes entre 1 y n , esto es:

$$\begin{aligned}
 X &= [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_k] \\
 x_i &\neq x_j \quad \forall i, j \leq n \\
 k &\leq n
 \end{aligned}
 \tag{4.13}$$

- Población inicial. Se utiliza la función “*gacreationlinearfeasible*” para crear una población inicial aleatoria, dispersa y básica de individuos que se encuentren dentro de los límites establecidos y cumplan con todas las características de acuerdo a la Ec. (4.13). La población inicial se compone de un número *ps* de posibles soluciones (40 para esta aplicación).
- Función objetivo. La Ec. (4.12) representa la función objetivo del proceso de optimización. Cada individuo de una población dada es evaluado para obtener su valor de aptitud correspondiente de acuerdo a esta función objetivo.
- Función de escalamiento. Se emplea la función “*fitscalingrank*” para convertir los resultados devueltos al evaluar la función objetivo, en valores adecuados para el operador de selección. Esta función en particular, escala los valores de aptitud de acuerdo al rango de cada individuo. El rango de un individuo es la posición que ocupa dentro de la una lista ordenada acorde a su valor de aptitud.
- Selección. Se utiliza la función “*selectionstochunif*” para seleccionar a los progenitores de la siguiente generación en base a los valores devueltos por la función de escalamiento. Concretamente esta función hace una selección estocástica uniforme trazando una línea en la que a cada individuo le corresponde un tramo de la misma, de longitud proporcional a su valor escalado. El algoritmo se desplaza a lo largo de la línea en intervalos del mismo tamaño, eligiendo como progenitor al individuo correspondiente al tramo donde se encuentre.
- Cruzamiento. Se utiliza la función “*crossoverscattered*” para recombinar soluciones y crear nuevos individuos de acuerdo al criterio de cruce uniforme. Esta técnica implica la generación aleatoria de una máscara de cruce binaria. Si en una de las posiciones de la máscara hay un 1, el gen situado en esa posición en uno de los descendientes se copia del primer progenitor. Si por el contrario hay un 0 el gen se copia del segundo progenitor. Para producir el segundo descendiente se

intercambian los papeles de los progenitores, o bien, se intercambia la interpretación de la máscara de cruce, tal como puede apreciarse en la Fig. 4.3.

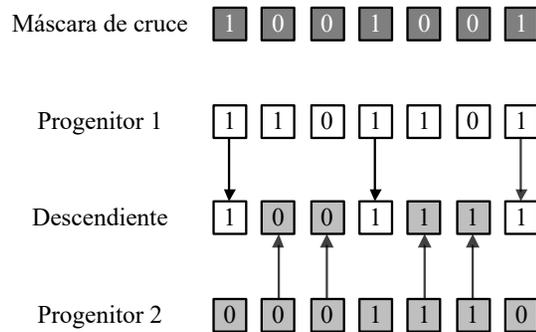


Figura 4.3. Operador de cruce uniforme

- Mutación. Se utiliza la función “*mutationadaptfeasible*” para generar aleatoriamente direcciones de adaptación con respecto a generaciones pasadas satisfactorias o no satisfactorias. Se elige una longitud de paso en cada dirección en relación con la región factible acotada por las restricciones y los límites.
- Criterio de paro. El GA se detiene cuando se alcanza un cierto número de generaciones. De otra forma se interrumpe cuando la solución, resultado de la evaluación de la función objetivo, no mejora para un cierto número de generaciones consecutivas (15 para esta aplicación); o bien, se ejecuta mientras el cambio acumulativo de la aptitud es menor que un determinado valor ($1e-6$ para esta aplicación).

A manera de resumen, y para ofrecer una idea más clara de la solución al problema de optimización planteado, el diagrama de flujo de la Fig. 4.4 muestra todas las etapas del procedimiento que consiste en:

- 1) Lectura de datos de los parámetros de la red eléctrica, incluyendo el número de dispositivos STATCOM a emplazar y el rango de voltaje residual considerado.
- 2) Evaluación base de depresiones de voltaje mediante el método de posición de fallas, considerando cinco posiciones de falla en las líneas de transmisión, sin tomar en cuenta dispositivos instalados.

- 3) Para ejecutar la rutina del GA, primeramente se crea una población inicial de individuos con las características establecidas en la Ec. (4.13), donde cada uno representa una posible solución al problema, es decir, una opción de emplazamiento para los dispositivos.

Se evalúa cada uno de los individuos de la población para obtener su valor de aptitud de acuerdo a la función objetivo establecida en la Ec. (4.12). Para este fin, se utiliza el método de posición de fallas que incorpora el modelado de los dispositivos STATCOM.

- 4) Se verifica la condición de paro del GA, que consiste en el cumplimiento de alguno de los criterios mencionados anteriormente; en caso de no cumplirse, se crea una nueva población (la siguiente generación) por medio de los operadores genéticos de selección, cruzamiento y mutación.
- 5) Una vez que se cumple con el criterio de paro se tiene la solución al problema de optimización, es decir, se obtiene el emplazamiento óptimo de los k dispositivos STATCOM que minimiza el número total de depresiones de voltaje por año en la red.

4.4.2. Casos de estudio

En esta subsección se muestra el impacto, en la mitigación de depresiones de voltaje, que tiene la instalación de dispositivos STATCOM en una red eléctrica. Se presenta la aplicación de la metodología propuesta para el emplazamiento óptimo de un número fijo de dispositivos, basada en GAs e implementada en el ambiente MATLAB®, en las redes IEEE RTS-24 e IEEE TC-118. Para estos casos de estudio se consideran fallas trifásicas sólidas y, respecto al criterio de paro del GA, se considera un número máximo de 30 generaciones.

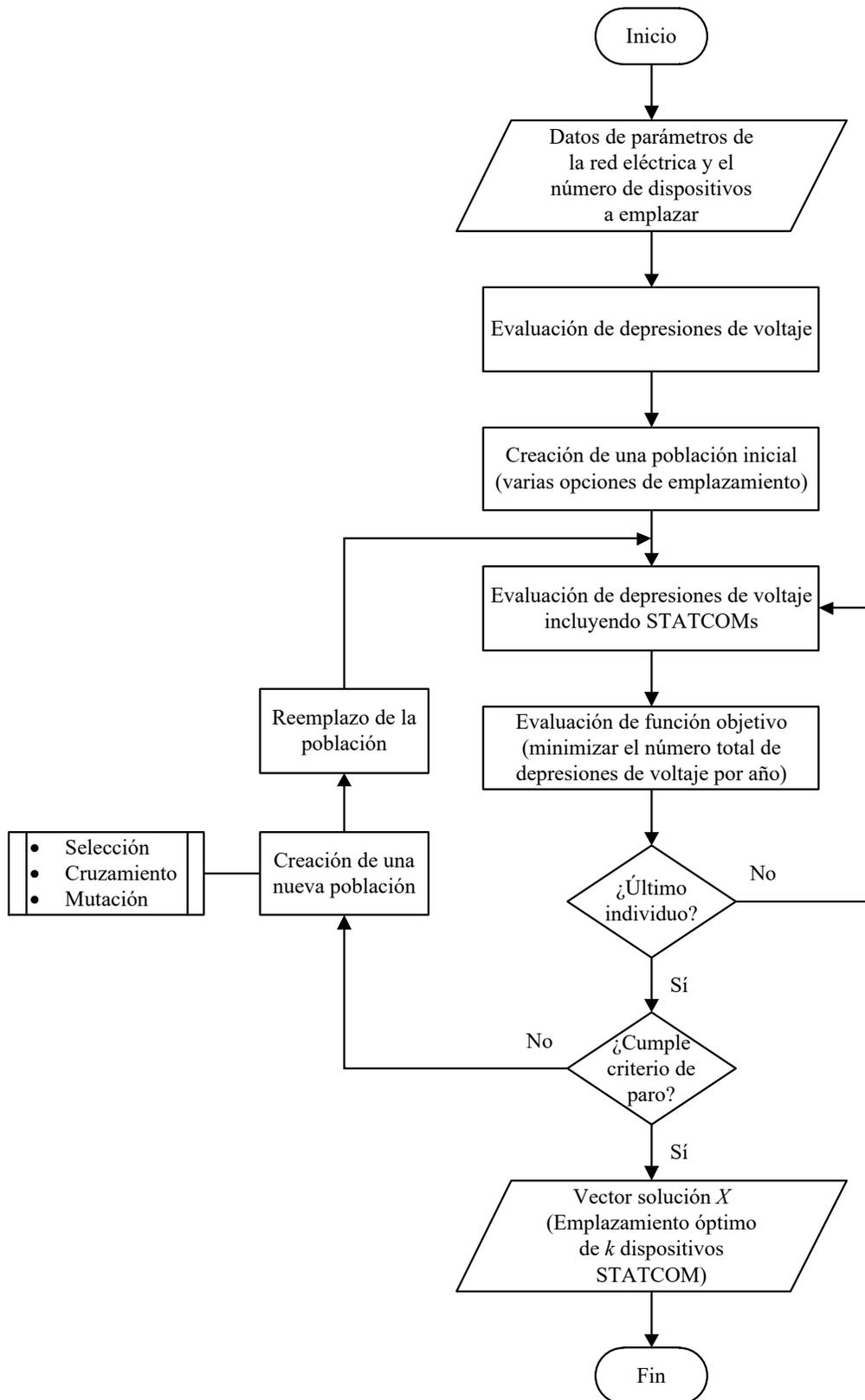


Figura 4.4. Diagrama de flujo para obtener el emplazamiento óptimo de k dispositivos STATCOM que minimizan el número total de depresiones de voltaje en una red eléctrica

4.4.2.1 Estudios en la red IEEE RTS-24

Se presentan resultados de diferentes casos de estudio mostrando, en diversos rangos de voltaje residual, el impacto de emplazar dispositivos STATCOM en la red IEEE *Reliability Test System* de 24 nodos (IEEE RTS-24). Esta red, que se muestra en la Fig. 4.5, consiste de 11 unidades de generación, 24 nodos interconectados por 33 líneas de transmisión y 5 transformadores. Los datos de los parámetros de la red y las probabilidades de falla se encuentran disponibles en [IEEE RTS, 1999].

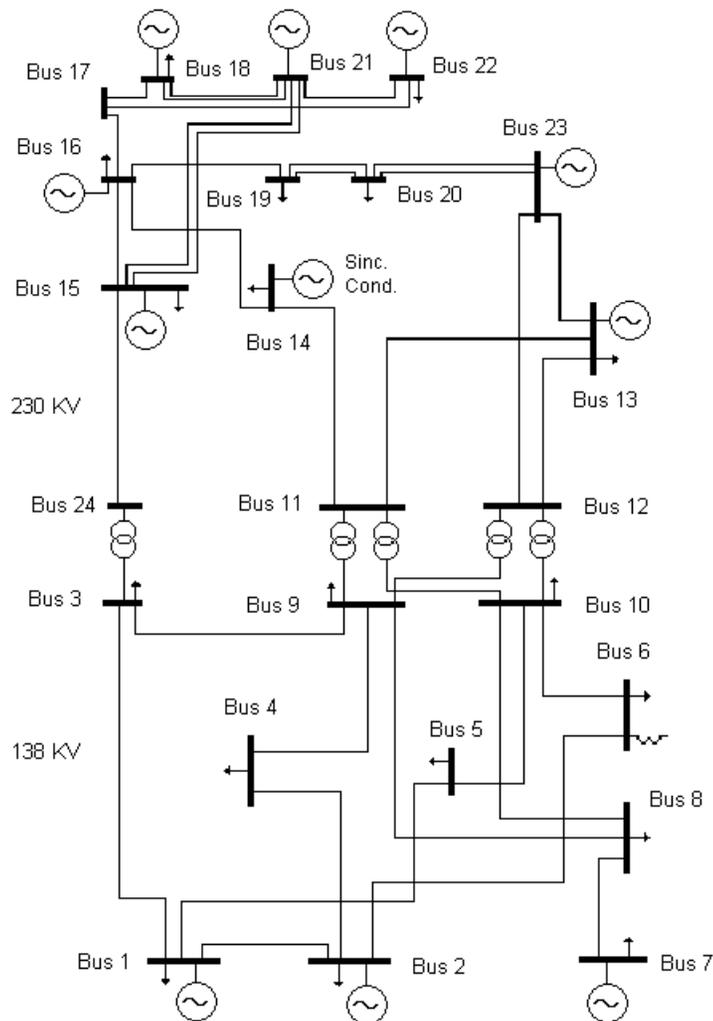


Figura 4.5. Diagrama de la red IEEE RTS-24

Efecto del emplazamiento de un dispositivo STATCOM

Con el propósito de ilustrar el efecto en la mitigación de depresiones de voltaje que produce la instalación de STATCOMs en la red eléctrica, se han emplazado dispositivos, uno a la vez, en los nodos de carga 10 y 14. La Fig. 4.6 muestra el número de depresiones de voltaje por año en cada nodo de la red para diferentes rangos de voltaje residual en valores p.u., este cálculo se obtiene utilizando el método de posición de fallas incluyendo el modelado de los dispositivos STATCOM y la información estadística de probabilidad de falla. Se puede observar que el emplazamiento de un dispositivo STATCOM no sólo influye en el nodo donde se conecta, sino que también reduce el número de depresiones de voltaje en otros nodos, en mayor medida en los que se encuentran a una distancia eléctrica más corta; lo anterior se presenta en todos los rangos de voltaje residual considerados.

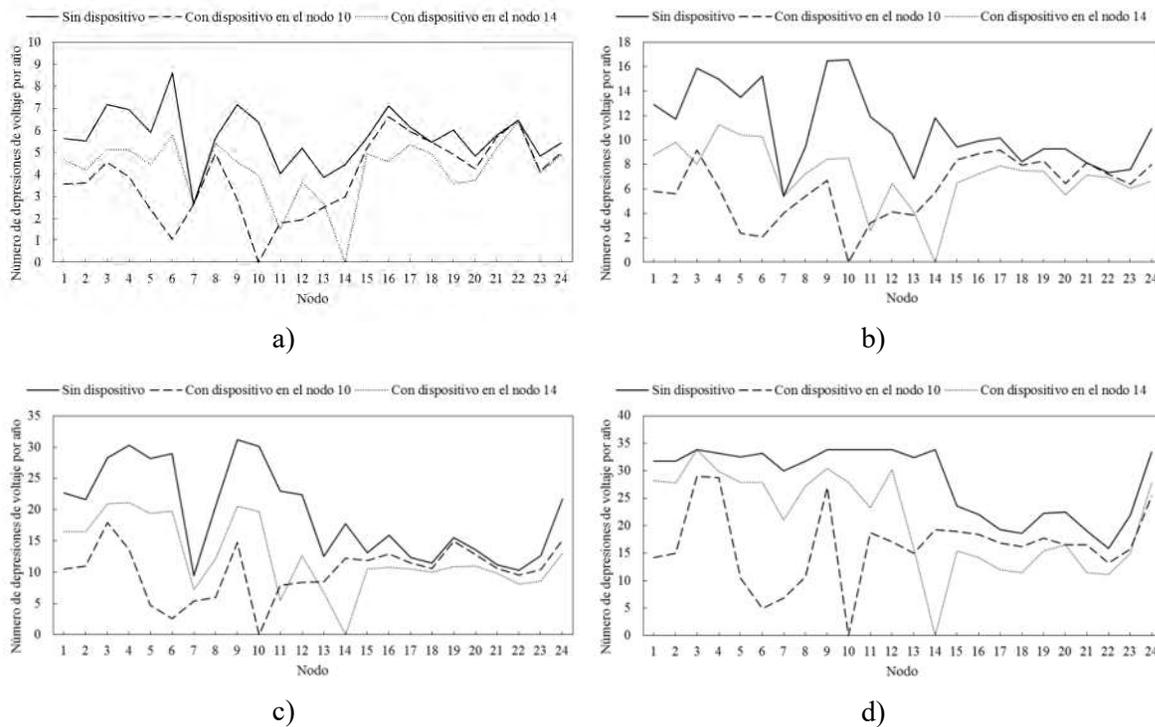


Figura 4.6. Número de depresiones de voltaje por año emplazando a la vez un dispositivo STATCOM en la red IEEE RTS-24; para los rangos de voltaje residual en p.u.: a) $0 \leq V_R \leq 0.6$; b) $0 \leq V_R \leq 0.7$; c) $0 \leq V_R \leq 0.8$; d) $0 \leq V_R \leq 0.9$

La Tabla 4.1 y la Fig. 4.7 presentan el número total de depresiones de voltaje por año en la red eléctrica para cada rango de voltaje residual de forma correspondiente al

emplazamiento de los dispositivos; se puede observar que, en este caso, instalar el dispositivo en el nodo 10 representa un mayor beneficio, debido a que contribuye más significativamente en la reducción del número total de depresiones.

Tabla 4.1. Número total de depresiones de voltaje por año emplazando a la vez un dispositivo STATCOM en la red IEEE RTS-24

Rango de voltaje residual [p.u.]	0 a 0.6	0 a 0.7	0 a 0.8	0 a 0.9
Sin dispositivo	136.7	263.4	464.5	678.6
Con dispositivo en el nodo 14	101.3	170.3	302.0	501.9
Con dispositivo en el nodo 10	92.3	143.1	243.9	392.8

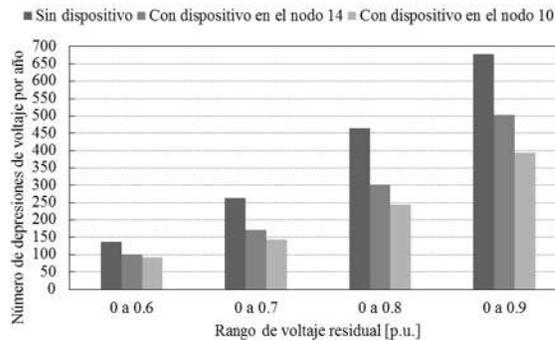


Figura 4.7. Número total de depresiones de voltaje por año emplazando a la vez un dispositivo STATCOM en la red IEEE RTS-24

Emplazamiento de cuatro dispositivos STATCOM

La Fig. 4.8 ilustra el proceso para obtener el emplazamiento óptimo de cuatro dispositivos STATCOM mediante GAs. Se observa que el valor de aptitud del mejor individuo, correspondiente a la última generación, también corresponde al valor de la aptitud promedio.

Con la finalidad de observar el beneficio de aplicar un proceso de optimización, la Fig. 4.9 muestra el número de depresiones de voltaje por año en cada nodo de la red para diferentes rangos de voltaje residual en valores p.u. Se presenta comparativamente el efecto del emplazamiento óptimo de los dispositivos, ubicados en los nodos: 2, 9, 10 y 16, con respecto a un emplazamiento para el cual se toma como criterio ubicar los STATCOMs en los nodos que muestran un mayor número de depresiones de voltaje por año sin dispositivos

instalados, en este caso en los nodos: 3, 10, 12 y 14 (indicado como “no óptimo” en la Fig. 4.9, Fig. 4.10 y Tabla 4.2).

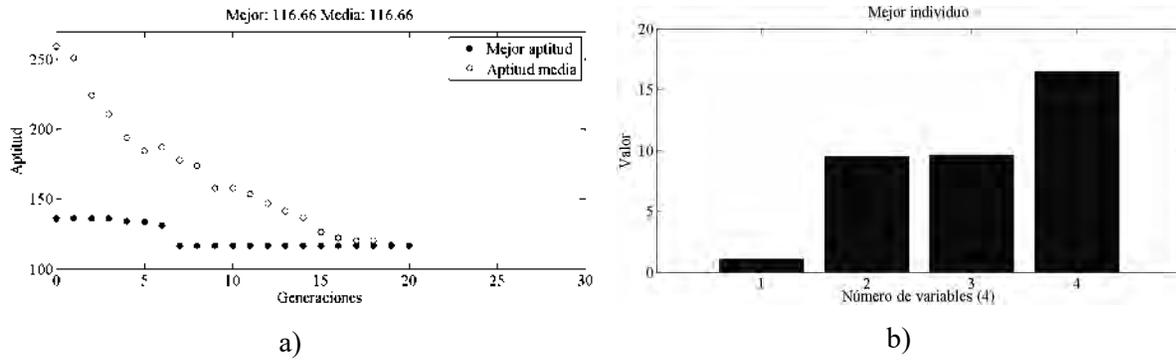


Figura 4.8. Proceso para obtener el emplazamiento óptimo de cuatro dispositivos STATCOM en la red IEEE RTS-24: a) Aptitud del mejor individuo en cada generación; b) Mejor individuo

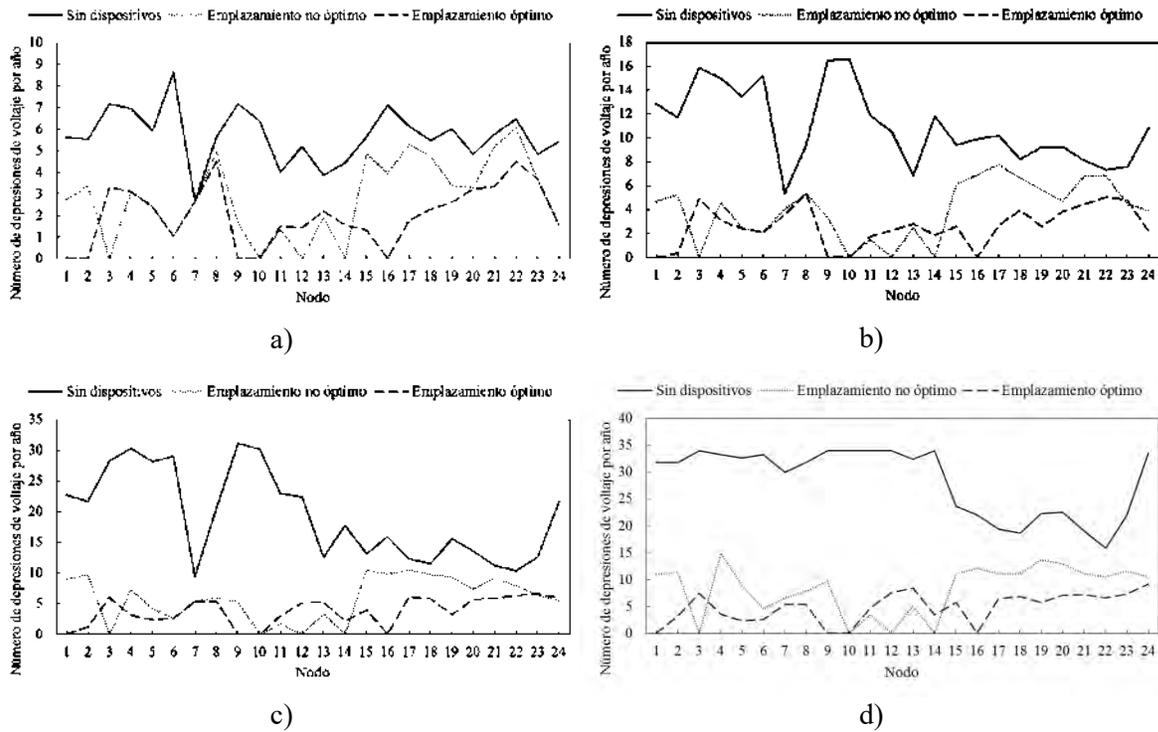


Figura 4.9. Número de depresiones de voltaje por año emplazando cuatro dispositivos STATCOM en la red IEEE RTS-24; para rangos de voltaje residual en p.u.: a) $0 \leq V_R \leq 0.6$; b) $0 \leq V_R \leq 0.7$; c) $0 \leq V_R \leq 0.8$; d) $0 \leq V_R \leq 0.9$

La Tabla 4.2 y la Fig. 4.10 presentan el número total de depresiones por año en la red para cada rango de voltaje residual correspondientemente al emplazamiento de los dispositivos. Se observa que la instalación óptima representa un mayor beneficio, debido a que contribuye más significativamente en la reducción del número total de depresiones, tanto en el rango de 0 a 0.9 p.u. de voltaje residual considerado para la optimización, como en los otros rangos.

Tabla 4.2. Número total de depresiones de voltaje por año emplazando cuatro dispositivos STATCOM en la red IEEE RTS-24

Rango de voltaje residual [p.u.]	0 a 0.6	0 a 0.7	0 a 0.8	0 a 0.9
Sin dispositivos	136.7	263.4	464.5	678.6
Emplazamiento no óptimo	66.9	95.7	140.6	199.2
Emplazamiento óptimo	47.8	62.6	91.3	116.7

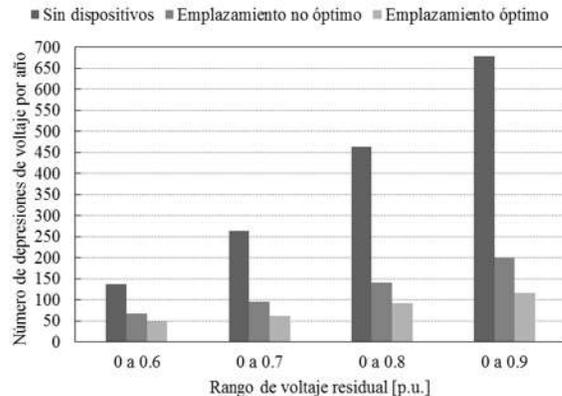


Figura 4.10. Número total de depresiones de voltaje por año emplazando cuatro dispositivos STATCOM en la red IEEE RTS-24

4.4.2.2 Estudios en la red IEEE TC-118

En este apartado se aplica la metodología propuesta, para el emplazamiento óptimo de dispositivos STATCOM basada en GAs, en la red IEEE *Test Case* de 118 nodos (IEEE TC-118). Esta red, que se muestra en la Fig. 4.11, consiste de 35 unidades de generación, 118 nodos interconectados por 177 líneas de transmisión y 9 transformadores. Los datos de los parámetros de la red se encuentran disponibles en [UWEE, 1993].

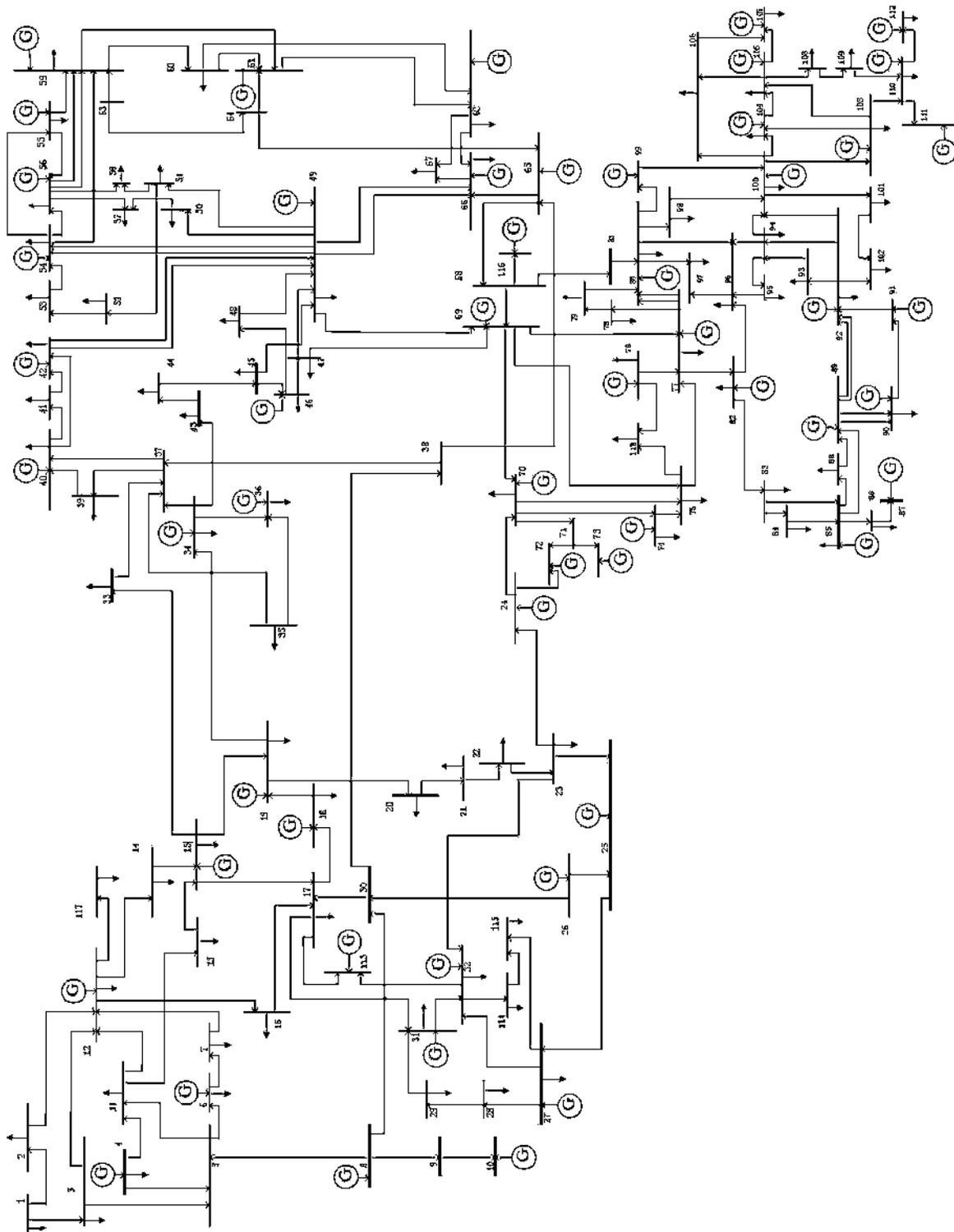


Figura 4.11. Diagrama de la red IEEE TC-118

Emplazamiento de doce dispositivos STATCOM

La Fig. 4.12 ilustra el proceso para obtener el emplazamiento óptimo de doce dispositivos STATCOM mediante GAS. Se observa que el valor de aptitud del mejor individuo, correspondiente a la última generación, es de 1059 y el valor promedio de aptitud de dicha generación es de 1078.4.

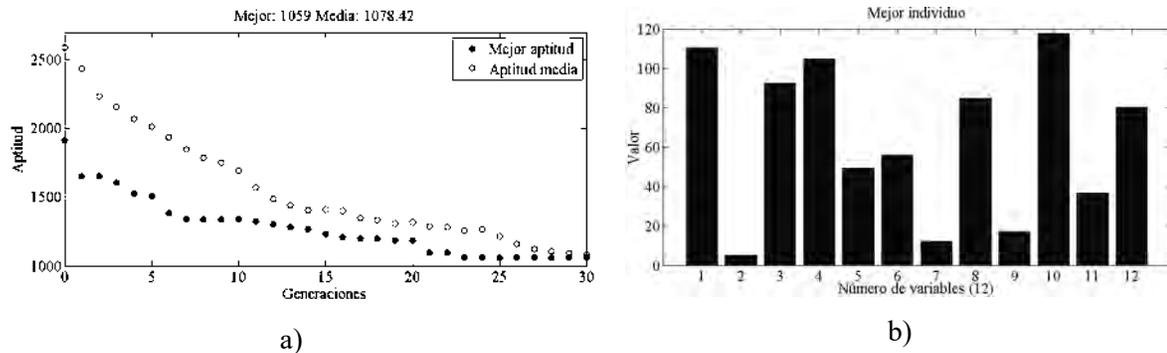


Figura 4.12. Proceso para obtener el emplazamiento óptimo de doce dispositivos STATCOM en la red IEEE TC-118: a) Aptitud del mejor individuo en cada generación; b) Mejor individuo

Con el propósito de observar la utilidad de aplicar un proceso de optimización, la Fig. 4.13 muestra el número de depresiones de voltaje por año en cada nodo de la red para diferentes rangos de voltaje residual en valores p.u. Se presenta comparativamente el efecto del emplazamiento óptimo de los dispositivos, ubicados en los nodos: 5, 12, 17, 37, 49, 56, 80, 85, 92, 105, 110 y 118; con respecto a un emplazamiento para el cual se toma como criterio ubicar los STATCOMs en algunos de los nodos que muestran un mayor número de depresiones de voltaje por año sin dispositivos instalados, como son los nodos: 15, 20, 30, 34, 37, 43, 47, 65, 69, 80, 94 y 98 (indicado como “no óptimo” en la Fig. 4.13, Fig. 4.15, Fig. 4.16 y Tabla 4.3).

De la Fig. 4.13 se observa que al incluir los doce dispositivos se logra una reducción importante en el número de depresiones de voltaje en los nodos, de manera más significativa en aquellos que están cercanos a los que tienen dispositivo instalado; de acuerdo a las consideraciones hechas en este estudio, en los nodos con dispositivo no se presentan depresiones de voltaje. Además, es evidente que cuando se emplazan los dispositivos aplicando la técnica de optimización, se obtiene una mayor reducción del número de depresiones de voltaje en el sistema eléctrico.

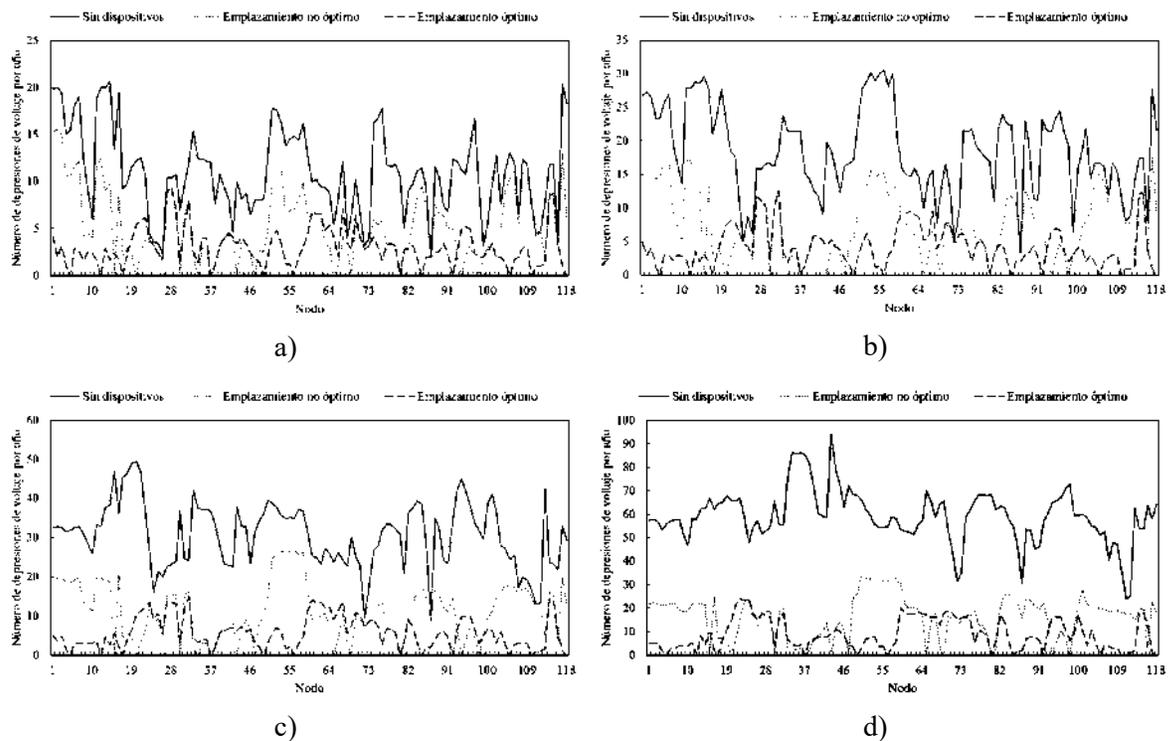


Figura 4.13. Número de depresiones de voltaje por año emplazando doce dispositivos STATCOM en la red IEEE TC-118; para rangos de voltaje residual en p.u.: a) $0 \leq V_R \leq 0.6$; b) $0 \leq V_R \leq 0.7$; c) $0 \leq V_R \leq 0.8$; d) $0 \leq V_R \leq 0.9$

Se pueden presentar casos especiales donde previamente ya se cuenta con dispositivos instalados y se desean agregar algunos otros de manera óptima. La Fig. 4.14 ilustra el proceso para encontrar el emplazamiento óptimo de doce dispositivos STATCOM mediante GAs, incluyendo un dispositivo fijo en el nodo 25. La aplicación de la metodología resulta en que los dispositivos restantes deben ser ubicados en los nodos: 12, 17, 19, 24, 47, 58, 64, 68, 77, 83 y 102. Se observa que la mejor solución se obtiene en la generación 21 con un valor de aptitud igual al promedio de dicha generación.

La Fig. 4.15 muestra comparativamente el número de depresiones de voltaje por año en cada nodo de la red para diferentes rangos de voltaje residual en p.u. Se puede observar que el emplazamiento óptimo, sin incluir dispositivos fijos, produce una reducción más significativa en el número de eventos para la mayoría de los nodos de la red.

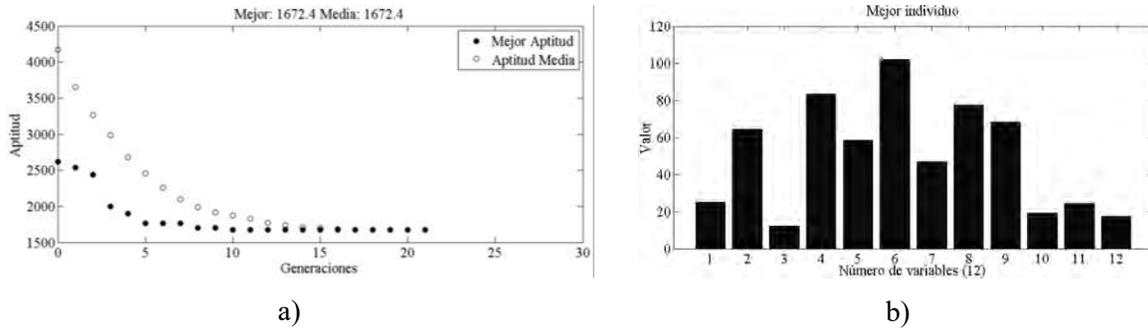


Figura 4.14. Emplazamiento óptimo de doce dispositivos STATCOM, con uno fijo en el nodo 25, en la red IEEE TC-118: a) Aptitud del mejor individuo en cada generación; b) Mejor individuo

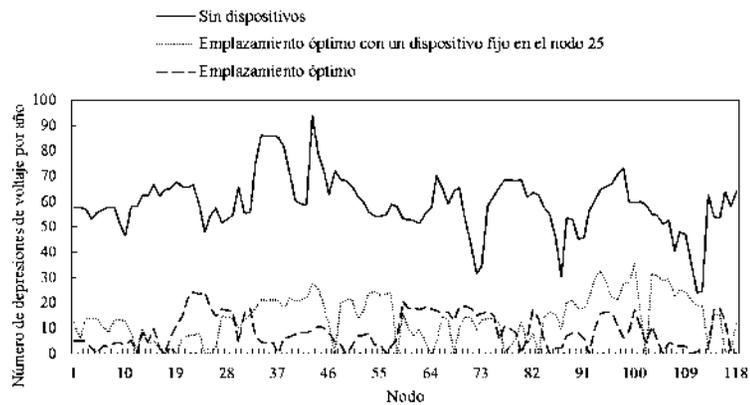


Figura 4.15. Número de depresiones de voltaje por año emplazando óptimamente doce dispositivos STATCOM en la red IEEE TC-118; para el rango de voltaje residual en p.u. $0 \leq V_R \leq 0.9$

De la Tabla 4.3 y la Fig. 4.16 se observa que la instalación óptima de dispositivos representa un mayor beneficio, debido a que contribuye más significativamente en la reducción del número total de depresiones por año para todos los rangos de voltaje residual considerados.

Tabla 4.3. Número total de depresiones de voltaje por año emplazando doce dispositivos STATCOM en la red IEEE TC-118

Rango de voltaje residual [p.u.]	0 a 0.6	0 a 0.7	0 a 0.8	0 a 0.9
Sin dispositivos	1302.4	2192.0	3630.4	6991.0
Emplazamiento no óptimo	626.8	915.0	1330.0	1926.6
Emplazamiento óptimo con un dispositivo fijo en el nodo 25	471.0	689.0	988.8	1672.2
Emplazamiento óptimo	358.4	491.8	685.4	1059.0

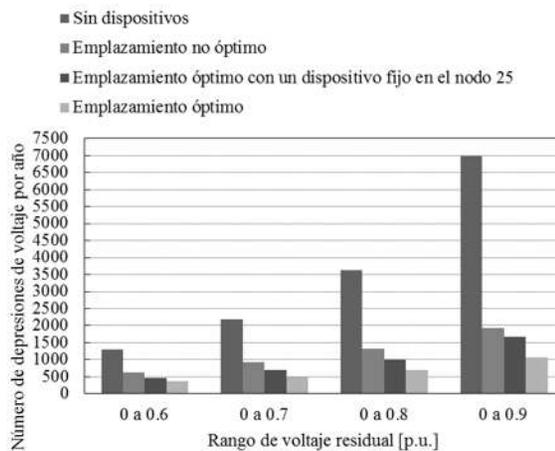


Figura 4.16. Número total de depresiones de voltaje por año emplazando doce dispositivos STATCOM en la red IEEE TC-118

4.5. Emplazamiento de un número mínimo de dispositivos STATCOM

En esta sección se plantea la formulación y solución al problema de la determinación de un número mínimo de dispositivos STATCOM y su emplazamiento, para reducir la cantidad de depresiones de voltaje por año de acuerdo con un valor de referencia especificado para todos los nodos de una red eléctrica. Esta formulación es una de las principales aportaciones de esta tesis.

Nuevamente se utilizan GAs para dar solución a la problemática mencionada y se llevan a cabo diversos casos de estudio que permiten observar el desempeño de la implementación realizada.

4.5.1. Formulación y solución del problema de optimización mediante GAs

El propósito del procedimiento es determinar un número mínimo de dispositivos STATCOM, y su ubicación, para reducir la cantidad de depresiones de voltaje por año en los nodos de una red eléctrica considerando sus valores de referencia, esto se representa por la siguiente función objetivo:

$$\min \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.14)$$

Donde x_i representa cada uno de los elementos de un vector binario X , de longitud igual al número de nodos de la red eléctrica n , esto es:

$$\begin{aligned} X &= [x_1 \quad x_2 \quad \cdots \quad x_n] \\ x_i &= 1 \text{ ó } 0 \quad \forall 1 \leq i \leq n \end{aligned} \quad (4.15)$$

De esta forma, si un elemento toma el valor de 1 indica que existe un dispositivo instalado en el nodo correspondiente a su posición en el vector, de otra forma señala que no existe dispositivo instalado.

Asimismo, el problema se encuentra sujeto a las siguientes restricciones:

$$f_{est,i} \leq f_{ref,i} \quad \forall 1 \leq i \leq n \quad (4.16)$$

Donde $f_{est,i}$ es el número de depresiones de voltaje por año estimadas en el nodo i y $f_{ref,i}$ es el número de referencia de depresiones por año para el mismo nodo, esto es, el número máximo de depresiones que se podrán tener en el nodo i .

Como se mencionó anteriormente, se emplean GAs para solucionar este problema de optimización. También se utilizan los mismos operadores genéticos descritos en la Subsección 4.4.1. La Fig. 4.17 muestra todas las etapas del procedimiento que incluye:

- 1) Lectura de datos de los parámetros de la red eléctrica conteniendo el número de depresiones de voltaje por año de referencia para todos los nodos de acuerdo al rango de voltaje residual considerado.

- 2) Evaluación base de depresiones de voltaje mediante el método de posición de fallas, considerando cinco posiciones de falla en las líneas de transmisión, sin tomar en cuenta dispositivos STATCOM instalados.
- 3) Identificación de una problemática de depresiones de voltaje por año si en algunos nodos se supera su valor de referencia; en caso de no presentarse se da por terminado el procedimiento.
- 4) Si existe la mencionada problemática se ejecuta la rutina del GA, primeramente se crea una población inicial de individuos donde cada uno representa una posible solución al problema, es decir, el emplazamiento del menor número de dispositivos conforme a las características establecidas en la Ec. (4.15)
- 5) De acuerdo a la función objetivo establecida en la Ec. (4.14), se evalúan todos los individuos de la población para obtener su valor de aptitud. Para este fin, se utiliza el método de posición de fallas que incorpora el modelado de los dispositivos STATCOM.
- 6) Se verifica el criterio de paro del GA; en caso de no cumplirse, se crea una nueva población que reemplaza a la anterior, mediante los operadores genéticos de selección, cruzamiento y mutación.
- 7) Una vez que se cumple con la condición de paro se obtiene la solución al problema de optimización, es decir, el número mínimo de dispositivos STATCOM y su emplazamiento, de manera que la cantidad de depresiones de voltaje por año en todos los nodos de la red sea inferior o igual a su valor de referencia.

4.5.2. Casos de estudio

En esta subsección se presenta la aplicación de la metodología propuesta para el emplazamiento de un número mínimo de dispositivos, basada en GAs e implementada en el ambiente MATLAB®, en las redes IEEE RTS-24 e IEEE TC-118. Además, se muestra el efecto que tiene la instalación de STATCOMs en la reducción del número de depresiones de voltaje por año en los nodos de una red eléctrica. Nuevamente se consideran fallas trifásicas sólidas.

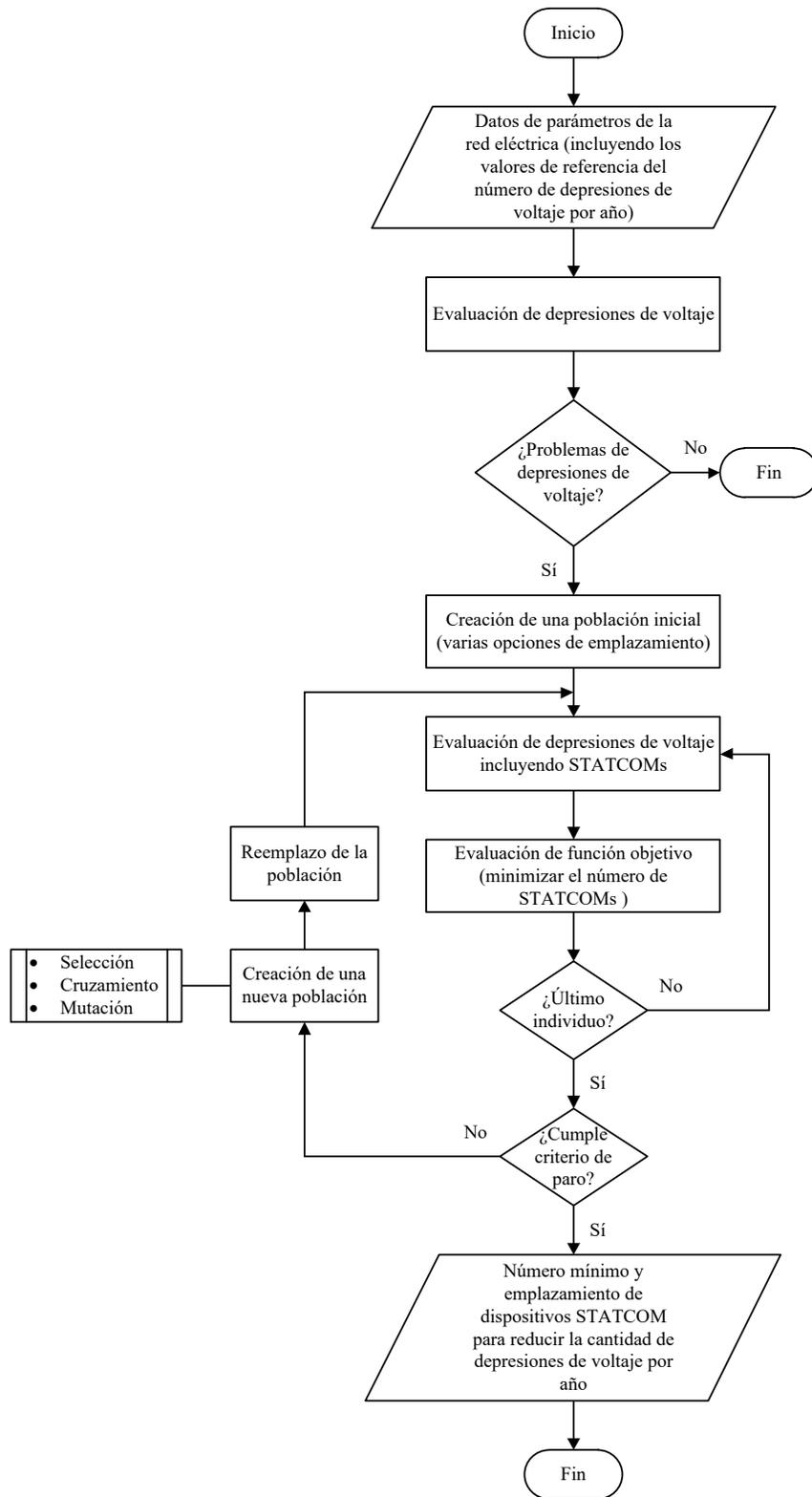


Figura 4.17. Diagrama de flujo para determinar el número mínimo de dispositivos STATCOM y su emplazamiento, para reducir la cantidad de depresiones de voltaje por año en los nodos de una red eléctrica

4.5.2.1 Estudios en la red IEEE RTS-24

En este apartado se llevan a cabo diferentes casos de estudio que muestran, en diversos rangos de voltaje residual, la disminución del número de depresiones de voltaje por año en los nodos de la red IEEE RTS-24 debido al emplazamiento de un número mínimo de dispositivos STATCOM. Para estos casos de estudio, respecto al criterio de paro del GA, se consideró un número máximo de 40 generaciones.

La Fig. 4.18 ilustra el valor de la aptitud del mejor individuo en cada generación del proceso para obtener mediante GAs, el emplazamiento y el número mínimo de dispositivos STATCOM para reducir la cantidad de depresiones de voltaje en los nodos de la red eléctrica cuyo número de disturbios sin dispositivos instalados es mayor que su valor de referencia correspondiente, considerando el rango de voltaje residual en p.u. de $0 \leq V_R \leq 0.7$. El resultado del proceso de optimización indica que son necesarios dos dispositivos ubicados en los nodos 10 y 17.

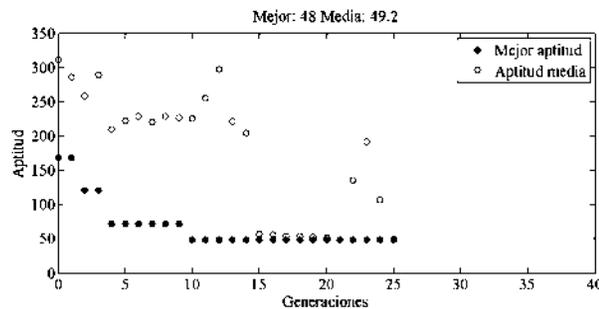


Figura 4.18. Aptitud del mejor individuo en cada generación para obtener el número mínimo de dispositivos STATCOM y su emplazamiento en la red IEEE RTS-24, considerando el rango de voltaje residual $0 \leq V_R \leq 0.7$ p.u.

En la Tabla 4.4 se muestran, para el rango de voltaje residual considerado, el número de depresiones de voltaje por año tomado como referencia en cada uno de los nodos, es decir, el número máximo de depresiones de voltaje que se pueden tener en cada nodo; se muestran también las depresiones de voltaje antes y después de aplicar el proceso de optimización. Se observa que previamente a la aplicación de la metodología para determinar el número mínimo de dispositivos STATCOM y su emplazamiento, diez de los nodos tenían un número de depresiones del voltaje superior al valor de referencia, lo que representa el 41% de los nodos de la red.

Tabla 4.4. Número de depresiones de voltaje por año en la red IEEE RTS-24 al emplazar un número mínimo de dispositivos STATCOM para el rango de voltaje residual de $0 \leq V_R \leq 0.7$ p.u.

		Rango de voltaje residual [p.u.]					
		0 a 0.7		0 a 0.8		0 a 0.9	
No- do	Refe- rencia	Sin dispositivos	Con dispositivos	Sin dispositivos	Con dispositivos	Sin dispositivos	Con dispositivos
1	17.0	12.9	5.8	22.7	10.5	31.7	14.0
2	7.0	11.7	5.6	21.6	11.0	31.7	14.1
3	24.0	15.9	6.4	28.2	11.3	33.9	25.8
4	9.0	15.0	6.1	30.3	12.8	33.2	25.3
5	20.0	13.5	2.4	28.2	4.8	32.6	10.5
6	20.0	15.2	2.1	28.9	2.6	33.2	4.9
7	8.0	5.4	4.0	9.4	5.4	30.0	6.9
8	7.0	9.4	5.4	20.6	6.0	31.7	10.6
9	10.0	16.5	6.6	31.1	11.6	33.9	24.6
10	22.0	16.6	0.0	30.1	0.0	33.9	0.0
11	7.0	11.9	3.0	22.9	5.2	33.9	14.8
12	16.0	10.5	3.3	22.4	6.9	33.9	14.0
13	4.0	6.9	3.7	12.6	6.6	32.4	11.1
14	18.0	11.8	3.2	17.7	5.6	33.9	14.4
15	7.0	9.4	4.3	13.1	5.8	23.6	10.0
16	15.0	9.9	2.3	15.9	6.1	22.1	11.2
17	13.0	10.2	0.0	12.3	0.0	19.3	0.0
18	12.0	8.2	1.3	11.5	2.2	18.6	4.6
19	6.0	9.3	4.2	15.5	6.8	22.2	13.1
20	6.0	9.3	5.1	13.6	7.8	22.5	11.7
21	4.0	8.1	3.6	11.2	4.6	19.1	6.8
22	10.0	7.3	3.3	10.4	4.6	15.9	6.2
23	11.0	7.6	5.5	12.6	7.8	21.9	10.7
24	14.0	10.9	4.9	21.7	8.4	33.4	18.6
To- tal	287.0	263.4	92.2	464.5	154.6	678.6	283.6

Cabe mencionar que si bien el proceso de optimización se realiza considerando el rango de voltaje residual en p.u. $0 \leq V_R \leq 0.7$, en la Tabla 4.4 se observa que en los rangos de $0 \leq V_R \leq 0.8$ y de $0 \leq V_R \leq 0.9$, también se tiene una reducción significativa en el número de depresiones de voltaje que ocurren en la red eléctrica.

Luego de emplazar los dispositivos, los valores obtenidos de depresiones de voltaje por año en todos los nodos son inferiores a sus valores de referencia, esto se muestra claramente en la Fig. 4.19. Además, el número total de depresiones de voltaje por año en la red, que sin dispositivos instalados era de 263.4, se reduce significativamente a un valor de 92.2.

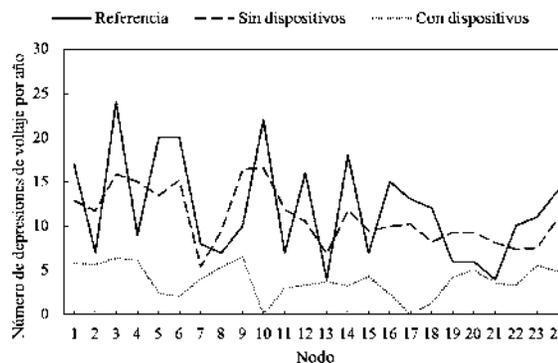


Figura 4.19. Depresiones de voltaje por año emplazando un número mínimo dispositivos STATCOM en la red IEEE RTS-24, considerando el rango de voltaje residual en p.u. $0 \leq V_R \leq 0.7$

La Fig. 4.20 ilustra el valor de la aptitud de los mejores individuos en cada generación de los procesos para obtener mediante GAs el emplazamiento y el número mínimo de dispositivos STATCOM para reducir la cantidad de depresiones de voltaje por año en los nodos de la red eléctrica, considerando sus valores de referencia correspondientes y diferentes rangos de voltaje residual en p.u. Dichos valores de referencia se presentan en el Apéndice A.

Los resultados de los procesos de optimización indican que para el rango de voltaje residual en p.u. $0 \leq V_R \leq 0.8$ son necesarios tres dispositivos, ubicados en los nodos: 9, 10 y 16; y para el rango $0 \leq V_R \leq 0.9$ también son necesarios tres STATCOMs, ubicados en los nodos: 4, 6 y 16. Se puede notar que en todos los casos el GA obtiene la mejor solución antes de exceder el número máximo de generaciones.

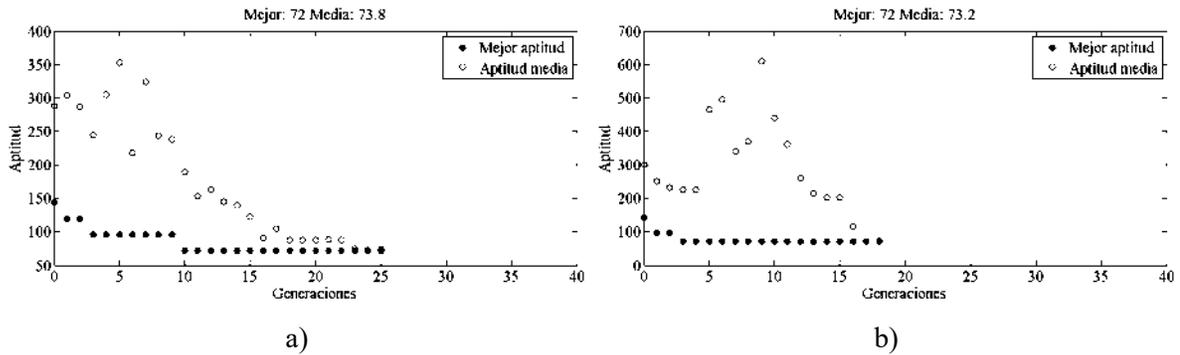


Figura 4.20. Aptitud de los mejores individuos en cada generación para obtener el número mínimo de dispositivos STATCOM y su emplazamiento en la red IEEE RTS-24, considerando los rangos de voltaje residual en p.u.: a) $0 \leq V_R \leq 0.8$; b) $0 \leq V_R \leq 0.9$

En la Fig. 4.21 se muestra comparativamente el número de depresiones de voltaje por año en todos los nodos de la red para diferentes rangos de voltaje residual en valores p.u. Se puede observar que en muchos casos la línea discontinua, que representa el número de depresiones de voltaje por año sin considerar dispositivos instalados, toma valores superiores a la línea continua que indica los valores de referencia de los mencionados eventos; de forma contraria la línea punteada, que representa el número de eventos con dispositivos instalados, en ningún caso supera los valores de referencia. Se muestra así la efectividad de la metodología propuesta.

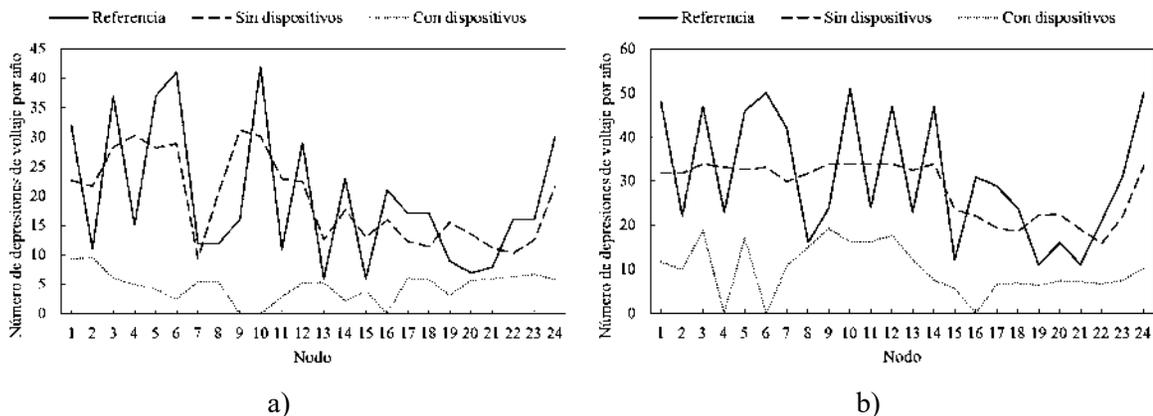


Figura 4.21. Número de depresiones de voltaje por año emplazando un número mínimo dispositivos STATCOM en la red IEEE RTS-24, considerando los rangos de voltaje residual en p.u.:

a) $0 \leq V_R \leq 0.8$; b) $0 \leq V_R \leq 0.9$

4.5.2.2 Estudios en la red IEEE TC-118

De igual forma que para la red IEEE RTS-24, en este apartado se presentan diversos casos de estudio en la red IEEE TC-118 que demuestran la reducción del número de depresiones de voltaje por año en sus nodos al instalar un número mínimo de dispositivos STATCOM. Para estos casos de estudio, respecto al criterio de paro del GA, se consideró un número máximo de 60 generaciones.

La Fig. 4.22 ilustra el valor de la aptitud de los mejores individuos en cada generación de los procesos de optimización correspondientes al considerar diferentes rangos de voltaje residual en p.u.; se observa que en todos los casos el GA obtiene la mejor solución antes de exceder el número máximo de generaciones. Asimismo, la Tabla 4.5 presenta el emplazamiento de los dispositivos en la red eléctrica para los distintos rangos de voltaje residual.

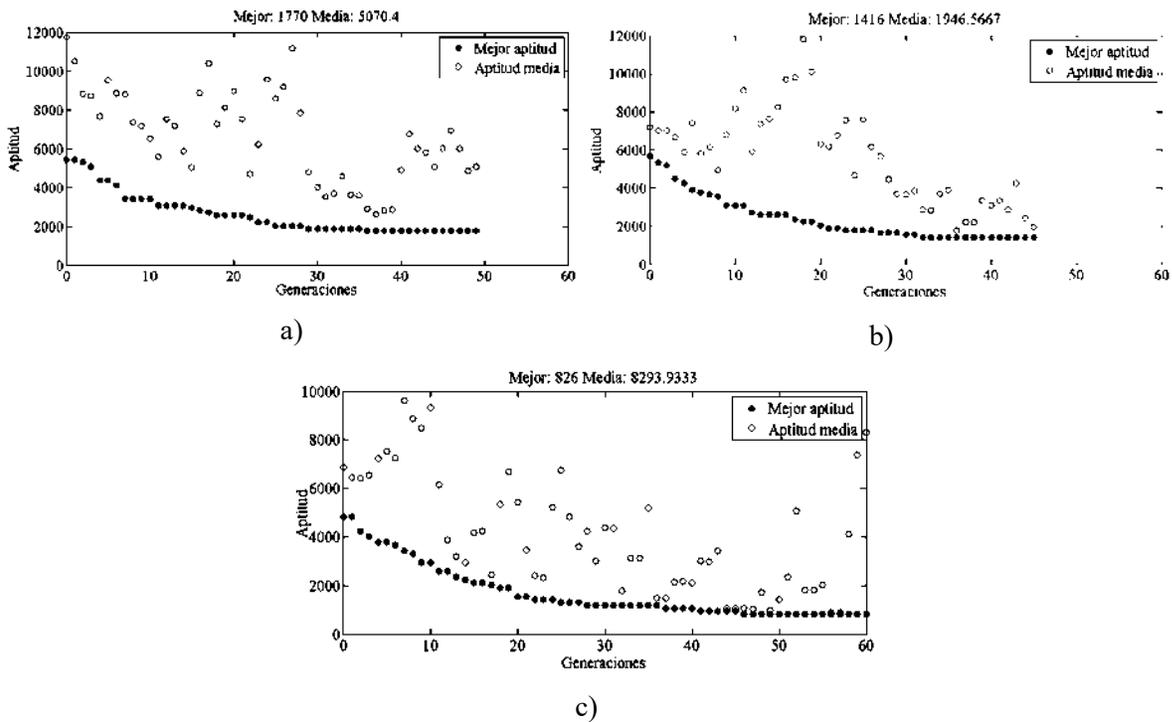
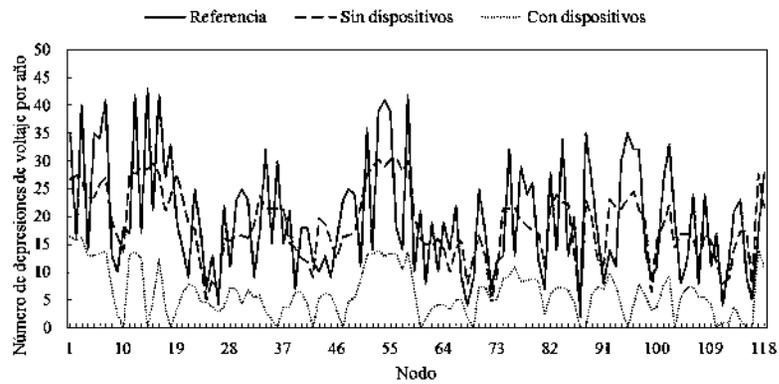


Figura 4.22. Aptitud de los mejores individuos en cada generación para obtener el número mínimo de dispositivos STATCOM y su emplazamiento en la red IEEE TC-118, considerando los rangos de voltaje residual en p.u.: a) $0 \leq V_R \leq 0.7$; b) $0 \leq V_R \leq 0.8$; c) $0 \leq V_R \leq 0.9$

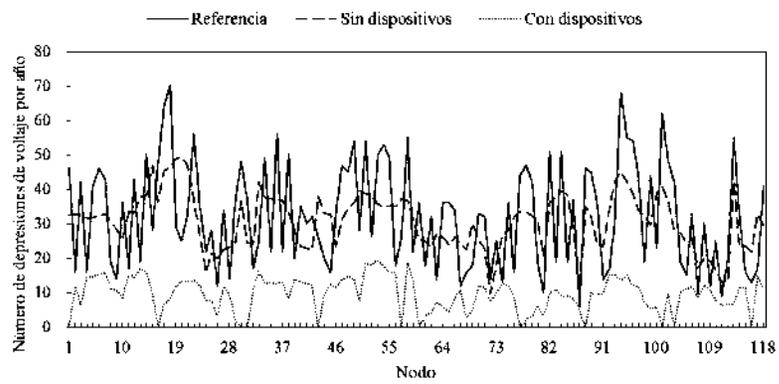
Tabla 4.5. Número mínimo de dispositivos STATCOM emplazados en la red IEEE TC-118 considerando diferentes rangos de voltaje residual

Rango de voltaje residual [p.u.]	Total de dispositivos	Nodos con dispositivo
de 0 a 0.7	15	10, 14, 18, 36, 42, 47, 60, 69, 87, 88, 95, 103, 110, 115 y 116
de 0 a 0.8	12	1, 16, 30, 31, 43, 57, 60, 77, 88, 101, 103 y 116
de 0 a 0.9	7	16, 19, 46, 60, 69, 85 y 100

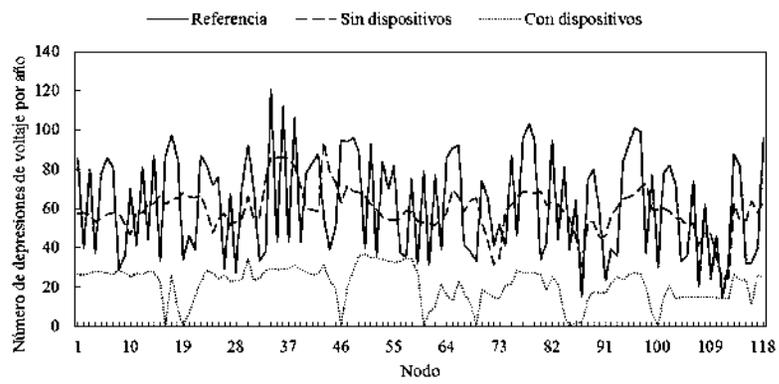
La Fig. 4.23 muestra comparativamente el número de depresiones de voltaje por año en todos los nodos de la red eléctrica para diferentes rangos de voltaje residual. Se puede observar que en algunos nodos el número de depresiones de voltaje, sin considerar dispositivos instalados, toma valores superiores a los de referencia; para estos casos de estudio antes de emplazar los dispositivos se tienen 50 nodos con valores de depresiones de voltaje por año que superan sus valores de referencia correspondientes, esto quiere decir que en el 42% de los nodos de la red se debe reducir el número de disturbios. Se puede ver que luego de emplazar los dispositivos el número de depresiones de voltaje en ninguno de los nodos supera su valor de referencia. Se muestra así la efectividad de la metodología propuesta. Los valores de referencia del número de depresiones de voltaje por año considerados para todos los rangos de voltaje residual se presentan en el Apéndice B.



a)



b)



c)

Figura 4.23. Número de depresiones de voltaje por año emplazando un número mínimo de dispositivos STATCOM en la red IEEE TC-118, considerando los rangos de voltaje residual en p.u.: a) $0 \leq V_R \leq 0.7$; b) $0 \leq V_R \leq 0.8$; c) $0 \leq V_R \leq 0.9$

4.6. Conclusiones

En este capítulo se presentó la propuesta e implementación de dos metodologías basadas en GAs; la primera de ellas tiene como objetivo emplazar un número fijo de dispositivos STATCOM en una red eléctrica para minimizar la cantidad total de depresiones de voltaje por año presentes en la misma; y la segunda tiene como finalidad determinar un número mínimo de dispositivos y su emplazamiento, de manera que se reduzca la cantidad de depresiones de voltaje por año en todos los nodos de una red considerando valores de referencia.

Los casos de estudio llevados a cabo en las redes de prueba IEEE RTS-24 e IEEE TC-18, muestran que las implementaciones realizadas en esta tesis funcionan adecuadamente, demostrando además la efectividad de utilizar dispositivos STATCOM para la mitigación de depresiones de voltaje.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y trabajos futuros

Con el desarrollo de esta tesis se cumplieron los objetivos planteados al inicio de la misma, lo cual se muestra de manera clara en los casos de estudio presentados. A continuación se señalan las conclusiones más relevantes de su desarrollo y además se presentan algunas sugerencias para trabajos futuros.

5.1. Conclusiones

Las conclusiones de esta tesis son las siguientes:

- Se abordaron aspectos relevantes sobre las depresiones de voltaje, sus efectos y las estrategias para su mitigación.
- Se mostró un panorama general de algunas técnicas de AI, como son las ANNs y los GAs, y su aplicación para resolver aspectos como el control y el emplazamiento de dispositivos FACTS en una red eléctrica.
- Se propuso e implementó, en el ambiente MATLAB Simulink®, un esquema de control basado en ANNs para DVRs que permite la detección casi inmediata de disturbios, reduciendo los transitorios de voltaje al inicio y al final de la compensación de fenómenos como depresiones y elevaciones de voltaje simétricas y asimétricas.
- Se simularon, en el ambiente MATLAB Simulink®, algunas de las nuevas topologías de DVRs basadas en convertidores directos CA/CA, permitiendo estudiar su funcionamiento y sus métodos de control; además de comprobar su eficiencia en la mitigación de diversos fenómenos de PQ como son las depresiones y las elevaciones de voltaje, la distorsión armónica y el parpadeo.
- Se presentó e implementó, en el ambiente MATLAB®, una metodología basada en GAs para el emplazamiento óptimo de k dispositivos STATCOM en una red

eléctrica, con la finalidad de minimizar el número total de depresiones de voltaje por año presentes en la misma.

- Se planteó e implementó, en el ambiente MATLAB®, una metodología basada en GAs para determinar el número mínimo de dispositivos STATCOM y su emplazamiento, con la finalidad de reducir la cantidad de depresiones de voltaje por año en todos los nodos de una red eléctrica tomando en cuenta valores de referencia, es decir, valores máximos permitidos en cada nodo.

5.2. Trabajos futuros

El trabajo realizado en esta tesis puede ser enriquecido investigando sobre los aspectos mencionados a continuación:

- El método de posición de fallas utilizado para predecir el número de depresiones de voltaje presentes en una red eléctrica es computacionalmente muy costoso, su velocidad y precisión dependen del número de nodos ficticios considerado, por lo que se pueden tratar de implementar procesos mediante técnicas de procesamiento en paralelo que permitan mejorar su desempeño.
- En los casos de estimación estocástica de depresiones de voltaje se han supuesto voltajes de prefalla unitarios p.u. en todos los nodos de la red eléctrica, estos voltajes de prefalla se pueden obtener a partir de un estudio previo de flujos de potencia para su inclusión en el cálculo de las depresiones de voltaje.
- En esta tesis únicamente se realiza la estimación de la frecuencia de ocurrencia de las depresiones de voltaje; sin embargo, se puede también contemplar estimar su duración.
- En las aplicaciones de ANNs y GAs se han utilizado las rutinas propias del ambiente MATLAB®, pero se podría experimentar empleando rutinas desarrolladas de forma independiente que pudieran ajustarse de mejor manera a las soluciones de las problemáticas aquí afrontadas.

Referencias

[ABB, 2004]

ABB, “PCS 6000 - Static Frequency Converters. Modular Power Electronics”, 2004.

Available at:

<http://www05.abb.com/global/scot/scot232.nsf/veritydisplay/42807866bfe57b64c12570150048770a>

[ABB, 2011]

ABB, “STATCOM Replaces Critical Urban Generation for Voltage Control and Stability”, 2011. Available at:

<http://www05.abb.com/global/scot/scot221.nsf/veritydisplay/525e8cf8cebf2597c1257878004023e7>

[Arias *et al.*, 2008]

M. Arias, M. Aedo, G. Olguín, “Monte Carlo Simulation Applied to the Estimation of Voltage Dips in Electric Networks”, *Ingeniare Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 16, no. 2, pp. 342-351, 2008.

[Arrillaga *et al.*, 2002]

J. Arrillaga, M. Bollen, N. Watson, “Power Quality Following Deregulation”, *Proceedings of the IEEE*, vol. 88, no. 2, pp. 2886-2891, February 2002.

[Aung y Milanovic, 2005]

M. Anug, J. Milanovic, “Analytical Assessment of the Effects of Voltage Sags on Induction Motor Dynamic Responses”, *IEEE Russia Power Tech*, June 2005.

[Babaei *et al.*, 2010]

E. Babaei, M. Farhadi, M. Sabahi, “Mitigation of Voltage Disturbances Using Dynamic Voltage Restorer Based on Direct Converters”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2676-2683, October 2010.

[Bollen, 2000]

M. Bollen, *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*, IEEE Press Series on Power Engineering, 2000.

[Brooks *et al.*, 1998]

D. Brooks, R. Dugan, M. Waclawiak, A. Sundaram, "Indices for Assessing Utility Distribution System RMS Variation Performance", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, pp. 254-259, January 1998.

[Caballero *et al.*, 2003]

R. Caballero, J. Molina, M. Luque, A. Torrico, T. Gómez, "Algoritmos Genéticos para la Resolución de Problemas de Programación por Metas Entera", *Universidad de Málaga Departamento de Economía Aplicada*, 2003. Disponible en: <http://www.uv.es/asepuma/X/J01C.pdf>

[Cardona y Barros, 2006]

J. Cardona, J. Barros, "ATP Prediction of Voltage Sag Effect on Sensitive Loads", *ICREPO International Conference on Renewable Energy and Power Quality*, April 2006.

[Chung *et al.*, 2007]

Y. Chung, H. Kim, G. Kwon, T Park, S. Kim, K. Kim, J. Choe, "Dynamic Voltage Restorer with Neural Network Controlled Voltage Disturbance Detector and Real-Time Digital Voltage Control", *Power Engineering Society General Meeting IEEE*, July 2007.

[Da Silva y Nepomuceno, 2001]

I. Da Silva, L. Nepomuceno, "An Efficient Neural Approach to Economic Load Dispatch in Power Systems", *Power Engineering Society Summer Meeting IEEE*, July 2001.

[Djokic *et al.*, 2005]

S. Djokic, J. Milanovic, J. Desmet, R. Belmans, “Sensitivity of AC Adjustable Speed Drives to Voltage Sags and Short Interruptions”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 1, pp. 494-505, January 2005.

[Dugan *et al.*, 2004]

R. Dugan, M. McGranaghan, S. Santoso, H. Beaty, *Electrical Power Systems Quality*, McGraw-Hill, 2004.

[EN 50160, 1999]

European Norm, *EN 50160: Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Systems*, 1999.

[Espinosa y Hernández 2006]

E. Espinosa, A. Hernández, “An Analytical Approach for Stochastic Assessment of Balanced and Unbalanced Voltage Sags in Large Systems”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 21, no. 3, pp. 1493-1500, July 2006.

[Gestal, 2009]

M. Gestal, “Introducción a las Redes de Neuronas Artificiales”, *Universidade da Coruña Depto. Tecnologías de la Información y las Comunicaciones*, 2009. Disponible en: <http://sabia.tic.udc.es/mgestal/cv/RNATutorial/TutorialRNA.pdf>

[Goldberg, 1989]

D. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Reading England: Addison-Wesley, 1989.

[Grainger y Stevenson, 1996]

J. Grainger, W. Stevenson, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, 1996.

[Guasch *et al.*, 2004]

L. Guasch, F. Córcoles, J. Pedra, “Effects of Symmetrical and Unsymmetrical Voltage Sags on Induction Machines”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 2, pp. 774-782, April 2004.

[Guygyi *et al.*, 1995]

L. Guygyi, C. Schauder, S. Williams, T. Rietman, D. Torgerson, A. Edris, “The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 10, no. 2, pp. 1085-1097, April 1995.

[Habur y O’Leary, 2002]

K. Habur, D. O’Leary, Worldbank, “FACTS for Cost Effective and Reliable Transmission of Electrical Energy”, 2002. Available at: http://www.worldbank.org/html/fpd/em/transmission/facts_siemens.pdf

[Hingorani y Gyugyi, 2000]

N. Hingorani, L. Gyugyi, *Understanding FACTS; Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*, IEEE Press Book, 2000.

[Holland, 1975]

J. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Ann Arbor USA: University of Michigan Press, 1975.

[IEC 61000-4-30, 2002]

International Electrotechnical Commission, *IEC 61000-4-30: Testing and Measurement Techniques - Power Quality Measurement Methods*, 2002.

[IEEE RTS, 1999]

IEEE RTS Task force of the application of probability methods subcommittee, “IEEE Reliability Test System”, *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 14, no. 3, pp. 1010-1020, August 1999.

[IEEE Std. 141-1993, 1993]

Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std. 141-1993: Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants, The Red Book*, 2005.

[IEEE Std. 493-2007, 2007]

Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std. 493-2007: Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems, The Gold Book*, 2007.

[IEEE Std. 1100-2005, 2005]

Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std. 1100-2005: Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment, The Emerald Book*, 2005.

[IEEE Std. 1159-1995, 1995]

Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std. 1159-1995: Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, New York USA, 1995.

[IEEE Std. 1453-2004, 2004]

Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE Std. 1453-2004: Recommended Practice for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems*, 2004.

[ISG, 2004]

Intelligent Systems Group, “Algoritmos Genéticos”, *University of the Basque Country*, 2004. Available at: <http://www.sc.ehu.es/ccwbayes/docencia/mmcc/docs/temageneticos.pdf>

[Kamalasadan *et al.*, 2006]

S. Kamalasadan, A. Srivastava, D. Thukaram, “Novel Algorithm for Online Voltage Stability Assessment Based on Feed Forward Neural Network” *Power Engineering Society General Meeting IEEE*, June 2006.

[Kinalhal *et al.*, 2011]

V. Kinalhal, P. Agarwal, H. Gupta, “Performance Investigation of Neural-Network-Based Unified Power-Quality Conditioner” *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 26, no. 1, pp. 431-437, January 2011.

[Kohonen, 1989]

T. Kohonen, *Self-Organization and Associative Memory*, New York USA: Springer Verlag, 1989.

[Kojovic y Hassler, 1997]

Lj. Kojovic, S. Hassler, “Application of Current Limiting Fuses in Distribution Systems for Improved Power Quality and Protection” *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 12, no. 2, pp. 791-800, April 1997.

[Koza, 1992]

J. Koza, *Genetic Programming. on the Programming of Computers by Means of Natural Selection*, The MIT Press, 1992.

[Lourakis, 2005]

M. Lourakis, “A Brief Description of the Levenberg-Marquardt Algorithm Implemented by Levmar”, *Institute of Computer Science, Foundation for Research and Technology*, Heraklion, Greece, February 2005

[Lozano, 2007]

J. Lozano, “DVR Basado en Convertidores Directos CA/CA para Mejorar la Calidad de la Energía en Redes Eléctricas”, Tesis Doctoral, *Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional CINVESTAV*, Guadalajara, México, 2007.

[Lucio *et al.*, 2011]

J. Lucio, E. Espinosa-Juárez, A. Hernández, “Voltage Sag State Estimation in Power Systems by Applying Genetic Algorithms”, *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 5, no. 2, pp. 223-230, February 2011.

[Manson y Targosz, 2008]

J. Manson, R. Targosz, Leonardo Energy, “European Power Quality Survey Report”, 2008. Available at: <http://www.leonardo-energy.org/european-power-quality-survey-report>.

[Masdi *et al.*, 2004]

H. Masdi, N. Mariun, S. Mahmud, A. Mohamed, S. Yusuf, “Design of a Prototype D-STATCOM for Voltage Sag Mitigation”, *Nat. Power Energy Conf.*, Kuala Lumpur Malaysia, November 2004.

[MathWorks, 2008a]

MathWorks, *Genetic Algorithm Toolbox: User's Guide*, 2008.

[MathWorks, 2008b]

MathWorks, *Neural Network Toolbox: User's Guide*, 2008.

[Middlekauff y Collings, 1998]

S. Middlekauff, E. Collins, “System and Customer Impact: Considerations for Series Custom Power Devices”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 13, no. 1, pp. 278-282, January 1998.

[Milanovic y Zhang, 2010a]

J. Milanovic, Y. Zhang, “Global Minimization of Financial Losses Due to Voltage Sags With FACTS Based Devices”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 25, no. 1, pp. 298-306, January 2010.

[Milanovic y Zhang, 2010b]

J Milanovic, Y. Zhang, "Modeling of FACTS Devices for Voltage Sags Mitigation Studies in Large Power Systems", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 3044-3052, October 2010.

[Mishra *et al.*, 2003]

M. Mishra, A. Ghosh, A. Joshi, "Operation of a DSTATCOM in Voltage Control Mode", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 18, no. 1, pp. 258-264, January 2003.

[Moon *et al.*, 2007]

J. Moon, S. Yun, J. Kim, "Quantitative Evaluation of the Impact of Repetitive Voltage Sags on Low-Voltage Loads", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 22, no. 4, pp. 2395-2400, October 2007.

[Nielsen y Blaabjerg, 2005]

J. Nielsen, F. Blaabjerg, "A Detailed Comparison of System Topologies for Dynamic Voltage Restorers", *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 41, no. 5, pp. 1271-1280, September/October 2005.

[Olguin *et al.*, 2006]

G. Olguin, F. Vuinovich, M. Bollen, "An Optimal Monitoring Program for Obtaining Voltage Sag System Indexes", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 21, no. 1, pp. 378-384, February 2006.

[Omar *et al.*, 2009]

R. Omar, N. Rahim, M. Sulaiman, "Modeling and Simulation for Voltage Sags/Swells Mitigation Using DVR", *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, pp. 464-470, 2009.

[Pedra *et al.*, 2005]

J. Pedra, L. Sáinz, F. Córcoles, L. Guasch, “Symmetrical and Unsymmetrical Voltage Sag Effects on Three-Phase Transformers”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 2, pp. 1683-1691, April 2005.

[Qader *et al.*, 1999]

M. Qader, M. Bollen, R. Allan, “Stochastic Prediction of Voltage Sags in a Large Transmission System”, *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 35, no. 1, pp. 152-162, January/February 1999.

[Ramírez y Bernal, 1998]

I. Ramírez y J. Bernal, “Genetic Algorithms Applied to the Design of Large Power Distribution Systems”, *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 696-703, May 1998.

[Sabin *et al.*, 1999]

D. Sabin, L. Brooks, A. Sundaram, “Indices for Assessing Harmonic Distortion from Power Quality Measurements: Definitions and Benchmark Data”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 14, no. 2, pp. 489-496, April 1999.

[Schauder *et al.*, 1995]

C. Schauder, M. Gerhardt, E. Stacey, T. Cease, A. Edris, T. Lemak, L. Guygyi, “Development of a 100 MVAR Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 10, no. 3, pp. 1486-1496, July 1995.

[Sherif *et al.*, 2005]

O. Sherif, R. Billinton, S. Aboreshaid, “Stochastic Evaluation of Voltage Sag and Unbalance in Transmission Systems”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 20, no. 4, pp. 2831-2637, October 2005.

[Singh y Simina, 2004]

B. Singh, M. Simina, "Intelligent Solid-State Voltage Restorer for Voltage Swell/Sag and Harmonics", *IEE Proceedings Electric Power Applications*, vol. 151, no. 1, January 2004.

[Soto y Green, 2002]

D. Soto, T. Green, "A Comparison of High-Power Converter Topologies for the Implementation of FACTS Controllers", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 5, pp. 1072-1080, October 2002.

[UWEE, 1993]

University of Washington, Electrical Engineering, "118 Bus Power Flow Test Case", 1993. Available at: http://www.ee.washington.edu/research/pstca/pf118/pg_tca118bus.htm

[Wang y Giri, 2004]

B. Wang, V. Giri, "Evaluation of Shunt and Series Power Conditioning Strategies for Feeding Sensitive Loads", *19th Annu. IEEE Applied Power Electronics Conf. Expo.*, Anaheim USA, February 2004.

[Zhang y Milanovic, 2007]

Y. Zhang, J. Milanovic, "Voltage Sag Cost Reduction with Optimally Placed FACTS Devices", *9th International Conference Electrical Power Quality and Utilization*, Barcelona Spain, October 2007.

[Zhang y Milanovic, 2010]

Y. Zhang, J. Milanovic, "Global Voltage Sag Mitigation with FACTS-Based Devices", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2842-2850, October 2010.

[Zoumas *et al.*, 2004]

C. Zoumas, A. Bakirtzis, J. Theocharis, V. Petridis, "A Genetic Algorithm Solution Approach to the Hydrothermal Coordination Problem", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. 19, no. 3, pp. 1356-1364, May 2004.

Apéndice A

Datos de la red IEEE RTS-24

Para los casos de estudio de emplazamiento de dispositivos STATCOM, presentados en el Apartado 4.5.2.1, se han tomado como valores de referencia las depresiones de voltaje por año obtenidas de la siguiente manera:

- Se aplicó el método de posición de fallas en la configuración actual de la red eléctrica (sin tomar en cuenta dispositivos instalados) considerando cinco posiciones de falla para las líneas de transmisión.
- Los valores obtenidos fueron modificados sumando cantidades aleatorias entre el $\pm 30\%$ y el $\pm 50\%$ de su valor actual.
- Estos nuevos valores se consideraron como los valores de referencia del número de depresiones de voltaje por año para cada uno de los nodos de la red y se presentan en la Tabla A.1 para los siguientes rangos de voltaje residual en p.u.: $0 \leq V_R \leq 0.7$, $0 \leq V_R \leq 0.8$ y $0 \leq V_R \leq 0.9$.

Tabla A.1. Valores de referencia de depresiones de voltaje por año para la red IEEE RTS-24

Nodo	Rango de voltaje residual [p.u.]		
	0 a 0.7	0 a 0.8	0 a 0.9
1	17	32	48
2	7	11	22
3	24	37	47
4	9	15	23
5	20	37	46
6	20	41	50
7	8	12	42
8	7	12	16
9	10	16	24
10	22	42	51
11	7	11	24
12	16	29	47
13	4	6	23
14	18	23	47
15	7	6	12
16	15	21	31
17	13	17	29
18	12	17	24
19	6	9	11
20	6	7	16
21	4	8	11
22	10	16	21
23	11	16	31
24	14	30	50

Apéndice B

Datos de la red IEEE TC-118

Para los casos de estudio de emplazamiento de dispositivos STATCOM, presentados en el Apartado 4.5.2.2, se han tomado como valores de referencia las depresiones de voltaje por año obtenidas de la siguiente manera:

- Se aplicó el método de posición de fallas en la configuración actual de la red eléctrica (sin tomar en cuenta dispositivos instalados) considerando cinco posiciones de falla y una probabilidad de un evento por año para las líneas de transmisión.
- Los valores obtenidos fueron modificados sumando cantidades aleatorias entre el $\pm 30\%$ y el $\pm 50\%$ de su valor actual.
- Estos nuevos valores se consideraron como los valores de referencia del número de depresiones de voltaje por año para cada uno de los nodos de la red y se presentan en las Tablas: B.1, B.2 y B.3 para los siguientes rangos de voltaje residual en p.u.: $0 \leq V_R \leq 0.7$, $0 \leq V_R \leq 0.8$ y $0 \leq V_R \leq 0.9$, respectivamente.

Tabla B.1. Valores de referencia de depresiones de voltaje por año para la red IEEE TC-118 considerando el rango de voltaje residual en p.u. $0 \leq V_R \leq 0.7$

Nodo	Referencia	Nodo	Referencia	Nodo	Referencia	Nodo	Referencia
1	35	31	23	61	8	91	8
2	16	32	9	62	19	92	14
3	40	33	17	63	10	93	11
4	14	34	32	64	19	94	30
5	35	35	15	65	14	95	35
6	34	36	30	66	22	96	32
7	41	37	15	67	9	97	32
8	13	38	21	68	4	98	14
9	10	39	7	69	9	99	9
10	18	40	18	70	25	100	11
11	17	41	18	71	17	101	26
12	42	42	12	72	7	102	33
13	17	43	10	73	12	103	20
14	43	44	13	74	13	104	8
15	21	45	9	75	32	105	12
16	42	46	16	76	13	106	24
17	27	47	23	77	29	107	8
18	33	48	25	78	24	108	24
19	19	49	24	79	26	109	11
20	14	50	11	80	12	110	17
21	9	51	36	81	7	111	4
22	25	52	14	82	28	112	12
23	17	53	39	83	14	113	21
24	7	54	41	84	34	114	23
25	13	55	39	85	13	115	9
26	4	56	18	86	20	116	5
27	22	57	14	87	2	117	17
28	11	58	42	88	35	118	28
29	23	59	10	89	26		
30	25	60	21	90	16		

Tabla B.2. Valores de referencia de depresiones de voltaje por año para la red IEEE TC-118 considerando el rango de voltaje residual en p.u. $0 \leq V_R \leq 0.8$

Nodo	Referencia	Nodo	Referencia	Nodo	Referencia	Nodo	Referencia
1	46	31	37	61	18	91	14
2	16	32	17	62	32	92	17
3	42	33	25	63	14	93	30
4	16	34	49	64	36	94	68
5	41	35	22	65	36	95	55
6	46	36	56	66	34	96	54
7	43	37	22	67	12	97	44
8	19	38	50	68	16	98	19
9	14	39	20	69	18	99	44
10	36	40	35	70	33	100	23
11	17	41	30	71	32	101	62
12	43	42	32	72	14	102	48
13	19	43	26	73	25	103	42
14	50	44	20	74	13	104	19
15	28	45	16	75	36	105	15
16	47	46	33	76	16	106	33
17	64	47	47	77	44	107	10
18	70	48	45	78	47	108	30
19	29	49	54	79	42	109	12
20	25	50	28	80	19	110	25
21	33	51	54	81	10	111	9
22	56	52	26	82	51	112	20
23	35	53	50	83	19	113	55
24	22	54	53	84	51	114	33
25	28	55	49	85	19	115	16
26	12	56	18	86	37	116	13
27	34	57	26	87	6	117	17
28	14	58	55	88	46	118	41
29	36	59	22	89	45		
30	48	60	36	90	36		

Tabla B.3. Valores de referencia de depresiones de voltaje por año para la red IEEE TC-118 considerando el rango de voltaje residual en p.u. $0 \leq V_R \leq 0.9$

Nodo	Referencia	Nodo	Referencia	Nodo	Referencia	Nodo	Referencia
1	86	31	72	61	31	91	23
2	40	32	33	62	77	92	39
3	80	33	38	63	39	93	36
4	37	34	121	64	86	94	84
5	78	35	43	65	91	95	92
6	86	36	112	66	92	96	101
7	81	37	43	67	41	97	99
8	29	38	106	68	38	98	37
9	36	39	43	69	33	99	77
10	70	40	78	70	74	100	30
11	41	41	83	71	65	101	78
12	81	42	88	72	41	102	82
13	44	43	56	73	52	103	72
14	87	44	39	74	41	104	33
15	33	45	51	75	87	105	36
16	87	46	95	76	46	106	74
17	97	47	94	77	96	107	20
18	85	48	96	78	103	108	62
19	34	49	89	79	95	109	24
20	46	50	40	80	34	110	46
21	39	51	93	81	43	111	14
22	87	52	36	82	95	112	32
23	82	53	84	83	44	113	88
24	72	54	70	84	81	114	81
25	76	55	82	85	39	115	32
26	29	56	38	86	64	116	32
27	67	57	35	87	15	117	40
28	27	58	75	88	75	118	96
29	71	59	32	89	80		
30	92	60	79	90	59		

