



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECANICA Y ELECTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

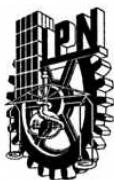
**ALGORITMOS DE DETECCIÓN DE ORIGEN
DE ARMÓNICOS EN UN SISTEMA ELÉCTRICO**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELECTRICA
OPCIÓN POTENCIA

P R E S E N T A :
SARAÍN MONTERO CORZO



MEXICO, D. F. DICIEMBRE 2005



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 13:00 horas del día 20 del mes de Diciembre del 2005 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E. S. I. M. E. ZAC. para examinar la tesis de grado titulada:

"ALGORITMOS DE DETECCIÓN DE ORIGEN DE ARMÓNICOS EN UN SISTEMA ELÉCTRICO"

Presentada por el alumno:

MONTERO

Apellido paterno

CORZO

Apellido materno

SARAÍN

nombre(s)

Con registro:

A	0	3	0	6	2	4
---	---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

DR. RICARDO O. MOTA PALOMINO

Presidente

DR. DANIEL OLGUÍN SALINAS

Segundo Vocal

DR. DAVID SEBASTIÁN BALTAZAR

Tercer Vocal

M. EN C. GILBERTO ENRÍQUEZ HARPER

Secretario

DR. JAIME ROBLES GARCÍA

Suplente

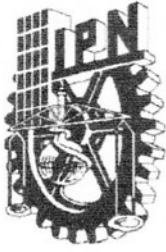
M. EN C. TOMÁS IGNACIO ASIAÍN OLIVARES



SECCION DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACION

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCÍA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
COORDINACIÓN GENERAL DE POSGRADO EN INVESTIGACIÓN

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 19 del mes de **diciembre** del año **2005**, el que suscribe, **Ing. Saráin Montero Corzo** alumno del Programa de **Maestría en Ciencias en Ingeniería Eléctrica** con número de registro **A030624**, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. Ricardo Octavio Mota Palomino** y cede los derechos del trabajo titulado: **Algoritmos de detección de origen de armónicos en un sistema eléctrico**, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones: **smcorzo@hotmail.com**; **rmotap@ipn.mx**

Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Saráin Montero Corzo

Nombre y firma

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis se proponen dos métodos para la detección del origen de cargas armónicas en un sistema eléctrico de potencia.

Para la realización de los métodos de detección, se requirió desarrollar una herramienta de cómputo de simulación de armónicas utilizando el programa computacional Matlab® v.6.5. El programa de análisis de armónicas es empleado con el objetivo de obtener datos de voltajes y corrientes armónicas, para ser utilizados en el diseño y pruebas de los métodos de determinación. En el capítulo 2 del presente trabajo están contenidas las bases y resultados del funcionamiento de ésta herramienta.

El programa de simulación de armónicas se basa en el método de inyección de corrientes acoplado con análisis de flujos de potencia a frecuencia fundamental, ya que por el modelo utilizado para validar el funcionamiento del programa, la técnica de análisis elegida proporciona resultados satisfactorios en la respuesta de los espectros armónicos de voltaje. La carga no lineal incorporada al estudio es la de un compensador estático de VARs. Además se anexa una rutina de estudio de Barrido de Frecuencias al programa de análisis armónico, con el fin de comprobar los resultados y tener un análisis de las posibles condiciones de resonancia que puede presentarse en el sistema. En el apéndice A se incluye el código fuente, y el funcionamiento de la herramienta de estudio de armónicas.

El primer método de detección emplea redes neuronales artificiales, del tipo multicapa progresiva con retropropagación para la determinación de una carga no lineal. En este método, la identificación del nodo se realiza mediante la introducción de las magnitudes del espectro armónico de voltaje de cualquier nodo de la red eléctrica, al programa que soporta las redes neuronales entrenadas, y así, a la salida se visualiza un índice en el rango de 0-1 para cada nodo de la red.

El segundo método de detección se basa en el método de variación monoparamétrica, para una o dos cargas conectadas al sistema eléctrico. El método original es modificado para adaptarlo a los requerimientos que consisten en utilizar corrientes nodales en lugar de corrientes de carga.

En el capítulo 3 se explican los fundamentos de los dos algoritmos de detección, y posteriormente, en el capítulo 4 se incorporan los resultados de las pruebas realizadas a los mismos.

ABSTRACT

In this thesis, two methods for harmonic load nodes location in a power electric system are developed.

For the development of these methods, a harmonic simulation program is shown using Matlab® v.6.5 software. The harmonic analysis program was developed for obtaining harmonic voltages and currents in order to be used in the desing and tests of the determination methods.

The harmonic simulation program is based in the current injection method coupled with a power flow analysis at fundamental frequency because of the model used to validate the performance of the program, the analysis technique chosed supplies good results in the response of the voltage harmonic spectrum. The non-linear load type incorporated to the study is a static VAR compensator. Also in this program, a frequency scan rutin is added in order to prove the results and to have an analysis of the possible conditions of resonance that can exist in the system.

The first harmonic determination method is developed using artificial neural networks of progressive multilayer type with retropropagation for determining of a non-linear load. In this method, the identification of the node is achieved by introducing a voltage harmonic spectrum obtained from any node of the electrical net to the program that supports the trained neural networks, and thus an indicator scaled from 0 to 1 for every node from the neural network is shown at the output.

The second one is developed using the monoparametric variation method for one or two loads connected to the electrical system. The original method is modified for its adaptation to the requirements that consist in the utilization of nodal currents instead of load currents.

CONTENIDO

RESUMEN	<i>i</i>
ABSTRACT	<i>ii</i>
CONTENIDO	<i>iii</i>
ÍNDICE DE FIGURAS	<i>vii</i>
ÍNDICE DE TABLAS	<i>xiv</i>
CAPÍTULO 1 <i>Introducción</i>	<i>1</i>
1.1 Introducción.....	1
1.2 Objetivo.....	1
1.3 Justificación.....	1
1.4 Alcance.....	2
1.5 Antecedentes históricos.....	2
1.6 Aportaciones de la tesis.....	4
1.7 Estructura de la tesis.....	4
CAPÍTULO 2 <i>Análisis de armónicas en sistemas eléctricos de potencia</i>	<i>6</i>
2.1 Introducción.....	6
2.2 Descripción del problema.....	6
2.3 Sistema eléctrico de potencia de prueba.....	7
2.4 Selección de la técnica de análisis.....	7
2.5 Desarrollo del algoritmo de estudio armónico.....	8
2.5.1 Modelado de elementos del sistema en el dominio de la frecuencia.....	8
2.6 Validación del programa de análisis de armónicos.....	11
CAPÍTULO 3 <i>Algoritmos de detección de nodos con cargas no lineales</i>	<i>14</i>
3.1 Introducción.....	14
3.2 Descripción del problema.....	14
3.3 Algoritmo de determinación de nodos con carga no lineal utilizando una red neuronal progresiva multicapa.....	15
2.6.1 Principios del algoritmo de determinación.....	17
2.6.2 Desarrollo del algoritmo de determinación.....	18
2.6.3 Estructura de la red neuronal artificial.....	19
2.6.4 Estructura del algoritmo de determinación.....	19
3.4 Algoritmo de determinación de cargas no lineales utilizando el método de variación monoparamétrica.....	20
2.6.5 Método de Variación Monoparamétrica.....	20
2.6.6 Modificaciones del Método de Variación Monoparamétrica.....	24
3.4.1.1 Carga armónica individual en el sistema eléctrico:.....	25

3.4.1.2	Multi-Cargas armónicas conectadas en el sistema eléctrico:	29
2.6.7	Características relevantes del análisis	34
2.6.8	Desarrollo del algoritmo de determinación	36
CAPÍTULO 4 Pruebas y Resultados.....		38
4.1	Pruebas de detección de nodos con carga armónica utilizando el método de Reconocimiento de patrones basado en redes neuronales	38
4.1.1	Análisis de resultados	39
4.2	Pruebas de detección de nodos utilizando el método de variación monoparamétrica.....	54
4.2.1	Información involucrada en la generación de las pruebas	54
4.2.2	Pruebas aplicadas al algoritmo de detección de nodos con presencia de cargas armónicas	55
4.2.3	Resultado de las pruebas de detección de nodos con carga armónica mediante el método de variación monoparamétrica	56
4.2.3.1	Resultados de la prueba 1 (nodo 3 con carga armónica)	57
4.2.3.2	Resultados de la prueba 2 (nodo 4 con carga armónica)	59
4.2.3.3	Resultados de la prueba 3 (nodo 5 con carga armónica)	61
4.2.3.4	Resultados de la prueba 4 (nodo 3 y 4 con carga armónica, con variación en nodo 4).....	63
4.2.3.5	Resultados de la prueba 5 (nodo 4 y 5 con carga armónica, con variación en nodo 5).....	65
4.2.3.6	Resultados de la prueba 6 (nodo 3 y 5 con carga armónica, con variación en nodo 5).....	67
4.2.3.7	Resultados de la prueba 7 (nodo 4 y 3 con carga armónica, con variación en nodo 3).....	69
4.2.3.8	Resultados de la prueba 8 (nodo 5 y 4 con carga armónica, con variación en nodo 4).....	71
4.2.3.9	Resultados de la prueba 9 (nodo 5 y 3 con carga armónica, con variación en nodo 3).....	73
4.3	Conclusiones	75
CAPÍTULO 5 Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.....		76
5.1	Conclusiones	76
5.2	Aportaciones de la Tesis	77
5.3	Recomendaciones para trabajos futuros	77
REFERENCIAS.....		79
APÉNDICE A. Programas para el estudio de armónicas.....		82
A.1.	Introducción	82
A.2	Código del programa <i>armonicos.m</i>	83
A.3	Código del programa <i>indices_bus.m</i>	87
A.4	Código del programa <i>indices_rama.m</i>	87
A.5.	Código del programa <i>indices_gen.m</i>	87

A.6.	Código del programa <i>armo1f.m</i>	88
A.7.	Código del programa <i>armo2f.m</i>	89
A.8.	Código del programa <i>tipos_bus.m</i>	91
A.9.	Código del programa <i>const_Ybus</i>	91
A.10.	Código del programa <i>const_sbus.m</i>	93
A.11.	Código del programa <i>newton_fp.m</i>	94
A.12.	Código del programa <i>fpsoln.m</i>	95
A.13.	Código del programa <i>ds_bus_dv.m</i>	96
A.14.	Código del programa <i>bf.m</i>	97
A.15.	Código del programa <i>const_Ybusarmo.m</i>	99

APÉNDICE B. Programa de detección de un nodo con presencia de carga no lineal por reconocimiento de patrones del espectro armónico de magnitudes de voltaje basado en redes neuronales artificiales..... 103

B.1	Código del programa <i>Impres_mediciones.m</i>	104
B.2	Código del programa <i>Red_principal.m</i>	105
B.3	Código del programa <i>V3_allbuses_redneuro.m</i>	106
B.4	Código del programa <i>V4_allbuses_redneuro.m</i>	108
B.5	Código del programa <i>V5_allbuses_redneuro.m</i>	110

APÉNDICE C. Programa de detección de nodos con presencia de cargas no lineales utilizando el método de variación monoparamétrica 113

C.1	Código del programa <i>gen_datos_clases3.m</i>	114
C.2	Código del programa <i>datos_metvarmono.m</i>	116
C.3	Código del programa <i>trat_se3.m</i>	117
C.4	Código del programa <i>datos_metvarmono2f.m</i>	119
C.5	Código del programa <i>discriminador2.m</i>	129

ANEXO Temas relacionados con el análisis de armónicas en los sistemas eléctricos 136

An.1	Análisis armónico	137
An.1.1	Series de Fourier	137
An.1.2	Funciones ortogonales.....	139
An.1.3	Simetría de la forma de onda.....	140
An.1.4	Transformada de Fourier	142
An.1.5	Transformada discreta de Fourier	143
An.2	Efectos de la distorsión armónica.....	143
An.2.1	Motores y generadores	143
An.2.2	Transformadores.....	146
An.2.3	Cables de potencia	148
An.2.4	Sobre carga en el conductor del neutro en edificios comerciales ..	148
An.2.5	Capacitores.....	148
An.2.6	Equipo electrónico	150

An.2.7	Interferencia telefónica.....	150
An.2.8	Convertidores estáticos de potencia	150
An.3	Estándares y límites armónicos.....	151
An.4	Métodos de análisis.....	159
An.4.1	Barrido de frecuencia.....	159
An.4.2	Método de inyección de corrientes	160
An.4.3	Flujos de potencia armónica	161
An.5	Generación de armónicas	162
An.5.1	Horno de arco eléctrico	162
An.5.2	Convertidores.....	163
An.5.3	Compensadores estáticos de VAR's.....	164
An.5.4	Ciclo convertidor	165

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Sistema eléctrico de potencia de estudio	7
Figura 2. 2. Impedancia equivalente vista desde el nodo 5.....	11
Figura 2. 3. Impedancia de punto de manejo (Driving point).....	12
Figura 3. 1 Diagrama de bloques del algoritmo de detección propuesto.....	16
Figura 3. 2 Red neuronal progresiva con una capa oculta	16
Figura 3. 3 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia J sin escalar.....	18
Figura 3. 4 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia J escalado	18
Figura 3. 5 Modelo equivalente para una carga lineal.....	21
Figura 3. 6 Gráfica comparativa de $U_5 - I_5$ elemento pasivo.....	21
Figura 3. 7 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ elemento pasivo	21
Figura 3. 8 Modelo equivalente para una carga no lineal	22
Figura 3. 9 Gráfica comparativa de $U_5 - I_5$ elemento activo variando I_G	22
Figura 3. 10 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ elemento activo variando I_G	22
Figura 3. 11 Gráfica comparativa de $U_5 - I_5$ elemento activo variando U_N	23
Figura 3. 12 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ elemento activo variando U_N	23
Figura 3. 13 Modelo equivalente para una carga no lineal compuesta	23
Figura 3. 14 Gráfica comparativa de $U_5 - I_5$ elemento activo variando I_G	23
Figura 3. 15 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ elemento activo variando I_G	23
Figura 3. 16 Gráfica comparativa de $U_5 - I_5$ elemento activo variando U_N	24
Figura 3. 17 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ elemento activo variando U_N	24
Figura 3. 18 Representación de un nodo de un sistema eléctrico.....	25
Figura 3. 19 Diagrama eléctrico con una carga armónica	26
Figura 3. 20 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 3 con carga no lineal conectada en nodo 4	26
Figura 3. 21 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 3 con carga no lineal conectada en nodo 4 normalizado.....	26
Figura 3. 22 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 3 con carga no lineal conectada en nodo 4	27
Figura 3. 23 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 3 con carga no lineal conectada en nodo 4 normalizado.....	27
Figura 3. 24 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 4 con carga no lineal conectada en nodo 4	27
Figura 3. 25 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 4 con carga no lineal conectada en nodo 4 normalizado.....	27
Figura 3. 26 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 4 con carga no lineal conectada en nodo 4	28

Figura 3. 27 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 4 con carga no lineal conectada en nodo 4 normalizado.....	28
Figura 3. 28 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 5 con carga no lineal conectada en nodo 4	28
Figura 3. 29 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 5 con carga no lineal conectada en nodo 4 normalizado.....	28
Figura 3. 30 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 5 con carga no lineal conectada en nodo 4	29
Figura 3. 31 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 5 con carga no lineal conectada en nodo 4 normalizado.....	29
Figura 3. 32 Diagrama eléctrico con dos cargas armónicas.....	30
Figura 3. 33 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 3 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4	30
Figura 3. 34 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 3 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4 normalizado.....	30
Figura 3. 35 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 3 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4	31
Figura 3. 36 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 3 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4 normalizado.....	31
Figura 3. 37 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 4 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4	31
Figura 3. 38 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 4 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4 normalizado.....	31
Figura 3. 39 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 4 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4	32
Figura 3. 40 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 4 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4 normalizado.....	32
Figura 3. 41 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 5 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4	32
Figura 3. 42 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 5 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4 normalizado.....	32
Figura 3. 43 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 5 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4	33
Figura 3. 44 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 5 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4 normalizado.....	33
Figura 4. 1 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia C.....	45
Figura 4. 2 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia D.....	45
Figura 4.3 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia E.....	45

Figura 4. 73 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3.....	58
Figura 4. 74 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3	58
Figura 4. 75 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4.....	58
Figura 4. 76 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4	58
Figura 4. 77 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5.....	58
Figura 4. 78 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5	58
Figura 4. 79 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3.....	60
Figura 4. 80 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3	60
Figura 4. 81 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4.....	60
Figura 4. 82 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4	60
Figura 4. 83 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5.....	60
Figura 4. 84 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5	60
Figura 4. 85 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3.....	62
Figura 4. 86 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3	62
Figura 4. 87 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4.....	62
Figura 4. 88 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4	62
Figura 4. 89 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5.....	62
Figura 4. 90 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5	62
Figura 4. 91 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3.....	64
Figura 4. 92 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3	64
Figura 4. 93 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4.....	64
Figura 4. 94 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4	64
Figura 4. 95 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5.....	64
Figura 4. 96 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5	64
Figura 4. 97 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3.....	66
Figura 4. 98 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3	66
Figura 4. 99 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4.....	66
Figura 4. 100 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4	66
Figura 4. 101 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5.....	66
Figura 4. 102 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5	66
Figura 4. 103 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3.....	68
Figura 4. 104 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3	68
Figura 4. 105 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4.....	68
Figura 4. 106 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4	68
Figura 4. 107 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5.....	68
Figura 4. 108 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5	68
Figura 4. 109 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3.....	70
Figura 4. 110 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3	70
Figura 4. 111 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4.....	70
Figura 4. 112 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4	70
Figura 4. 113 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5.....	70
Figura 4. 114 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5	70
Figura 4. 115 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3.....	72
Figura 4. 116 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3	72
Figura 4. 117 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4.....	72
Figura 4. 118 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4	72

Figura 4. 119 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5.....	72
Figura 4. 120 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5	72
Figura 4. 121 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3.....	74
Figura 4. 122 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3	74
Figura 4. 123 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4.....	74
Figura 4. 124 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4	74
Figura 4. 125 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5.....	74
Figura 4. 126 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5	74
Figura B.1 Secuencia principal de programas del método de detección por reconocimiento de patrones.....	103
Figura B.2 Secuencia de ejecución del programa red_principal.m.....	104
Figura C. 1 Secuencia principal de programas del método de variación monoparamétrica	113
Figura C. 2 Secuencia de ejecución de rutinas auxiliares del método de variación monoparamétrica	114
Figura C. 3 Diagrama de flujo del algoritmo de detección de nodos armónicos utilizando el método de variación monoparamétrica 1-7	122
Figura C. 4 Diagrama de flujo del algoritmo de detección de nodos armónicos utilizando el método de variación monoparamétrica 2-7	123
Figura C. 5 Diagrama de flujo del algoritmo de detección de nodos armónicos utilizando el método de variación monoparamétrica 3-7	124
Figura C. 6 Diagrama de flujo del algoritmo de detección de nodos armónicos utilizando el método de variación monoparamétrica 4-7	125
Figura C. 7 Diagrama de flujo del algoritmo de detección de nodos armónicos utilizando el método de variación monoparamétrica 5-7	127
Figura C. 8 Diagrama de flujo del algoritmo de detección de nodos armónicos utilizando el método de variación monoparamétrica 6-7	128
Figura C. 9 Diagrama de flujo del algoritmo de detección de nodos armónicos utilizando el método de variación monoparamétrica 7-7	129
Figura An. 1 Síntesis de una forma de onda por armónicos	137
Figura An. 2 Convertidor por conmutación de línea de seis pulsos.....	163
Figura An. 3 Reactor controlado a base de tiristores	164
Figura An. 4. Configuración de un TCR trifásico en paralelo con un banco de capacitores en derivación.....	165

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1. Resultados del estudio de flujos de potencia	11
Tabla 2. 2. Resultados comparativos de voltajes armónicos y THD%	13
Tabla 3. 1 Características relevantes del método de variación monoparamétrica modificado.....	35
Tabla 4. 1 Casos de prueba del método de detección	38
Tabla 4. 2 Salidas de las redes neuronales para potencias “r”, “q” y “p”	41
Tabla 4. 3 Salidas de las redes neuronales para potencias “l”, “j” y “h”.....	42
Tabla 4. 4 Salidas de las redes neuronales para potencias “e” y “d”.....	43
Tabla 4. 5 Salidas de las redes neuronales para la potencia “c”.....	44
Tabla 4. 6 Archivos generados para pruebas con una fuente armónica	55
Tabla 4. 7 Archivos generados para pruebas con dos fuentes armónicas	55
Tabla 4. 8 Pruebas en el algoritmo de método de variación monoparamétrica.....	56
Tabla An. 1 Categoría de disturbios eléctricos	136
Tabla An. 2 Simetría de formas de onda	140
Tabla An. 3 Simplificaciones en los cálculos de los coeficientes de Fourier	141
Tabla An. 4 Armónicos de un convertidor de seis pulsos	145
Tabla An. 5. Transformadores comercialmente disponibles con clasificación K	147
Tabla An. 6 Descripción general de los estándares propuestos por la VDE	153
Tabla An. 7 Descripción general de los estándares propuestos por la IEC.....	154
Tabla An. 8 Límites de distorsión de corriente para sistemas generales de distribución (120V a 69 000V).....	155
Tabla An. 9 Límites de distorsión de corriente para sistemas generales de subtransmisión (69 001V a 161 000V).....	156
Tabla An. 10 Límites de distorsión de voltaje.....	157
Tabla An. 11 Índices establecidos para la determinación de distorsión armónica por el estándar IEEE 519-1992.....	157
Tabla An. 12 Coeficientes TIF y mensaje-C.....	158
Tabla An. 13. Contenido armónico de la corriente de un horno de arco eléctrico en dos etapas del ciclo de fusión	163
Tabla An. 14 Corrientes armónicas teóricas y comunes para convertidores de seis pulsos.....	164
Tabla An. 15 Amplitudes máximas de las corrientes armónicas en TCR.....	165

Introducción

CAPÍTULO

1

1.1 Introducción

En el presente capítulo se incorpora el objetivo a alcanzar en el trabajo de tesis, el porqué es necesario realizarlo, el alcance de la tesis, los antecedentes del problema, aportaciones, así como la estructura de la misma.

1.2 Objetivo

El objetivo de este trabajo de tesis, es desarrollar algoritmos para la determinación del origen de cargas no lineales que originan armónicas en un sistema eléctrico de potencia

1.3 Justificación

La contaminación de sistemas eléctricos por el fenómeno de armónicas es un problema de creciente magnitud en los sistemas eléctricos. Éste fenómeno se genera y se propaga por el uso de cargas que no tienen una relación lineal Voltaje-Corriente. El uso de este tipo de cargas, incide directamente en la distorsión de la forma de onda de voltaje y corriente que se suministra a los consumidores de energía interconectados a la red eléctrica. Los problemas creados por éste fenómeno pueden abarcar desde el mal funcionamiento de componentes electrónicos hasta llegar al daño permanente de los mismos, interferencia telefónica; esto desde la perspectiva de los consumidores. Para la misma empresa de suministro eléctrico, el problema presenta también efectos indeseables, ya que los componentes instalados para la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, presentan problemas de operación o se pueden presentar fenómenos de resonancia del sistema.

Debido a los efectos indeseables que inciden sobre los componentes interconectados a la red eléctrica, es necesario determinar la ubicación de la carga o cargas no lineales causantes de contaminar el sistema, esto con el fin de tomar medidas correctivas para eliminar o mitigar los efectos dañinos.

1.4 Alcance

Lograr determinar la fuente de generación de armónicas en sistemas eléctricos, cuyos métodos puedan ser de utilidad para las empresas suministradoras de energía eléctrica, para tener altos estándares de calidad de voltaje.

1.5 Antecedentes históricos

El problema de la contaminación armónica no es un fenómeno reciente. Se reportó [26] que en 1893, Charles Proteus Steinmetz en Lynn, Massachussets, le fue asignada la tarea de solucionar un problema de calentamiento de un motor. Teniendo las bases para desarrollar un análisis de armónicas y aplicando éstos conocimientos, le fue posible identificar y resolver el problema. El problema fue una resonancia en el circuito de transmisión que alimentaba a la planta a consecuencia de un generador que generaba una forma de onda distorsionada.

Otro problema de armónicas que apareció en la literatura, fue con relación a la forma de onda de generadores [26]. El problema presentaba corrientes altas en el neutro, cuando los generadores se conectaban sólidamente a tierra y operaban en paralelo. Hoy en día, éste es un problema muy bien identificado, el cuál involucra el voltaje del 3er. Armónico de secuencia cero en máquinas conectadas en estrella. En 1895 General Electric y Westinghouse introdujeron nuevos diseños para los generadores, usando devanados de armadura distribuidos para substancialmente mejorar la forma de onda y haciéndola más senoidal. En 1910 apareció un nuevo problema de armónicas relacionado con el Factor de Interferencia Telefónica (TIF). Con el desarrollo de la electrificación rural y servicio telefónico, los circuitos telefónicos y potencia fueron comúnmente soportados por derechos de vía común [27]. Las corrientes armónicas producidas por las corrientes de magnetización del transformador, inducían interferencia en los circuitos telefónicos. En 1916 Steinmetz publicó un libro, en el cual pone considerable atención al estudio de armónicas en sistemas de potencia trifásicos. El principal enfoque en este libro fueron las armónicas de orden tres, causados por la saturación del acero en los transformadores y máquinas, y fue el primero en proponer el tipo de conexión delta para bloquear los terceros armónicos [27].

Antes de la aparición de los semiconductores de potencia, las fuentes principales de distorsión en la forma de onda fueron los hornos de arco eléctrico, el efecto acumulado de las lámparas fluorescentes, y con menor presencia las máquinas eléctricas y transformadores [3]. Con el creciente uso de dispositivos, cuyo funcionamiento se basa en la aplicación de semiconductores de potencia, el problema de contaminación armónica es un problema de creciente importancia [24].



La red neuronal artificial (ANN), comúnmente llamada red neuronal, es la forma más genérica de inteligencia artificial, para la emulación del proceso de pensamiento humano [28]. En 1943, McCulloch and Pitts propusieron una red compuesta de neuronas de tipo binario que fue capaz de realizar cálculos lógicos de umbral. En 1949, Hebb propuso un mecanismo de aprendizaje para la neurona biológica [6]. En 1950 la figura dominante en el campo de la investigación de redes neuronales fue Rosenblatt en el laboratorio de aeronáutica en Cornell, quien desarrolló el Perceptrón simple, donde éste representa un modelo sensorial biológico, tal como un ojo, donde importancia del perceptrón radica en su carácter de dispositivo entrenable. En 1960 Widrow y Hoff crearon las redes Adaline y Madaline, y entrenaron estas redes con la regla delta. La aparición del libro perceptrons, escrito por Minsky y Papert en 1969 suele tomarse como causa del fallecimiento de ésta tecnología [29]. Lo cuál resultó decisivo para que muchos de los recursos que se estaban invirtiendo en redes neuronales se desviasen hacia otros campos de estudio.

La era moderna de las redes neuronales con investigación rejuvenecida inició en 1982, cuando Hopfield, presentó su invención en la academia nacional de ciencia. En 1986 apareció otro libro que tuvo un efecto positivo significativo en este campo [29], Parallel Distributed Processing (PDP) vols. I y II, escrito por Rumelhart y James McClelland. El mérito del éxito de la red neuronal multicapa con retropropagación, se debe al trabajo del grupo PDP, que lo presentaron a la comunidad internacional como una técnica útil de resolución de problemas complejos [6]. Un excelente artículo de carácter general es el Richard Lippmann, éste ofrece una visión general de varios algoritmos. En 1993 se presenta un artículo [30], donde el objetivo principal es el de resumir resultados teóricos con relación a las capacidades y limitaciones de éstos modelos, y discutir algunas de sus extensiones.

El problema de la identificación de fuentes armónicas, es un tema de creciente interés, ya que al existir problemas de contaminación armónica, es necesario identificar el origen de este disturbio, para posteriormente aplicar medidas correctivas para mitigar los efectos. Pocos trabajos se han realizado al respecto para ofrecer soluciones a ésta problemática. Khandaker M.S. Islam y Abdul H. Samra [31], presentan un trabajo en el que detectan una carga armónica en un sistema radial de distribución, mediante el signo de la parte real de la potencia aparente. En 1989 G. T. Heydt publica un procedimiento para la identificación de fuentes armónicas utilizando un estimador de estados [32]. En este trabajo, utilizando datos de línea y nodos en varios puntos de la red, son usados con un estimador de mínimos cuadrados para calcular el espectro de inyección en los nodos sospechosos. Cuando la energía a frecuencias armónicas se encuentra inyectándose a la red en un bus, ese bus es identificado como la fuente armónica. Un artículo aplicando redes neuronales para la identificación de fuentes armónicas es propuesto por K. Hartana y G. Richards [33]. Proponen redes neuronales entrenadas para la obtención de corrientes nodales en cargas armónicas previamente identificadas. Al no existir más cargas que las

consideradas, la ecuación de error proporciona valores mínimos, para las corrientes estimadas por las redes neuronales contra corrientes obtenidas por medio de una matriz de restricciones. Cuando existe una carga armónica no considerada para el caso inicial, la ecuación de error genera un índice alto, ya que no es considerada este elemento en la matriz de restricciones. Por lo tanto se inicia un proceso de prueba hipotética para la identificar la fuente desconocida.

1.6 Aportaciones de la tesis

Las aportaciones que presenta este trabajo de tesis son las siguientes:

- Programa de análisis de armónicos, utilizando el método de inyección de corrientes, con cálculo de flujos de potencia acoplado.

- Programa de determinación de la ubicación de una carga no lineal, utilizando redes neuronales del tipo progresivo multicapa con retropropagación del error, utilizando las herramientas prediseñadas que existen el programa computacional Matlab[®] v.6.5.

- Programa de determinación de la ubicación de una o dos cargas no lineales, utilizando los principios del método de variación monoparamétrica, planteado por A.M. Dán, Zs. Czira, y adaptándolos a las necesidades requeridas con base a resultados obtenidos de simulaciones, y transformando los principios de análisis a programas que puedan realizar la determinación en forma automática.

- Presentación de los resultados obtenidos, aplicando los dos métodos para determinar la ubicación de cargas armónicas.

1.7 Estructura de la tesis

En el capítulo 1 se presenta el objetivo de la tesis, justificación, alcance, los antecedentes históricos de los temas involucrados en el desarrollo de la misma, así como finalmente la estructura de la tesis.

En el capítulo 2 se muestran los principios de selección de la técnica de análisis de armónicas, la selección del sistema eléctrico de estudio, la forma de modelado de los componentes de los sistemas eléctricos de potencia, y al final los resultados obtenidos en la simulación contra los resultados proporcionados en la bibliografía.



En el capítulo 3 se presenta el desarrollo de los métodos de determinación de nodos con cargas no lineales. El capítulo se divide en dos partes: En la primera parte se plantea el algoritmo de determinación utilizando redes neuronales, y en éste se incluyen los principios del método, la estructura de las redes neuronales empleadas, y la forma de operar del algoritmo. En la segunda parte se presenta el desarrollo del algoritmo de determinación utilizando el método de variación monoparamétrica. En ésta sección se introduce la explicación del método original, y de forma posterior se realiza un análisis, con el objetivo de modificar el método original de acuerdo a las necesidades requeridas. Se incluye también, un resumen de las características relevantes observadas en el análisis y de forma final se incorpora el algoritmo de determinación.

En el capítulo 4, se plasman los resultados obtenidos de la respuesta de los dos algoritmos de determinación a base de diversas pruebas.

En el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

Se incorporan al trabajo de tesis los apéndices A, B, y C, los cuales contienen los códigos fuentes de los programas, así como de forma adjunta una explicación de la función que emplean.

Finalmente se presenta el anexo 1, el cuál contiene información del fenómeno de las armónicas.

Análisis de armónicas en sistemas eléctricos de potencia

2.1 Introducción

El presente capítulo muestra los conceptos requeridos para desarrollar el programa de estudio de penetración de armónicas en sistemas eléctricos de potencia, utilizando el método de inyección de corrientes acoplado con cálculo de flujos de potencia convencional. Se incorporan de forma comparativa los resultados obtenidos con el programa contra los resultados del modelo de referencia, esto con el fin de validar el programa para su posterior aplicación en otros estudios.

2.2 Descripción del problema

El estudio de armónicas en sistemas eléctricos se ha convertido en una parte importante en el análisis y diseño de un sistema eléctrico de potencia [1,25] Los principales objetivos que se pretenden alcanzar son, el cálculo del grado de distorsión en las formas de onda de voltaje y corriente en varios puntos del sistema de potencia, y determinar si existen condiciones de resonancia peligrosas y como pueden ser mitigadas.

Dependiendo de las características de los sistemas eléctricos, se han desarrollado diversos métodos de estudio. Para sistemas industriales y de distribución, es generalmente suficiente modelar el sistema en detalle únicamente en el lado de baja del transformador de bajada del sistema de transmisión. El equivalente de corto circuito en el lado de alta del transformador de bajada es suficiente, ya que la impedancia es normalmente dominada por el transformador [1]. En el lado de baja del transformador, es necesario incluir todos los nodos, a los cuales existan conectadas cargas grandes y bancos de capacitores. En los sistemas de transmisión se requieren modelos más complejos que en los sistemas de distribución, en el sentido para la determinación en forma precisa de las características de la respuesta a la frecuencia.

Las técnicas empleadas en el presente, para el análisis de armónicas en los sistemas eléctricos de potencia son [20] (en el anexo 1 se describen de forma general):

- I. Barridos de frecuencia
- II. Método de inyección de corriente
- III. Flujos de potencia armónica
- IV. Flujos de potencia híbridos

2.3 Sistema eléctrico de potencia de prueba

El sistema eléctrico tomado como base para la realización de este estudio, es el planteado en [2], ya que contiene la información suficiente para llevar a cabo la simulación, así como resultados, éste último con fines de validación. En la Figura 2.1 se muestra éste sistema.

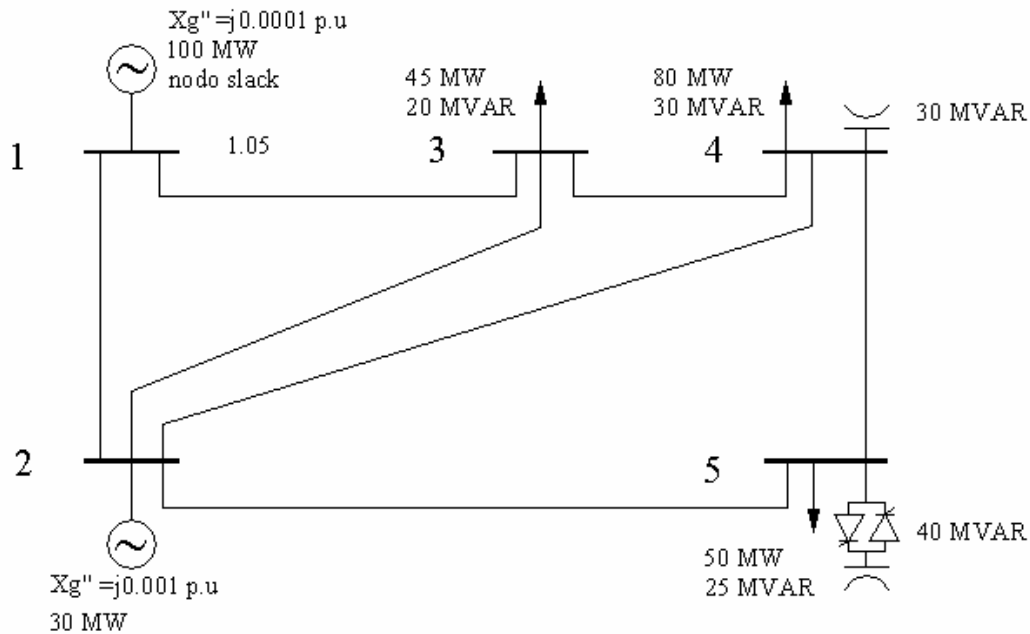


Figura 2.1. Sistema eléctrico de potencia de prueba

Donde la carga no lineal corresponde a un compensador estático de Var's (CEV) instalada en el nodo 5.

2.4 Selección de la técnica de análisis

Para la mayoría de los estudios de armónicas, la representación monofásica del sistema, utilizando la secuencia positiva del modelo del sistema es suficiente [1]. Las excepciones para éste criterio son:

- Interferencia telefónica.
- Bancos de capacitores monofásicos
- Fuentes armónicas desbalanceadas o monofásicas
- Fuentes de voltaje armónicos triples

Los criterios para la selección de la técnica de análisis armónico, para el sistema de estudio se basan en:

- 1) La carga no lineal se considera que está conectada en delta, por lo tanto, no existe corriente armónica de secuencia cero inyectada al sistema.
- 2) El sistema eléctrico de potencia se considera balanceado.
- 3) La distorsión armónica total de voltaje es inferior al 10% de la fundamental [1].

Con las características del sistema anteriormente mencionadas, se seleccionó el método de inyección de corrientes, con análisis de flujos de potencia convencional.

2.5 Desarrollo del algoritmo de estudio armónico

Para llevar a cabo el estudio armónico, se necesitó desarrollar una serie de programas, que, mediante la ejecución en conjunto pueda observarse la respuesta del sistema en el dominio de la frecuencia, y los voltajes armónicos generados por la carga no lineal. El funcionamiento del algoritmo se divide en dos partes. La primera consiste en un estudio de flujos de potencia convencional utilizando el método de Newton, el cual calcula los voltajes nodales y corrientes de línea para una condición de carga del sistema, con el propósito de calcular con éstos parámetros eléctricos las corrientes armónicas inyectadas al sistema. La segunda parte se enfoca completamente al cálculo armónico. En el cálculo armónico se desarrollan las siguientes operaciones:

1. Cálculo de las corrientes armónicas, utilizando los parámetros eléctricos de la fundamental, y el espectro armónico característico para la carga no lineal (incluido en el anexo 1).
2. realiza estudio de barrido de frecuencias
3. Crea matrices armónicas para cada frecuencia de interés
4. Calcula voltajes y corrientes armónicas para cada frecuencia de interés

2.5.1 Modelado de elementos del sistema en el dominio de la frecuencia

El modelado de los elementos en el sistema eléctrico de potencia por [1,2], se realizan de la siguiente manera:

Elementos pasivos

Todos los elementos pasivos se consideran con un comportamiento lineal a la frecuencia. Por ejemplo, resistores, inductores y capacitores. Las siguientes características son observadas por estos elementos:

$$R = \text{constante}$$

$$X_L(h) = jhX_L$$

$$X_c(h) = -j\frac{X_c}{h}$$

Donde X_L y X_c son los valores de las reactancias inductiva y capacitiva, respectivamente.

Líneas de transmisión y cables

Éstos elementos son representados por el circuito π equivalente a diferentes frecuencias donde, efectos de líneas largas, desbalance de líneas y transposiciones deberán ser tomadas en cuenta. El circuito π nominal, escalado hasta el orden del armónico, deberá únicamente ser usado en casos de líneas de transmisión cortas y armónicas de bajo orden.

Generadores

Estos elementos son considerados como elementos lineales, donde su impedancia armónica es calculada similarmente a los elementos pasivos, usando la siguiente ecuación:

$$Z_g = R\sqrt{h} + jX_d''h$$

Donde R es calculada desde las pérdidas de potencia del generador y X_d'' es la reactancia subtransitoria del generador. Si se requiere, la saturación del generador y efectos de la conversión de frecuencia, podrían ser representados por medio de fuentes de voltaje y corrientes armónicas.

Transformadores

Son considerados como elementos lineales donde su impedancia armónica es calculada de forma similar a la de los elementos pasivos, usando la siguiente ecuación de impedancia:

$$Z_t = R\sqrt{h} + jX_t h$$

Donde R es calculada de las pérdidas de potencia del transformador y X_t es la reactancia de corto circuito del mismo. La conexión del transformador deberá ser tomada en cuenta cuando armónicos de secuencia cero estén presentes en la red. El

efecto de saturación del transformador deberá ser representado de manera de fuente de inyección de corriente armónica.

Bancos de capacitores

Son considerados como elementos pasivos donde:

$$X_c(h) = -j \frac{V_{LL}^2}{hQ_{3\phi}}$$

V_{LL} Es el voltaje de línea RMS en KV y $Q_{3\phi}$ es la potencia reactiva trifásica en MVAR.

Cargas lineales

Pueden ser representadas por tres diferentes modelos dados por el grupo de trabajo CIGRE3 6-05:

(i) Equivalente $R - X_L$ Paralelo, donde $R = \frac{V_{LL}^2}{P_{3\phi}}$ y $X_L(h) = j \frac{hV_{LL}^2}{Q_{3\phi}}$

(ii) Paralelo $R - X_L$ con $R(h) = \frac{V_{LL}^2}{kP_{3\phi}}$ y $X_L(h) = j \frac{V_{LL}^2}{kQ_{3\phi}}$ donde $k = 0.1h + 0.9$

(iii) Paralelo $R - X_L$ en serie con X_s , donde $R = \frac{V_{LL}^2}{P_{3\phi}}$, $X_L(h) = j \frac{hR}{6.7 \left(\frac{Q_{3\phi}}{P_{3\phi}} - 0.74 \right)}$ y

$$X_s(h) = j0.073hR.$$

Cargas no lineales

Éstas son representadas ya sea por una fuente de inyección de corriente o voltaje armónico. Las fuentes de inyección de corriente armónica son usadas para representar las contribuciones armónicas de los compensadores estáticos de VAR'S, hornos de arco por inducción, rectificadores y aplicaciones electrónicas. Por ejemplo, un CEV es representado por una fuente de inyección de corriente armónica dada por $I_h = (\%_h)I_{1\phi}$, donde $(\%_h)$ es un porcentaje de la corriente a la frecuencia fundamental

dada por $I_{1\phi} = \frac{Q_{3\phi}}{\sqrt{3}V_{LL}} e^{j(\theta \pm \pi/2)}$, donde θ es el ángulo de voltaje obtenido de un estudio

de flujos de potencia convencional, y $\pi/2$ es el cambio de fase requerida, ya que la corriente se adelanta o atrasa al voltaje por 90° .

2.6 Validación del programa de análisis de armónicos

Los archivos utilizados para realizar el estudio armónico, en sí, representados por sus códigos fuentes se anexan en el apéndice 1, a la vez que se describen en forma general sus funciones. En ésta sección, se presentan los resultados obtenidos con éste programa contra los resultados que proporciona la bibliografía, esto con fines de validación. Con el objetivo de presentar las comparaciones de resultados, se muestran dos tablas (Tabla 2. 1 y Tabla 2. 2). En la Tabla 2. 1 se presentan los resultados del estudio de flujos de potencia, y en la Tabla 2. 2 los voltajes nodales armónicos y la distorsión armónica total de voltaje (THD). Los resultados obtenidos tienen un alto grado de exactitud, y con base a este criterio, se utiliza el modelo para posteriores análisis.

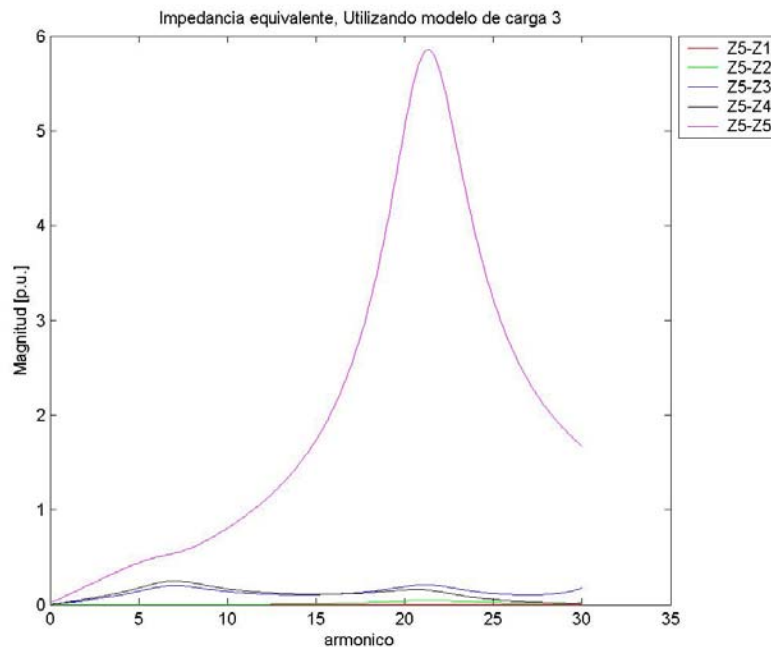


Figura 2. 2. Impedancia equivalente vista desde el nodo 5

Tabla 2. 1. Resultados del estudio de flujos de potencia

Nodo	$ V $		θ		P_g		Q_g		P_d		Q_d	
	calc.	prop.	calc.	prop.	calc.	prop.	calc.	prop.	calc.	prop.	calc.	prop.
1	1.05	1.0500	0	0.00000	1.526	1.5260	0.65836	0.65840	0	0		
2	1	1.0000	-2.6944	-2.6944	0.3	0.3000	-0.65124	-0.6512	0	0		
3	0.97956	0.9796	-6.2114	-6.2114	0	0	0	0	-0.45	0.45	-0.2i	0.20
4	0.97761	0.9776	-6.9232	-6.9232	0	0	0	0	-0.8	0.80	-0.3i	0.30
5	0.99224	0.9922	-6.6963	-6.6963	0	0	0	0	-0.5	0.5	-0.25i	0.25

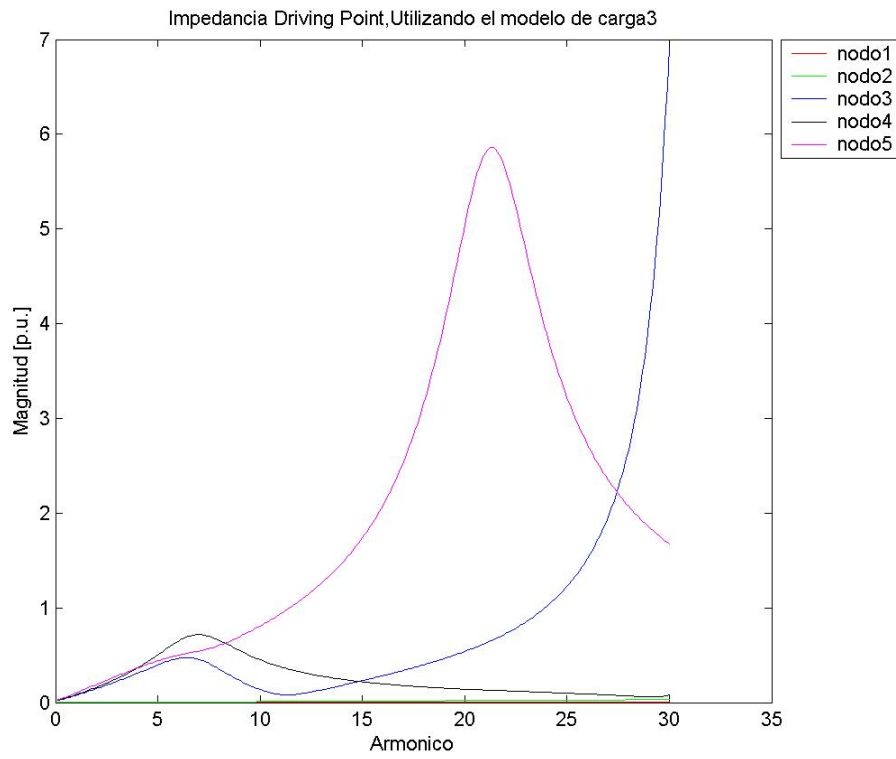


Figura 2. 3. Impedancia de punto de manejo (Driving point)



Tabla 2. 2. Resultados comparativos de voltajes armónicos y THD%

V _h	5%		7%		11%		13%		17%		19%		23%		25%		TDH%	
	cal.	prop.	cal.	prop.	cal.	prop.	cal.	prop.	cal.	prop.	cal.	prop.	cal.	prop.	cal.	prop.	cal.	prop.
$ V^1 $	7.5767e-005	0.00007	5.2308e-005	0.00005	1.0024e-005	0.00001	5.0831e-006	0.0000	1.8062e-006	0.0000	1.1802e-006	0.0000	4.485e-007	0.0000	3.886e-007	0.0000	8.8362e-005	0.00009
θ^1	108.12	108.12	58.546	58.543	-4.7274	-4.728	-16.526	-16.52	-40.393	-40.39	-66.916	-66.91	162.95	162.95	142.81	142.81		
$ V^2 $	0.0057046	0.0057	0.0029645	0.0030	0.001536	0.0015	0.0015857	0.0016	0.0020091	0.0020	0.0025734	0.0026	0.0021544	0.0022	0.0012268	0.0012	0.0079379	0.0080
θ^2	137.76	137.75	118.92	118.91	147.37	147.36	148.11	148.11	137.44	137.44	120.68	120.68	39.507	39.513	19.026	19.029		
$ V^3 $	0.16404	0.1675	0.12101	0.1235	0.02974	0.0304	0.018438	0.0188	0.012374	0.0126	0.013102	0.0134	0.0092417	0.0098	0.005471	0.0056	0.2122	0.2122
θ^3	99.921	00.919	50.813	50.809	-11.687	-11.68	-22.73	-22.73	-42.191	-42.19	-61.171	-61.16	-146.12	-146.1	-169.18	-169.1		
$ V^4 $	0.20602	0.2107	0.15059	0.1540	0.035147	0.0360	0.020786	0.0213	0.01201	0.0123	0.011374	0.0116	0.0056765	0.0060	0.0025302	0.0026	0.26497	0.2650
θ^4	103.59	103.58	55.328	55.324	-6.1917	-6.193	-16.898	-16.89	-35.559	-35.55	-53.9	-53.89	-136.23	-136.2	-156.23	-156.2		
$ V^5 $	0.5172	0.5213	0.32764	0.3302	0.22891	0.2307	0.21995	0.2217	0.2601	0.2621	0.3268	0.3293	0.26617	0.2795	0.15002	0.1512	0.86896	0.8725
θ^5	148.77	148.76	145.77	145.76	150.38	150.37	148.31	148.30	136.65	136.65	119.84	119.83	38.667	38.673	18.17	18.173		

Algoritmos de detección de nodos con cargas no lineales

3.1 Introducción

La presencia de armónicos en un sistema eléctrico, conlleva una serie de efectos indeseables a los elementos de dicho sistema (en el capítulo 2 se realiza una reseña de los efectos de los armónicos). El grado de tolerancia a los armónicos, es determinado por la susceptibilidad de la carga (o fuente de potencia) a ellos. El último tipo de dispositivo susceptible a éste tipo de fenómeno, es el cual la función principal es el de calentamiento, como un horno de arco, en este caso la energía armónica generalmente es utilizada y la distorsión es algo tolerable [1]. El tipo de equipo más susceptible a éste tipo de fenómeno, es el que en su diseño o constitución, asume una perfecta onda senoidal (cercana) en la fundamental en su alimentación. Los armónicos que genera una carga no lineal conectada en un sistema eléctrico se propagan a través de la red, diversos métodos se han propuesto para analizar la propagación de estas señales a través de una red eléctrica. En el trabajo propuesto se aborda el problema de manera inversa, esto es, determinar el origen de generación de armónicos.

El presente capítulo muestra dos métodos propuestos para determinar nodos con presencia de cargas no lineales en un sistema eléctrico de potencia. Este capítulo está formado elementalmente de dos partes. La primera aborda la problemática de un sistema eléctrico con presencia de una carga no lineal, causando de ésta manera una contaminación de armónicos en el sistema eléctrico. El método propuesto para solucionar éste problema está basado en la aplicación de Redes neuronales por medio del reconocimiento de patrones de magnitudes de voltajes nodales. La segunda parte está basada en el método de variación monoparamétrica [7]. Éste método se basa en la comparación del comportamiento que existe entre corriente armónica contra voltaje armónico, y corriente fundamental contra corriente armónica (generalmente un armónico de bajo orden y de alta magnitud), cuando existen variaciones de la(s) carga(s) responsable(s) de contaminar el sistema eléctrico con armónicos.

3.2 Descripción del problema

Las mediciones de voltajes y corrientes armónicas es una tarea esencial para la confiabilidad de distribución de la energía eléctrica, ya que por medio del monitoreo armónico es posible determinar índices representativos de la magnitud del problema. Existen diversos índices representativos de la calidad del voltaje, pero entre todos éstos, el que se utiliza comúnmente para determina el grado de distorsión de la onda de voltaje en un punto cualquiera de la red eléctrica es el voltaje

de distorsión armónica total (THD) [1]. Si el índice excede los límites recomendados, se realizan mediciones dentro de la instalación, incluyendo el punto de acoplamiento mutuo (PCC), y posteriormente realizar una investigación de los consumidores que utilizan convertidores operando más allá de los límites de distorsión de corriente. Si es posible identificar al usuario responsable de contaminar el sistema, se le plantea el mantener los límites de distorsión armónica dentro de los límites recomendados, pero sí no se hace la detección, es necesario establecer alguna forma en la cuál pueda predecirse en qué parte del sistema se encuentra conectada ésta carga no lineal, y dependiendo de la complejidad del sistema, realizar una tarea de rastreo hasta encontrar la fuente de distorsión.

Las mediciones armónicas pueden suelen ser presentadas de manera visual mediante osciloscopios, y analizadores de armónicos. El primero de ellos permite observar la variación de las ondas de corriente o voltaje en el dominio del tiempo, mientras que el segundo muestra el espectro de frecuencia de voltajes y corrientes [3]. Los armónicos son caracterizados por escenarios particulares de voltaje y corriente asociados a sus espectros de frecuencia [4], tomando como base ésta característica, el estudio de penetración de armónicos elaborado en el capítulo 2, genera los datos de salida (magnitudes de corriente y voltaje armónico) en el dominio de la frecuencia, y éstos valores se utilizarán en la elaboración de los métodos de detección propuestos.

3.3 Algoritmo de determinación de nodos con carga no lineal utilizando una red neuronal progresiva multicapa

Para desarrollar el método de detección utilizando RNA's, es necesario partir de un modelo matemático del sistema, y de ésta manera efectuar el estudio de flujos de potencia convencional a frecuencia fundamental, y validar los datos con mediciones de campo. Una vez que se tiene el modelo de la red, el siguiente paso es realizar el desarrollo de los modelos de los elementos involucrados en el modelo cuya respuesta esté en función a la frecuencia, así como las características más importantes del sistema que afectan la respuesta a la frecuencia. La medición de armónicos juega un rol importante en la aplicación de éste método, ya que dependiendo de la medición realizada en un nodo con presencia de armónicos, este presentará un espectro de frecuencia de magnitud de voltaje, y ésta información puede ser aprovechada, en la manera de que puede determinarse la característica de la fuente no lineal [1]. Es necesario también obtener los parámetros de carga de la red a la frecuencia fundamental cuando se realiza la medición armónica para efectuar la simulación de penetración de armónicos

Teniendo la información necesaria del modelo de la red (respuesta a la frecuencia) y el tipo de carga no lineal se comienza con las simulaciones de manera que se conecte la carga en cada nodo del sistema. En la Figura 3. 1 se muestra el diagrama a bloques del algoritmo propuesto. Es importante mencionar que en el presente capítulo se trabaja únicamente en los tres bloques finales, ya que los restantes se elaboraron en el capítulo 2.

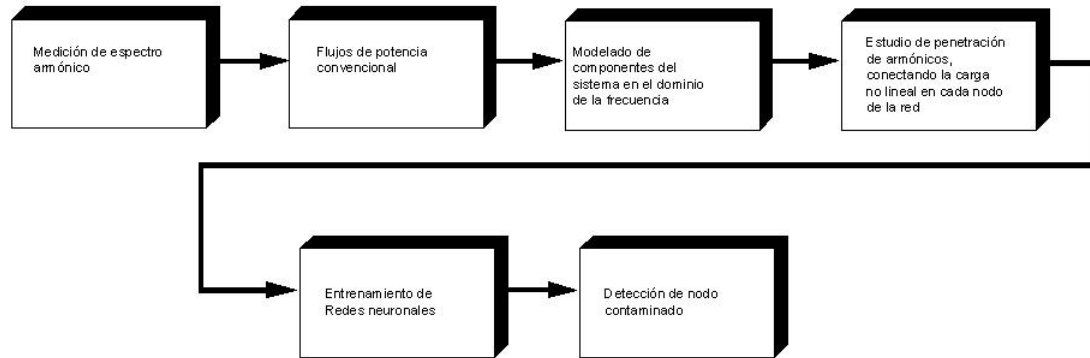


Figura 3. 1 Diagrama de bloques del algoritmo de detección propuesto

El tipo de comportamiento (patrón) del espectro de frecuencia de magnitud de voltaje en cada nodo de la red, resultante de la simulación es asociado al nodo al cual se insertó la carga no lineal. En este caso el problema recae en reconocer patrones y decidir qué nodo en particular es el responsable en provocar ese comportamiento. Debido a éste tipo de problema se plantea la utilización de redes neuronales de tipo progresivo multicapa, ya que son herramientas poderosas para reconocimiento de patrones, clasificación, estimación funcional y optimización [5,6]. En la Figura 3. 2 puede observarse una arquitectura de red neuronal progresiva multicapa.

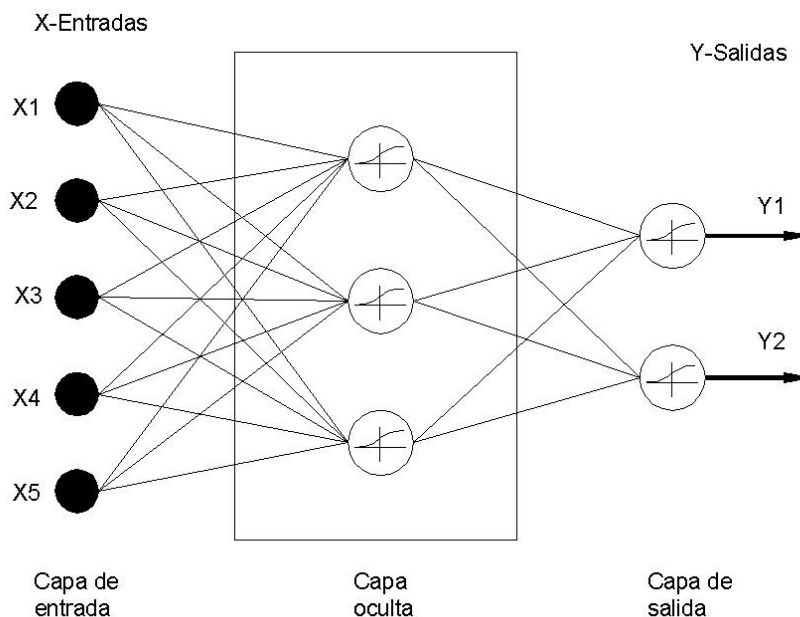


Figura 3. 2 Red neuronal progresiva con una capa oculta

El MLP (multilayer perceptron) es una red progresiva compuesta de una topología organizada de elementos de procesamiento interconectados llamados

neuronas. La estructura de éste tipo de red está compuesta de una capa de entrada, una capa de salida y una o más capas ocultas, las capas intermedias reciben éste nombre, ya que no tienen comunicación con el ambiente externo []. Como puede observarse, cada señal elemento de procesamiento, admite las señales de entrada, y éstas son multiplicadas por los pesos de las conexiones pertenecientes a cada una de ellas, posterior a la multiplicación, se realiza una sumatoria de los productos y el resultado obtenido, se aplica a una función de activación. Los tipos de funciones de transferencia habituales en la aplicación de redes neuronales son: Identidad, Escalón, Lineal a tramos, Sigmoidea, Gaussiana y Senoidal [6]. Una red con dos capas ocultas con d nodos de entrada, los nodos de la primera capa oculta funcionan como hiperplanos, que efectivamente particionan el espacio d -dimensional en varias regiones. Cada nodo de la segunda capa oculta representa una agrupación de puntos que pertenecen a la misma clase [8].

2.6.1 Principios del algoritmo de determinación

El espectro armónico de magnitudes de voltaje nodales en un sistema eléctrico, se genera en función a la ubicación donde se encuentra la carga no lineal conectada. Representando éste fenómeno de manera analítica por el método de inyección de corrientes se tiene la ecuación $[V_h] = [Z_h][I_h]$. En ésta ecuación se distingue que según en la fila del vector I_h donde se incorpora la inyección de corriente nodal, se generaría un espectro característico. Utilizando ésta información, se realizan simulaciones a base del programa de simulación de penetración de armónicos, para una cierta condición de operación del sistema y conectando la carga armónica previamente asociada a un tipo de fuente en específico en cada nodo de la red eléctrica.

El resultado inicial de este estudio proporciona una serie de gráficas del espectro armónico de voltaje, pero es necesario realizar alguna metodología de asociación de la información generada en las simulaciones (representada en las gráficas) y mediciones en campo, por medio de la cual pueda determinarse la ubicación del nodo contaminante de la red eléctrica.

La precisión de la respuesta del modelo armónico del sistema empleado, así como las variaciones de carga en los nodos son factores que dificultan la asociación visual de las gráficas con los datos de las mediciones, agregando a ésta, la magnitud de tamaño del sistema eléctrico. La dificultad de asociación implica que la distorsión del espectro armónico puede llegar a grados, que de tal manera que no pueda realizarse una simple deducción. Tomando una de las características de las redes neuronales artificiales, que es la de identificar patrones de acuerdo a rasgos, se considera la aplicabilidad de ésta herramienta, con el fin de analizar la respuesta de asociación de similitudes del espectro armónico para una característica específica de operación del sistema eléctrico, obtenida por medio de simulación y distorsiones del espectro por variaciones de consumo de cargas en los nodos del sistema eléctrico.

2.6.2 Desarrollo del algoritmo de determinación

Como se mencionó en la sección anterior (2.6.1), la distorsión del espectro armónico de magnitudes de voltaje varía en mayor razón a las variaciones de carga en los nodos del sistema, por éste motivo es necesario contar con información de tendencias de consumo de energía en los nodos del sistema bajo estudio, y con base a ésta información se ubica un consumo intermedio en un cierto rango (a un horario también conveniente para tomar mediciones), y se procede a realizar las simulaciones de penetración de armónicos utilizando el consumo seleccionado.

Se deberán hacer n simulaciones armónicas para n nodos del sistema eléctrico bajo estudio aislando los nodos de generación ya que en éste trabajo se suponen que se conoce la inexistencia de cargas armónicas conectadas a los mismos. Ya que la carga armónica identificada se coloca en cada nodo y se realiza su respectiva simulación. La capacidad de consumo de energía de la carga no lineal no es factor de problema en este estudio, por motivo de que el método se aborda de manera lineal (método de inyección de corrientes) al normalizar los datos del espectro armónico de magnitudes de voltaje en el rango de 0 a 1, el patrón transformado escalado posee la misma forma que el no escalado, esto se muestra en la Figura 3. 3 y Figura 3. 4. Es necesario realizar un escalado cuando se trabaja con redes neuronales en el rango de $[0,+1]$ o $[-1,-1]$, que son los límites de las funciones de activación, para evitar la saturación de ésta al realizar la suma ponderada de las entradas [6].

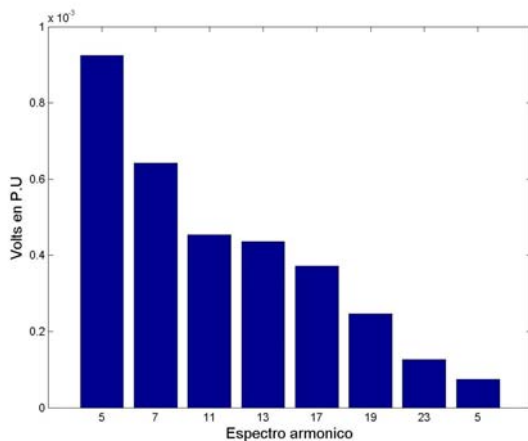


Figura 3. 3 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia J sin escalado

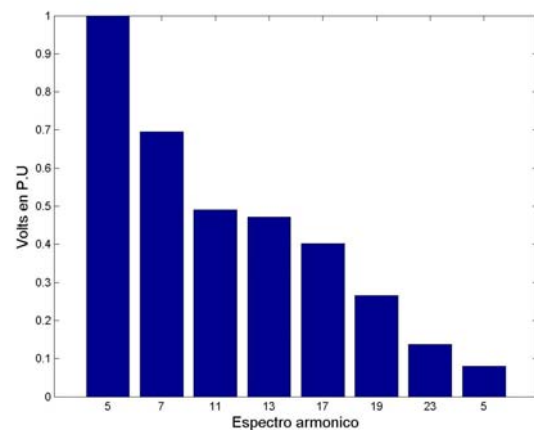


Figura 3. 4 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia J escalado

Teniendo la información de los estudios de penetración de armónicos, para una condición de operación y conectando la fuente no lineal en cada nodo del sistema eléctrico. Se procede al entrenamiento de las redes neuronales para realizar las acciones de identificación de clases.

2.6.3 Estructura de la red neuronal artificial

La red neuronal artificial empleada para éste algoritmo es del tipo progresivo multicapa con retropropagación del error, utilizando una capa de entrada, una oculta y una de salida. Las funciones de activación empleadas son del tipo sigmoideal con un rango de operación de $[0,+1]$ para todas las neuronas. En la Figura 3. 2 se aprecia la estructura de la red empleada.

La selección del rango de operación se sustenta en la necesidad de la respuesta a la salida de la red neuronal, ya que, lo que se requiere para la solución del problema de identificación es un porcentaje de similitud del espectro armónico de magnitudes de voltaje para cada nodo de la red, con respecto al espectro medido en cualquier nodo de la red eléctrica en estudio. El algoritmo de aprendizaje seleccionado es el de gradiente descendiente con razón de aprendizaje variable con momento.

Para la creación de la red neuronal artificial, así como para el entrenamiento se utiliza el paquete computacional Matlab v.6.5. Este paquete incluye funciones ya prediseñadas para elaborar este tipo de trabajo, ya que el objetivo de éste método de determinación de nodos contaminantes, es el de aplicar ésta herramienta y analizar su aplicabilidad, no el de diseño de una red neuronal artificial.

En el capítulo 4 se presentan las pruebas realizadas a éste algoritmo de determinación de la ubicación de una fuente armónica. En el apéndice B se muestra el código fuente de los programas involucrados.

2.6.4 Estructura del algoritmo de determinación

El algoritmo de determinación de nodos contaminantes, utilizando redes neuronales artificiales se estructuró de manera que a través de un espectro armónico de magnitudes de voltaje, obtenido en cualquier nodo de la red eléctrica e introducido al algoritmo, a la salida de la red neuronal artificial se puedan observar cantidades porcentuales escalados de 0 a 1, donde dichas cantidades son indicadores del grado en que un nodo presenta similitud con el patrón introducido, y la interpretación de ésta similitud es la que en el nodo que presente el mayor grado de similitud con el espectro introducido es el que contiene la carga no lineal. Se incorporan también indicadores cuando la información introducida a la red neuronal se aparta de los patrones a los cuales fue entrenada, este indicador es un incremento de valor porcentual en otro nodo el cual fue entrenado con un valor de cero.

Para evitar errores de convergencia y tiempo excesivo de cómputo en el entrenamiento, se incorpora una red neuronal para cada nodo i del sistema eléctrico, y ésta se entrena con el voltaje nodal v_i generado en los estudios armónicos para

cada conexión de la carga no lineal en los n nodos del sistema, descartando los nodos de generación, ya que en éstos se colocan con estatus de no contaminadores.

Al tener las redes neuronales artificiales entrenadas, los archivos de datos que contienen la configuración de la red y los pesos de las interconexiones principalmente, son llamadas por el número de nodo para el cual fueron entrenadas. Este número del nodo es introducido de acuerdo a la asignación de numeración del sistema eléctrico estudiado para el punto donde se obtienen los datos del espectro.

El formato de los datos de entrada a la red deben introducirse en forma de vector ($n \times 1$), donde cada fila corresponde a cada armónico sin escalar los valores y en cantidades en por unidad.

3.4 Algoritmo de determinación de cargas no lineales utilizando el método de variación monoparamétrica

El algoritmo propuesto para solucionar el problema de detección de nodos con presencia de cargas no lineales, está basado de manera fundamental en el método de variación monoparamétrica, propuesto por A.M Dán y Zs. Czira en el artículo que lleva el nombre “**Identification of Harmonic Sources**”. En el artículo mencionado se presentan las explicaciones teóricas de los cambios en el 5to. Armónico. Se realiza la elección de éste armónico porque usualmente la magnitud del mismo es la mayor y es la principal componente del THD, aunque en el caso de que el 5to.armónico no sea la componente dominante del THD, se recomienda realizar un procedimiento de identificación para encontrar el armónico dominante [7]. A continuación se presentarán los fundamentos teóricos de éste método, y de manera posterior se plantearán las modificaciones realizadas en el mismo, con el fin de adaptarlo a las necesidades requeridas.

2.6.5 Método de Variación Monoparamétrica

El método de variación monoparamétrica está basado en esencia por las gráficas de $V_5 - I_5$ e $I_5 - I_1$ a través de cambios repentinos de las condiciones de operación del sistema, así pues, estos diagramas muestran los cambios del punto de operación de cargas típicas. Para solucionar el problema es esencial encontrar cambios súbitos de un parámetro, mientras los otros permanecen estables. Se eligen los valores absolutos de V_5 , I_5 e I_1 , éstos valores pueden ser evaluados fácilmente con mediciones en sitio. Existen muchos parámetros capaces de cambiar el punto de operación, pero afortunadamente existe la posibilidad de encontrar cambios de dos puntos de operación consecutivos (secuencia de tiempo $\Delta t=4s$) como consecuencia del cambio súbito de un parámetro [7]. Para esclarecer el método, los casos de estudio que abarca son:

- Elemento de red lineal

- Elementos activos
- Componentes lineales y no lineales

Elemento de red lineal:

Éste modelo equivalente se encuentra integrado por un medio de un circuito serie R-L o R-C (Z_L) para una frecuencia dada, La carga no lineal se considera como un generador de corriente ideal (I_G), la red de suministro con otras ramas conectada a la misma barra es modelada con un generador de Thevenin (U_N y Z_N). Éste circuito no puede cambiar ni causar distorsión armónica de la barra, pero sí sufre sus efectos, ésta configuración, así como las gráficas de su comportamiento debido a cambios del punto de operación, puede verse en Figura 3. 5, Figura 3. 6 y Figura 3. 7.

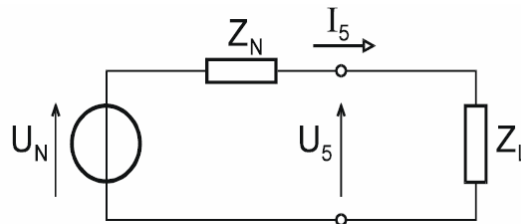


Figura 3. 5 Modelo equivalente para una carga lineal

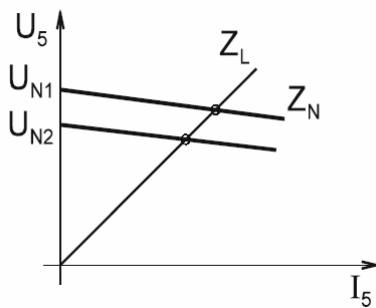


Figura 3. 6 Gráfica comparativa de $U_5 - I_5$ elemento pasivo

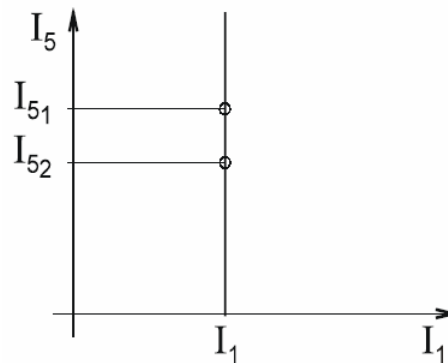


Figura 3. 7 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ elemento pasivo

La ecuación que describe el comportamiento del elemento lineal en el 5to. armónico es:

$$U_N - I_5 Z_N = U_5 = I_5 Z_L \dots \dots (3.1)$$

El punto de operación es causado en la mayoría de los casos por la fluctuación de U_N , la distorsión de voltaje de cargas no lineales en otro punto de la

red. Se tiene como resultado I_5 cambia pero I_1 permanece al mismo valor si el voltaje a la frecuencia fundamental no cambia.

Elementos activos:

El modelo equivalente utilizado para analizar el comportamiento de parámetros eléctricos (involucrados en el método) de una barra, en presencia de una carga no lineal sin incluir cargas pasivas puede verse en la Figura 3. 8.

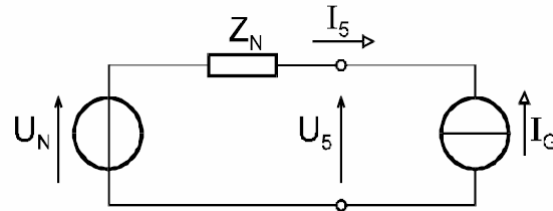


Figura 3. 8 Modelo equivalente para una carga no lineal

La ecuación que describe el comportamiento del modelo equivalente de elementos activos es:

$$U_5 = U_N - I_5 Z_N = U_N + I_G Z_N \dots (3. 2)$$

Éste tipo de carga causa parcial o totalmente el THD de la barra. Si el cambio es causado por la carga no lineal I_G , el punto de operación es modificado como se muestra en la Figura 3. 9 y Figura 3. 10. Si los cambios se originan desde otros elementos no lineales modelados con U_N , el resultado se aprecia en la Figura 3. 11 y Figura 3. 12.

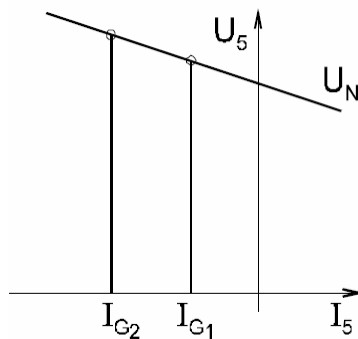


Figura 3. 9 Gráfica comparativa de $U_5 - I_5$ elemento activo variando I_G

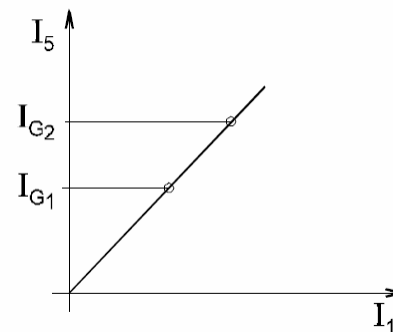


Figura 3. 10 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ elemento activo variando I_G

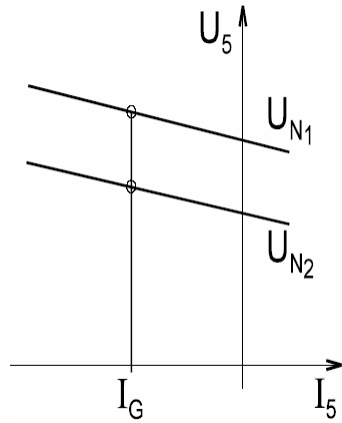


Figura 3. 11 Gráfica comparativa de $U_5 - I_5$ elemento activo variando U_N

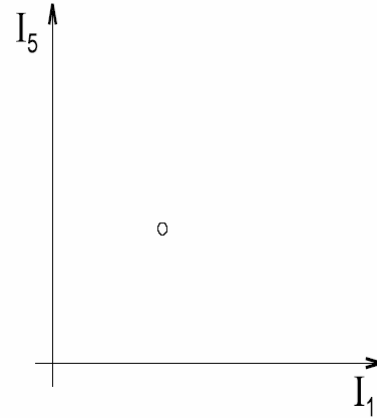


Figura 3. 12 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ elemento activo variando U_N

Componentes lineales y no lineales:

La ecuación que describe el comportamiento del circuito mostrado en la Figura 3. 13 se plantea a continuación

$$U_5 = U_N - I_5 Z_N = (I_5 + I_G) Z_L \dots \dots (3. 3)$$

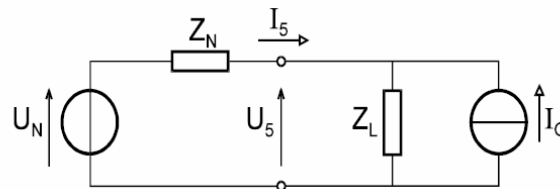


Figura 3. 13 Modelo equivalente para una carga no lineal compuesta

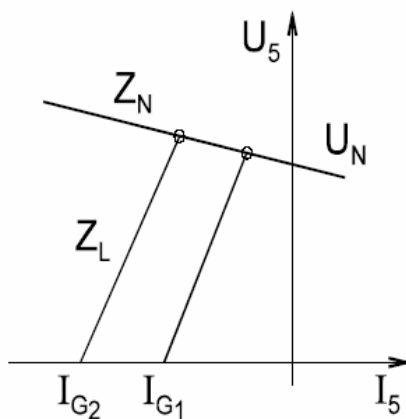


Figura 3. 14 Gráfica comparativa de $U_5 - I_5$ elemento activo variando I_G

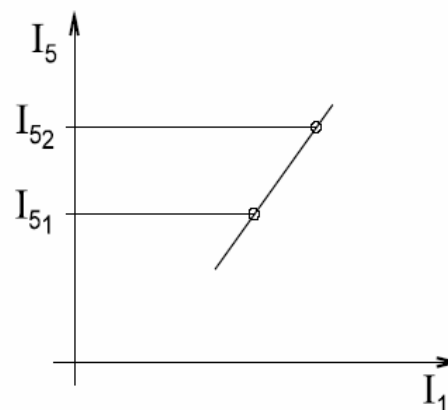


Figura 3. 15 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ elemento activo variando I_G

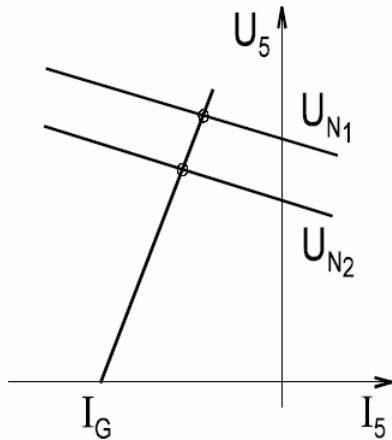


Figura 3. 16 Gráfica comparativa de $U_5 - I_5$ elemento activo variando U_N

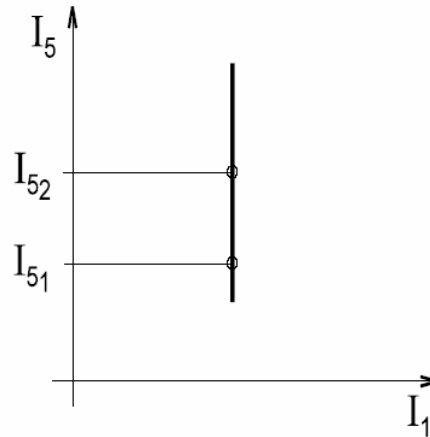


Figura 3. 17 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ elemento activo variando U_N

2.6.6 Modificaciones del Método de Variación Monoparamétrica

En el apartado 3.4.1 se explicaron las bases teóricas que conforman el método de estudio elegido para obtener una posible solución al problema de encontrar un nodo o nodos de un sistema eléctrico, con presencia de cargas armónicas. Es necesario realizar ciertas modificaciones a los principios de análisis planteados en éste método con el fin de adaptarlo a soluciones con la ayuda de equipo de cómputo y algún programa computacional de programación, esto con el fin de resolver el problema de una manera sencilla, ya que éste método utiliza como base de solución la representación gráfica de algunos parámetros eléctricos del sistema, y la interpretación de los mismos. Dependiendo del tamaño de la red, para algunos casos puede resultar sencillo analizarlo de forma gráfica-visual, pero en otros casos, se puede obtener demasiada información y esto puede repercutir directamente en la dificultad de la toma de decisiones en la detección de nodos contaminados, así como también de los conocimientos de la persona encargada del análisis.

En la elaboración de éste algoritmo, se parte de que se cuenta con las mediciones de voltajes nodales y corrientes de línea del sistema eléctrico a analizar. [Explicación de estimación de estados del libro de arrillaga].

La configuración de un nodo en un sistema eléctrico se plasma regularmente de la forma mostrada en la Figura 3. 18, en el cuál un nodo se encuentra interconectado a otros nodos del sistema mediante líneas de transmisión, y mediante éstos elementos se suministra la energía eléctrica a los usuarios. La energía consumida por los usuarios se representa por medio de la potencia aparente en sus partes real e imaginaria (MWatts y MVars), pero en éste punto se tienen conectadas en paralelo cargas cuya composición es desconocida. Debido a que un estimador de

estado de un sistema eléctrico provee información de los voltajes nodales y corrientes de línea, pueden utilizarse éstos parámetros eléctricos para buscar nodo(s) contaminados con cargas no lineales.

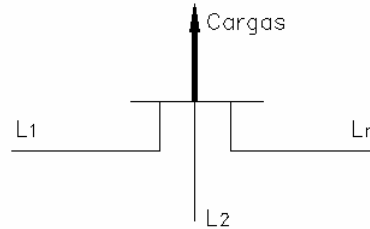


Figura 3. 18 Representación de un nodo de un sistema eléctrico

El método de análisis propuesto difiere principalmente al método original, en que se utilizan corrientes nodales en lugar de la corriente consumida por la carga no lineal para realizar el estudio gráfico-visual. Entonces es necesario estudiar el comportamiento de las gráficas propuestas en el método, para observar el comportamiento de los parámetros ante cambios súbitos del punto de operación de las cargas no lineales para distintas configuraciones. Éste análisis se encuentra formado por dos secciones: Carga armónica individual y dos cargas armónicas conectadas al sistema eléctrico. Para realizar éste análisis, se llevan a cabo simulaciones variando la potencia de la carga no lineal en el caso de una fuente armónica, y para dos cargas no lineales conectadas en el sistema eléctrico, se realizan simulaciones variando la potencia de una de ellas y dejando la otra en condiciones estables, y se repite éste paso de manera inversa. A continuación se muestra éste análisis.

3.4.1.1 Carga armónica individual en el sistema eléctrico:

Para realizar éste análisis se utiliza el sistema eléctrico de potencia que se muestra en la Figura 3. 19, como base para las pruebas y comprobación del algoritmo de detección. Como parte inicial, se realizan simulaciones en el mismo, conectando en un nodo del sistema (sin considerar nodos de generación) la carga no lineal (CEV) y variando la potencia de la misma con pasos de 1MVar, es necesario guardar los datos generados por cada simulación para que de manera posterior se puedan generar las gráficas. Se realiza el procedimiento de variación de carga hasta finalizar con tres incrementos de potencia, en éste estudio las pruebas se llevaron a cabo en el nodo cuatro, ya que el comportamiento era repetitivo para el nodo tres y nodo cinco, con la única diferencia en el escalamiento de las magnitudes, con motivo a éste hecho, se utilizó la opción de normalizar los datos de cada vector de datos (V_5 , I_5 e I_1), esto es, extrayendo el valor máximo de cada vector de datos y dividiendo cada vector por su respectivo máximo, así, se obtienen las siguientes gráficas.

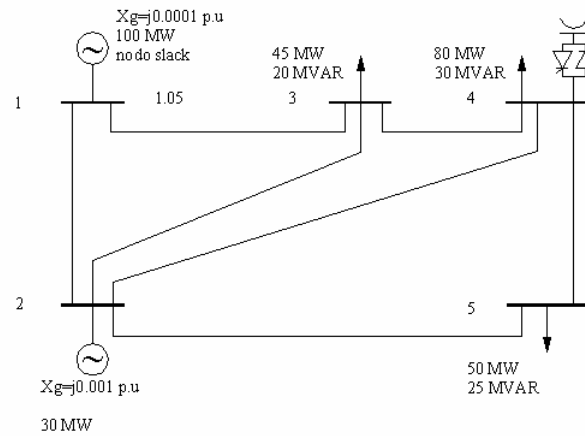


Figura 3. 19 Diagrama eléctrico con una carga armónica

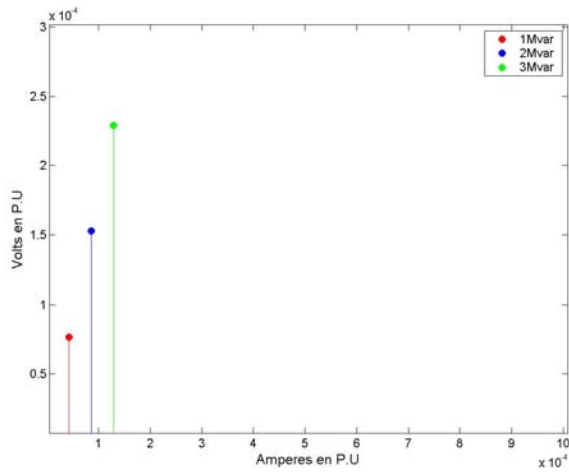


Figura 3. 20 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 3 con carga no lineal conectada en nodo 4

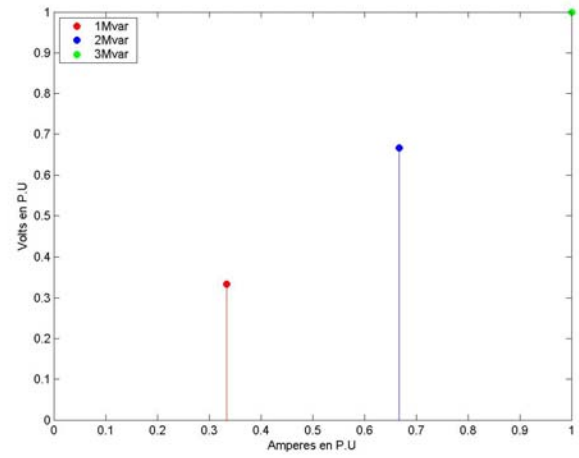


Figura 3. 21 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 3 con carga no lineal conectada en nodo 4 normalizado

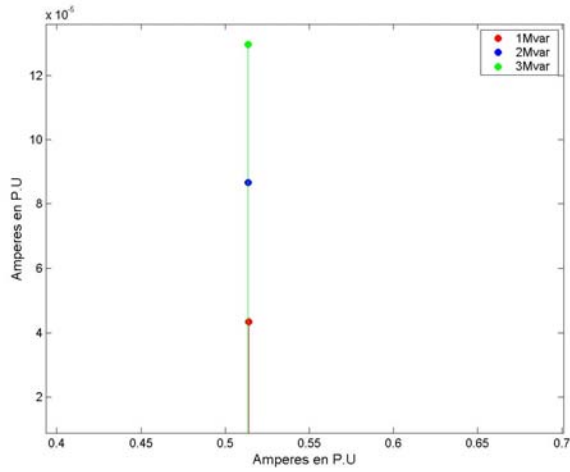


Figura 3. 22 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 3 con carga no lineal conectada en nodo 4

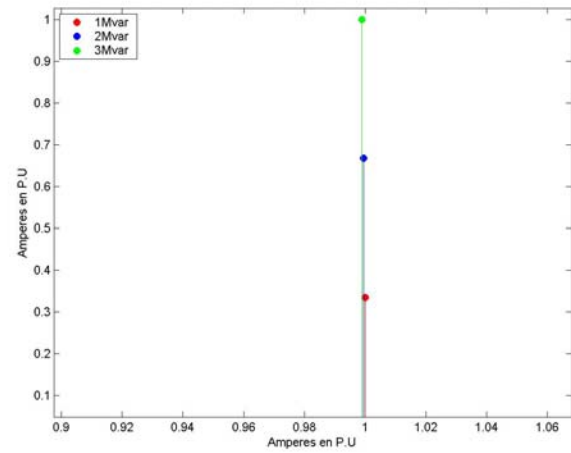


Figura 3. 23 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 3 con carga no lineal conectada en nodo 4 normalizado

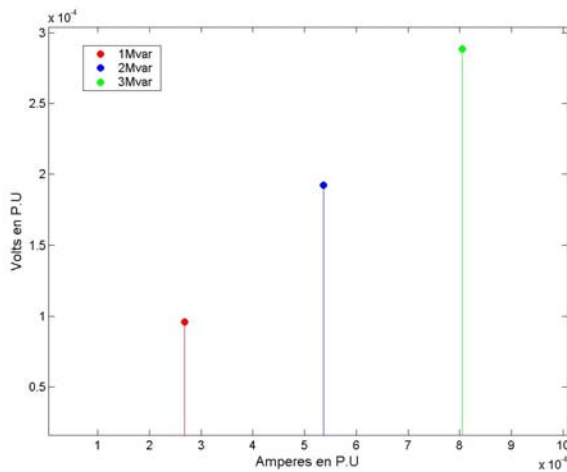


Figura 3. 24 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 4 con carga no lineal conectada en nodo 4

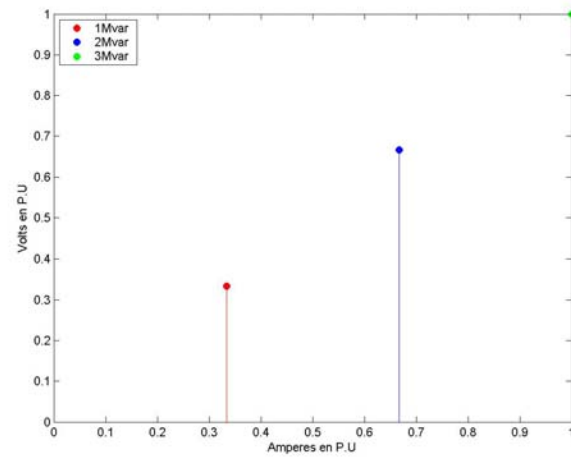


Figura 3. 25 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 4 con carga no lineal conectada en nodo 4 normalizado

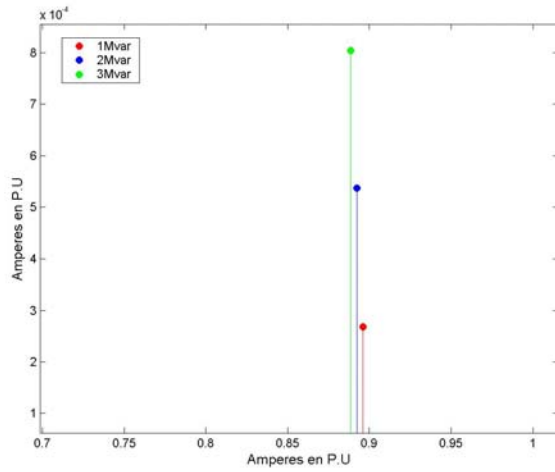


Figura 3. 26 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 4 con carga no lineal conectada en nodo 4

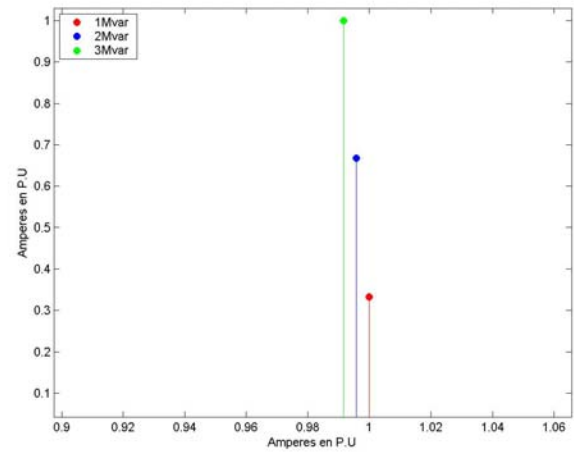


Figura 3. 27 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 4 con carga no lineal conectada en nodo 4 normalizado

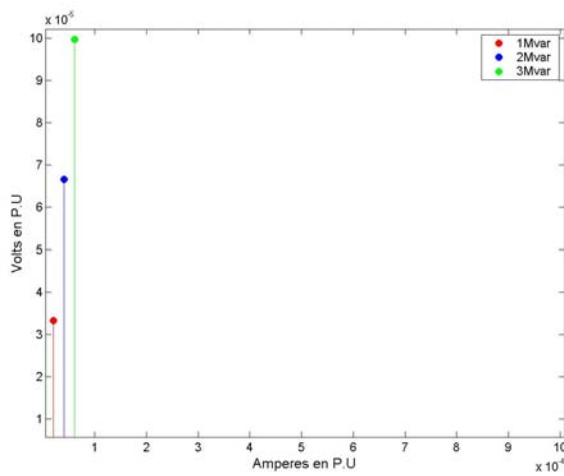


Figura 3. 28 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 5 con carga no lineal conectada en nodo 4

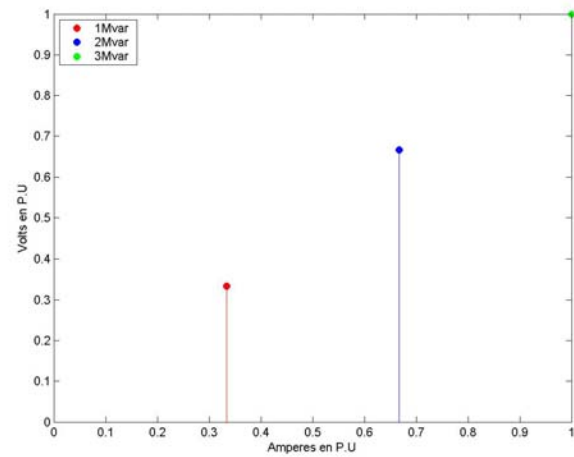


Figura 3. 29 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 5 con carga no lineal conectada en nodo 4 normalizado

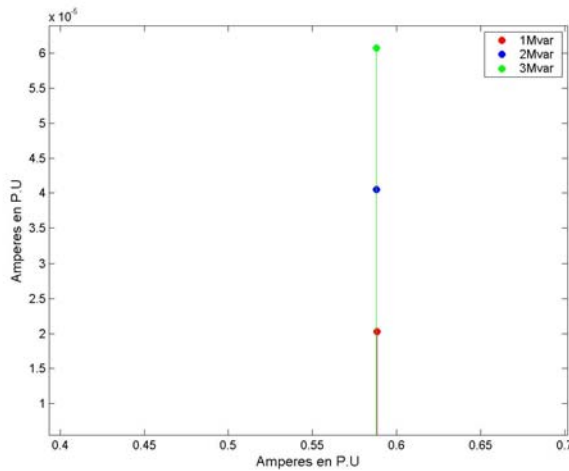


Figura 3. 30 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 5 con carga no lineal conectada en nodo 4

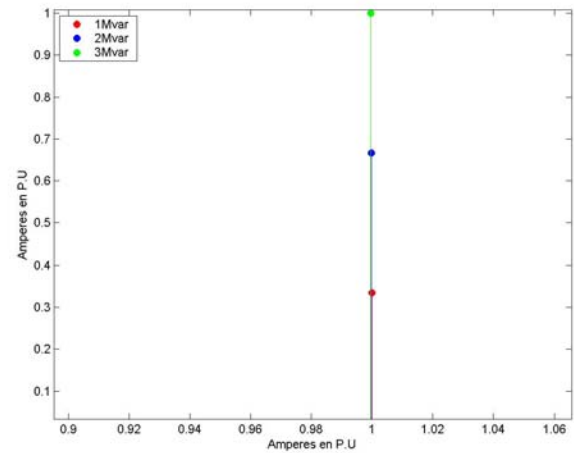


Figura 3. 31 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 5 con carga no lineal conectada en nodo 4 normalizado

El sistema eléctrico de potencia utilizado para el estudio cuenta con nodos compuestos de cargas pasivas (sin cargas no lineales) y cargas compuestas (cargas lineales y no lineales), en el análisis de las gráficas, puede observarse que en el caso de tener únicamente una carga no lineal en el sistema, y que ésta sea la causante de generar la contaminación eléctrica, las gráficas de $V_5 - I_5$ siempre se comportan de manera muy aproximada a la lineal (caso normalizado). Así, presentando éste comportamiento, en el estudio de $V_5 - I_5$, no se es capaz de deducir alguna metodología de detección de nodos contaminados, porque tanto nodos activos como nodos compuestos se comportan de manera similar. Por lo tanto, es necesario detectar algún comportamiento en las gráficas $I_5 - I_1$ que pueda ser de ayuda para deducir alguna forma de detectar el nodo causante de contaminar. De acuerdo a la Figura 3. 23, Figura 3. 27 y Figura 3. 31 se puede observar que en el instante de variación de potencia de la carga no lineal, los nodos pasivos no sufren de variaciones considerables de corriente a la frecuencia fundamental, aunque sí presentan variaciones en la magnitud de corriente armónica. En el nodo en el cuál se conecta la carga armónica es la que presenta mayor variación de corriente fundamental, y así, utilizando el mayor incremento de corriente a frecuencia fundamental puede detectarse el nodo causante de contaminar.

3.4.1.2 Multi-Cargas armónicas conectadas en el sistema eléctrico:

En el caso, que estén presentes dos o más cargas no lineales conectadas en un sistema eléctrico, deberá realizarse un estudio similar al presentado anteriormente (caso con una fuente armónica). Para éste estudio se elaboran simulaciones utilizando dos cargas no lineales del mismo tipo (CEV'S) como se muestra en la

Figura 3. 32, utilizando variaciones de 1MVar en las cargas armónicas hasta con tres incrementos, pero con fines de abarcar todos los comportamientos posibles al existir multi-cargas no lineales, se varía la potencia de una carga mientras la otra permanece en estado estable, y se repite el procedimiento de manera inversa. Por cada simulación, es necesario guardar los archivos de resultados, para que de manera posterior sean utilizados por las rutinas de programación diseñadas para realizar el estudio de detección. A continuación se presenta éste análisis de resultados, el cuál será el punto de partida para la extracción de características representativas de cada comportamiento, y así de forma posterior, utilizarlas en la elaboración del algoritmo de detección.

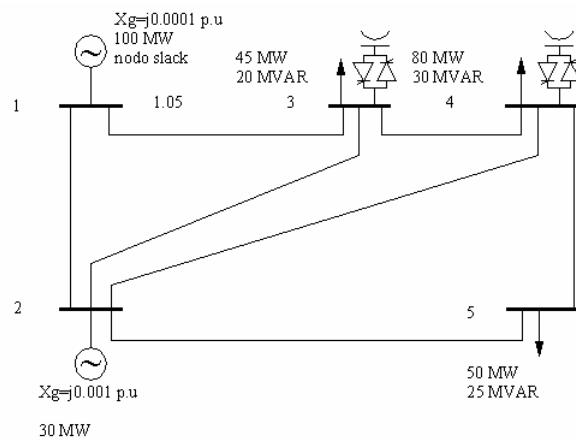


Figura 3. 32 Diagrama eléctrico con dos cargas armónicas

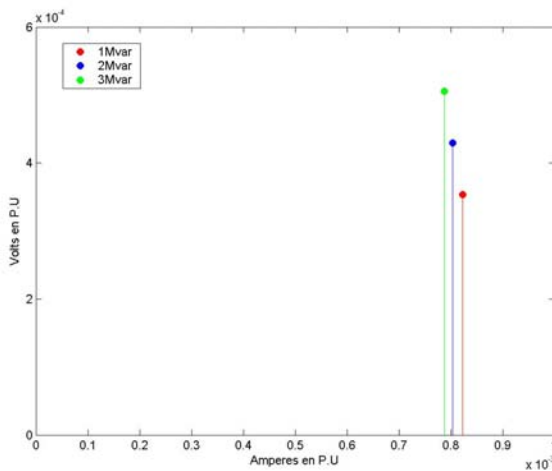


Figura 3. 33 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 3 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4

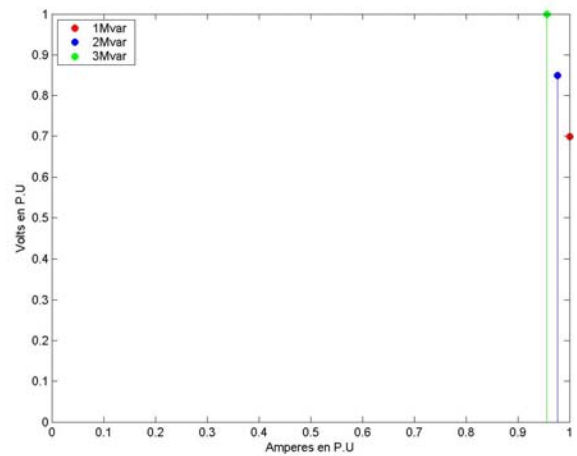


Figura 3. 34 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 3 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4 normalizado

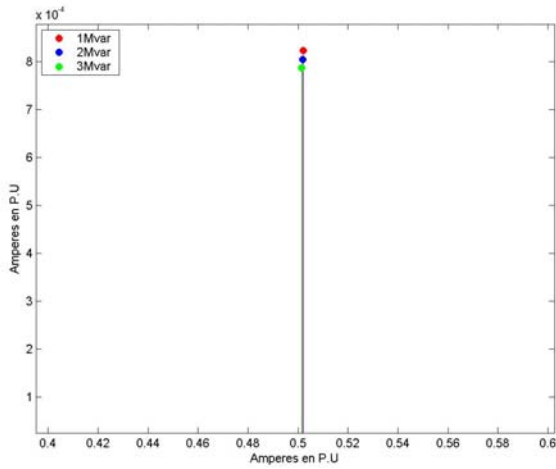


Figura 3. 35 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 3 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4

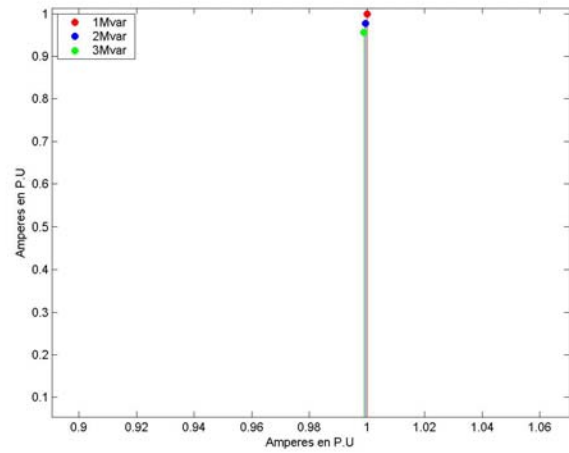


Figura 3. 36 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 3 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4 normalizado

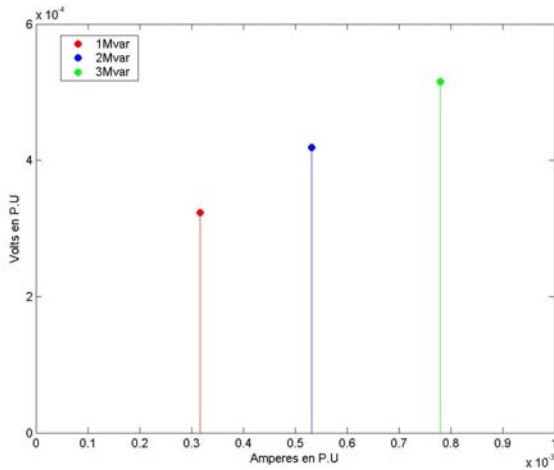


Figura 3. 37 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 4 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4

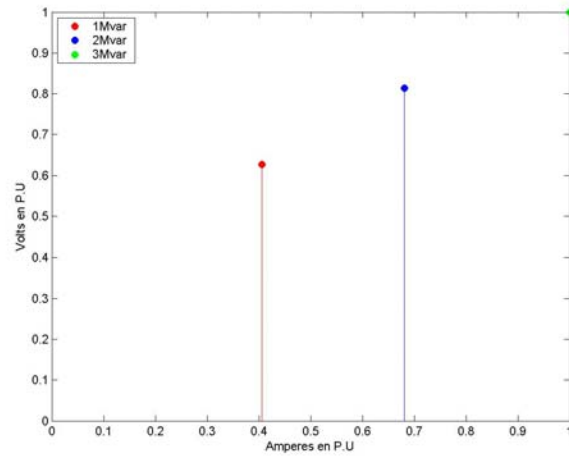


Figura 3. 38 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 4 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4 normalizado

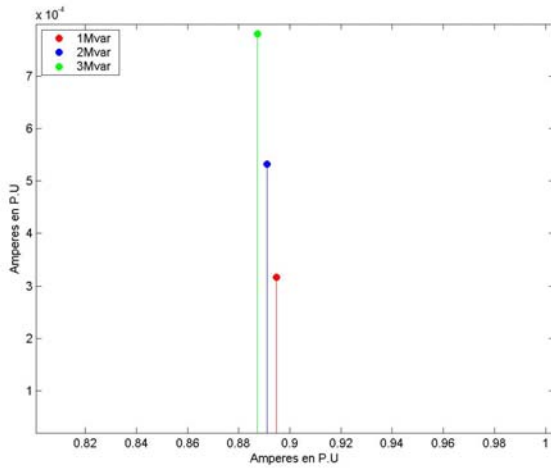


Figura 3. 39 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 4 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4

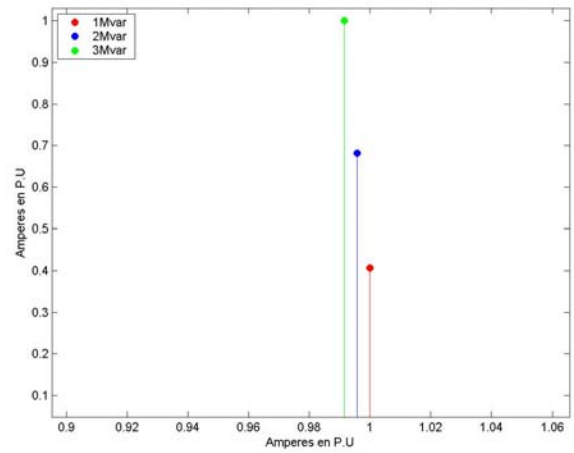


Figura 3. 40 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 4 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4 normalizado

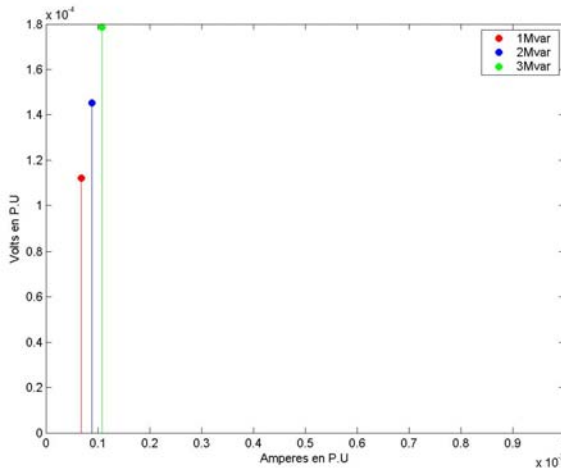


Figura 3. 41 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 5 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4

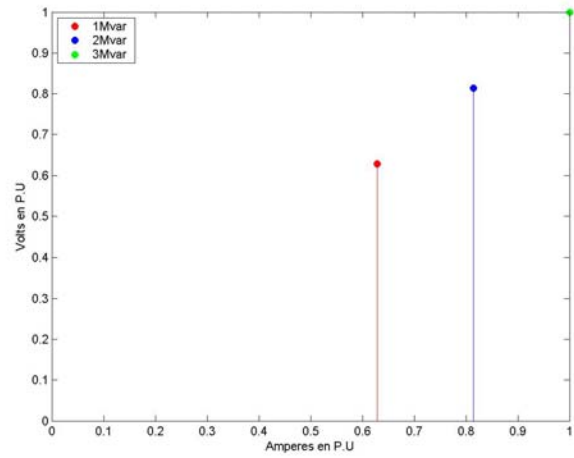


Figura 3. 42 Gráfica comparativa de $V_5 - I_5$ en nodo 5 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4 normalizado

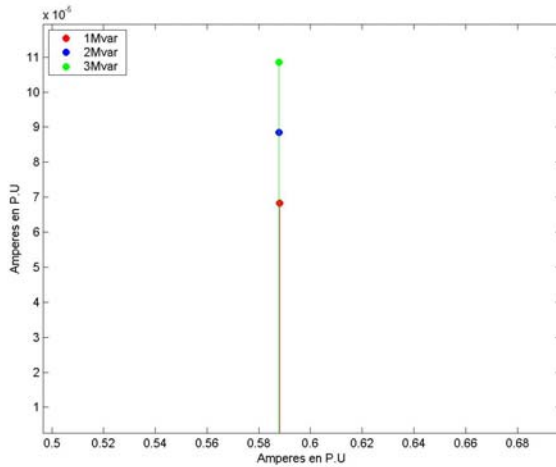


Figura 3. 43 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 5 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4

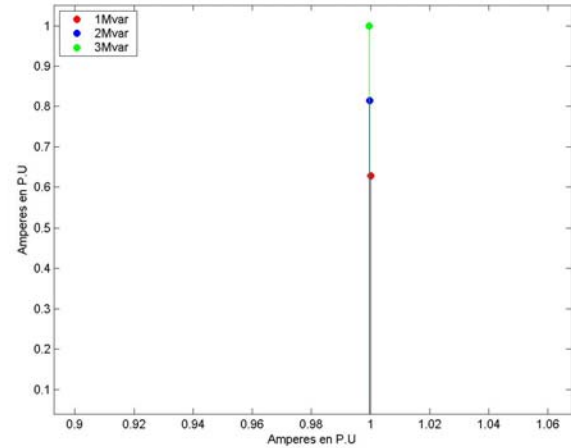


Figura 3. 44 Gráfica comparativa de $I_5 - I_1$ en nodo 5 con carga no lineal conectada en nodo 3 y 4, variando carga armónica en nodo 4 normalizado

De acuerdo a las gráficas presentadas se presenta el siguiente análisis de características:

Nodo 3:

En éste nodo se encuentra presente una carga armónica, pero la carga no lineal responsable del disturbio es la que se encuentra conectada en el nodo 4, por lo tanto el comportamiento puede apreciarse en la Figura 3. 33, Figura 3. 34, Figura 3. 35 y Figura 3. 36. En las gráficas de $V_5 - I_5$ se observa que ante cambios de consumo de potencia de una carga armónica en otro nodo del sistema la corriente nodal sufre decrementos, mientras que el voltaje incrementa, pero el comportamiento es de forma no lineal. Esto ocurre como consecuencia si se hace referencia a la Figura 3. 13, y a $U_5 = U_N - I_5 Z_N = (I_5 + I_G) Z_L \dots (3. 3)$. Al incrementar el potencial V_5 se está incrementando la corriente armónica que fluye a través de la carga pasiva y éste incremento compensa la corriente que suministra la carga armónica invariante en el nodo 3, ésta serie de eventos repercute en una disminución de la corriente nodal en el nodo de estudio. En el análisis de $I_5 - I_1$, se aprecia que la corriente fundamental permanece muy próxima a la invariabilidad, así como la corriente armónica, esto se debe a que en éste nodo no existe variación de corriente fundamental (consumida por la carga armónica), ya que en otro nodo la carga armónica es la que se encuentra variando. La magnitud de I_5 sufre variaciones casi imperceptibles ya que la carga no lineal en el nodo 3 es la que aporta la corriente armónica a la carga pasiva y distribuye también a todo el sistema.

Nodo 4:

En éste nodo se encuentra presente la carga armónica causante del disturbio, y la respuesta de los parámetros bajo análisis puede verse en la Figura 3. 37, Figura 3. 38, Figura 3. 39 y Figura 3. 40. En las gráficas de $V_5 - I_5$ se observa que ante cambios de consumo de potencia de la carga armónica en éste nodo, incrementa tanto el voltaje como la corriente nodal, pero el comportamiento no es lineal. La explicación a éste comportamiento emerge a partir de la Figura 3. 13, y a $U_5 = U_N - I_5 Z_N = (I_5 + I_G) Z_L (3. 3)$. Al incrementar la potencia de la carga armónica en el nodo 4 existe un incremento en el potencial V_5 y esto incrementa el consumo de corriente armónica que fluye a la carga pasiva, pero a diferencia del comportamiento del nodo 3, este incremento no es mayor al incremento de la carga armónica (existe variación), y esto a su vez inicia un aumento del flujo de corriente armónica hacia el sistema eléctrico a través de éste nodo. Por la ecuación $U_5 = U_N - I_5 Z_N = (I_5 + I_G) Z_L (3. 3)$. puede verse que el incremento de V_5 no es directamente proporcional a I_G , si no que tiene adicionalmente el parámetro I_5 , éste es el factor que provoca el comportamiento no lineal, pero tanto V_5 e I_5 se comportan de forma ascendente al incrementarse la potencia de la carga armónica en éste nodo. El comportamiento de $I_5 - I_1$ se debe a que, con motivo de la variación de potencia reactiva de la carga no lineal en el nodo 4, el voltaje en este nodo incrementa, esto a su vez provoca una disminución de corriente fundamental de consumo en el nodo, pero con motivo a éste escenario, se genera un incremento de corriente armónica saliente del nodo.

Nodo 5:

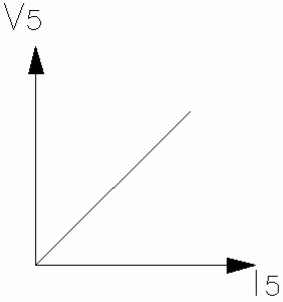
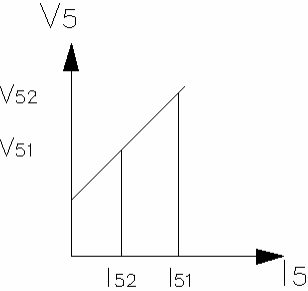
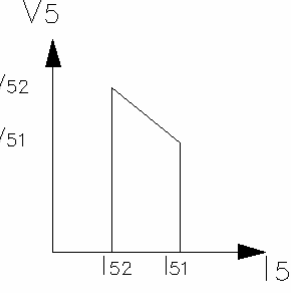
Este nodo posee únicamente carga pasiva, por lo tanto como puede apreciarse en la Figura 3. 42, el comportamiento de $V_5 - I_5$ es muy aproximada a la lineal, este fenómeno se aclara si se analiza la Figura 3. 5 y la ecuación $U_N - I_5 Z_N = U_5 = I_5 Z_L)$, puede observarse que el voltaje armónico es directamente proporcional a la corriente armónica que penetra en ese nodo. . El comportamiento de $I_5 - I_1$ se debe a que, el incremento de corriente fundamental permanece casi invariable, (debido al aumento de voltaje nodal a frecuencia fundamental por el efecto de los CEV's), mientras que la corriente armónica aumenta por el incremento de potencia de la carga no lineal conectada en otro nodo del sistema eléctrico.

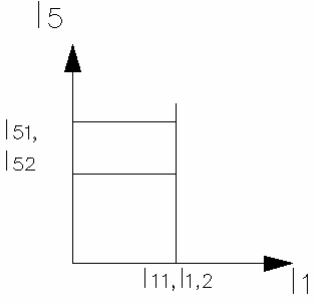
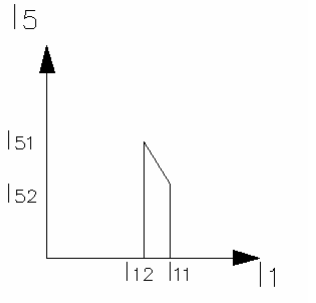
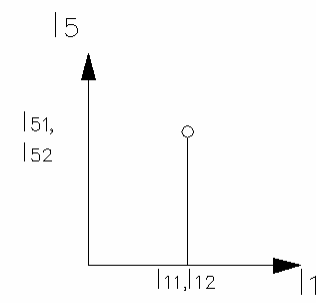
2.6.7 Características relevantes del análisis

En la sección 2.6.6 se hizo la descripción de las modificaciones al método de variación monoparamétrica original. Éste análisis produjo una serie de comportamientos en cada nodo del sistema, como repercusión a distintos escenarios de operación de cargas armónicas en el sistema. En ésta sección se presenta un compendio de éstas características, esto se lleva a cabo con el fin de presentar en

forma simplificada estos resultados, que son de utilidad para la creación del algoritmo y de forma posterior al desarrollo del programa de detección de nodos contaminados.

Tabla 3. 1 Características relevantes del método de variación monoparamétrica modificado

Comportamiento $V_5 - I_5$	Definición
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nodo pasivo con 2 o más fuentes armónicas en el sistema eléctrico. ▪ Nodo pasivo con 1 fuente armónica en el sistema eléctrico. ▪ Nodo activo con 1 fuente armónica en el sistema eléctrico.
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nodo con carga no lineal variante, en un sistema eléctrico con presencia de 2 o más fuentes armónicas.
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nodo con carga no lineal invariante, en un sistema eléctrico con presencia de 2 o más fuentes armónicas (variando corriente de otra fuente armónica en el sistema).
Comportamiento $I_5 - I_1$	Definición

Comportamiento $V_5 - I_5$	Definición
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nodo pasivo en presencia de 1 o más fuentes armónicas en el sistema.
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nodo activo (fuente armónica) con variación de corriente armónica.
	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Nodo activo (fuente armónica) sin variación de corriente armónica, con presencia de más fuentes armónicas en el sistema variando.

2.6.8 Desarrollo del algoritmo de determinación

De los resultados obtenidos en la sección 2.6.7 (Características relevantes del análisis) se utilizan los conceptos para llevar a cabo la realización del algoritmo de detección.

Puede observarse en las gráficas de $V_5 - I_5$, que en el caso de que en el sistema eléctrico exista una fuente armónica, el comportamiento es casi lineal, tanto para los nodos activos como pasivos, por lo tanto, utilizando ésta característica se propone la determinación del error absoluto existente entre los parámetros V_5 e I_5 de los dos puntos determinados, y llevar a cabo una comparación con un margen de error. Si los dos errores son inferiores al valor programado, se detecta que en el sistema existe una sola carga armónica, y por lo tanto, se descarta abordar el

problema mediante ésta forma. Por lo tanto se recurren a las gráficas de $I_5 - I_1$, y la característica a tomar, para obtener la solución al problema es mediante la magnitud de cambio entre un punto y otro. La carga responsable de contaminar al sistema con armónicos es la que provoca el cambio de I_5 como repercusión a cambios de operación de la carga armónica (corriente fundamental), por ese motivo, se incorpora un comparador cíclico con cambios en decremento de la magnitud del punto de comparación. Cuando en algún punto de la comparación ya no se cumple la condición inferior de los errores a un valor de variación en sentido de decremento, el nodo en análisis (dato que no cumple con la condición de error) se marca como el nodo activo, y así de ésta forma se hace la identificación del nodo contaminante.

En el caso de que no se cumpla la condición comparativa, se determina que existe más de una fuente armónica en el sistema, y así, se pueden detectar los nodos contaminantes únicamente con las gráficas de $V_5 - I_5$.

Para llevar a cabo la ejecución del programa de detección, es necesario tener los datos de los parámetros eléctricos del sistema involucrados en éste estudio. Para esto, se parte de que se cuenta con la información de las magnitudes de los parámetros para tres cambios incrementales de los mismos (V_5, I_5 e I_1). Para disponer de estos datos, se cuentan con archivos de datos de simulaciones de penetración de armónicos, con variaciones de magnitud de la corriente entregada por la fuente o fuentes armónicas. Los datos a introducir en el programa de detección necesitan ser escalados en el rango de 0-1 y ser organizados con un cierto formato. Los programas desarrollados, así como su descripción de funcionamiento, para realizar éste estudio se presentan en el anexo 3. Los resultados obtenidos empleando ésta metodología se presentan en el capítulo 4.

Pruebas y Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la realización de las pruebas con ambos métodos.

4.1 Pruebas de detección de nodos con carga armónica utilizando el método de Reconocimiento de patrones basado en redes neuronales

Con el objetivo de demostrar, la capacidad de operación del algoritmo propuesto de detección de nodos con cargas armónicas en un sistema eléctrico de potencia, basado en el “**método de reconocimiento de patrones del espectro armónico de magnitudes de voltaje basado en redes neuronales**”, se presentan una serie de casos de prueba. La variación en estos casos corresponde a la inserción de una carga no lineal en nodos distintos de la red eléctrica, y variando las condiciones de carga en los nodos del sistema eléctrico de potencia.

En la Tabla 4. 1 se presentan tendencias supuestas de variaciones de carga en cada nodo del sistema eléctrico. La primera fila en sentido descendente indica el nombre de la prueba, por ejemplo cuando se nombre “potencia a”, se están utilizando los datos de las filas consecuentes de la misma columna para insertarlos en el archivo de datos de entrada del programa de simulación de penetración de armónicos, donde a partir de la segunda fila hasta donde está el mismo dato representa la potencia real y reactiva de cada nodo en unidades de MWatts y MVars. Las flechas indicando “inicio y fin”, establecen el rango en el cual la red todavía es capaz de hacer identificaciones correctas del nodo contaminante, aunque el porcentaje de determinación ya no es aconsejable.

Tabla 4. 1 Casos de prueba del método de detección

a	b	c	d	e	f	g	h	i	j
25,5	27,8	29,7	32,8	35,12	37,14	39,16	40,17	43,18	45,20
50,10	52,11	54,14	55,15	63,20	65,22	67,24	70,25	75,27	80,30
25,8	27,10	29,11	30,13	33,15	35,17	38,18	40,20	45,23	50,25
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Inicio ↑

k	l	m	n	ñ	o	p	q	r	s
47,23	49,24	50,25	52,26	53,27	54,29	55,30	60,35	61,40	63,45
82,32	84,33	85,35	87,36	88,38	88,39	90,40	91,42	93,44	95,46
51,26	53,28	55,30	56,32	57,33	59,34	60,35	65,40	70,45	75,47
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Fin ↑

Para determinar la mejor configuración de parámetros de red neuronal para hacer éste tipo de identificación de patrones, se realizaron entrenamientos modificando las características de las mencionadas. Estas modificaciones se enfocaron en el número de neuronas utilizadas para la capa de entrada y oculta. En el entrenamiento de la red neuronal se partió, utilizando los datos de “**potencia j**”, con un número de 10 neuronas en la capa de entrada, 3 en la capa oculta y 3 en la de salida, con una precisión de 0.0001. Los resultados de ésta configuración se presentan en la Tabla 4. 4 para la potencia “e”. De manera consecutiva se fueron modificando las redes neuronales y realizando pruebas hasta llegar a los parámetros de 30 neuronas en la capa de entrada y 50 en la oculta. Con éstos parámetros de error se analizaron las respuestas con las características de operación sistema mostradas en la Tabla 4. 1, utilizando dos redes neuronales, una utilizando una precisión de 0.001 y la otra de 0.0001. Las dos presentaron resultados satisfactorios, el nodo que indica un mayor porcentaje es en el que la carga no lineal se encuentra conectada. En la Tabla 4. 2, Tabla 4. 3, Tabla 4. 4 y Tabla 4. 5 en la primera columna se muestran éstas configuraciones y las correspondientes salidas de las redes neuronales.

Se toma la red neuronal de 30-50-1e-3, como la óptima para hacer el diagnóstico por los siguientes motivos:

- Menor requerimiento en tiempo de cómputo para el entrenamiento por la menor precisión que maneja.
- Similitud en la respuesta en comparación de la que maneja una precisión de 1e-4.

4.1.1 Análisis de resultados

En la Tabla 4. 2, Tabla 4. 3, Tabla 4. 4 y Tabla 4. 5 se presentan los resultados obtenidos en las simulaciones. Se utiliza ésta presentación con el objetivo de mostrar de la manera más simple la determinación de los nodos con presencia de cargas armónicas.

Como se mencionó anteriormente, las redes neuronales fueron entrenadas utilizando los parámetros de “**potencia j**” (indicado en amarillo) de acuerdo a la Tabla 4. 1. Para ésta potencia, los resultados que generan las redes son muy exactos. Ésta afirmación se valida en la forma de que en la parte superior de cada tabla individual, para cierta potencia se indica el nodo en el cuál se obtuvo el espectro armónico de magnitudes de voltaje (introdujo en la red), y el nodo donde se encuentra conectada la carga armónica, y para la “**potencia j**” los valores porcentuales escalados de salida (0 a 1) están en el rango de 0.9 a 1 para los nodos con presencia de cargas armónicas, mientras que los libres de ésta carga presentan valores cercanos a cero.



Las columnas marcadas en amarillo, son aquellas respuestas de la red que influyeron en el incremento de neuronas en las capas de la red en el entrenamiento, ya que éstas presentaban los mayores errores en la determinación del nodo contaminado.

Los números en rojo indican una respuesta incorrecta a la salida de la red neuronal. Los números en verde significan que para una configuración determinada, son los datos que ya no presentaban resultados deseados. Los datos en azul son los datos que determinaron la elección de la red. Se encontraron problemas de encontrar la red que generara los mejores resultados para la detección de la carga no lineal conectada en el nodo 4 tomando mediciones de voltaje en el nodo 3 (V3), esto puede apreciarse para las distintas configuraciones de red neuronal en la “**potencia e**”, y la presentación de los datos en azul basifican ésta decisión.

Para apreciar la manera en que las salidas de las redes neuronales, entrenadas con la configuración 30-50-1e-3 presentan cambios significativos se hacen pruebas con las potencias r, q, p, l, j, h, e, d y c. A partir de la “**potencia p**”, para el voltaje medido en el nodo 5 con la carga armónica conectada en el nodo 3, la determinación del nodo que contiene la carga comienza a presentar ciertas discrepancias, aunque todavía el nodo contaminador (3) presenta el mayor porcentaje de salida de la red, también el nodo 5 proporciona un valor considerable, éste resultado no está reproduciendo el objetivo del estudio, que es el de determinar una fuente armónicas y no dos. Para el caso donde se mide el espectro de voltaje en el nodo 4 con la carga armónica conectada en el nodo 5 se presenta el mismo fenómeno, y en el resto de las pruebas los resultados arrojados por las redes neuronales son confiables. Ya con el aumento de consumos de carga para la “**potencia q**” los dos casos explicados fallan.

En sentido descendente al consumo de potencias mostrado en la Tabla 4. 1, para la “**potencia d**”, se presenta el problema de que dos nodos proporcionan un valor porcentual considerable en sus salidas, para las mediciones en V3 con carga no lineal en 4 y espectro armónico medido en V5 con carga no lineal en 5, aunque todavía se identifican los nodos contaminantes. Para los dos casos anteriores y con consumos de potencia del sistema en potencia c todavía se identifica el nodo contaminante, pero el grado de incertidumbre es mayor.

La identificación se realiza comparando las salidas entregadas por la red neuronal; y en el estado en que una salida (nodo) que posea un valor porcentual alto y el resto permanezca con valores cercanos a cero se acepta que ese nodo es el causante de contaminar el sistema con armónicos. De acuerdo a los resultados de la prueba se sugiere que valores superiores a 0.8 para un dato que proporciona la salida de la red neuronal y el resto de los datos (nodos) posean valores inferiores a 0.2 es una condición suficiente para definir el nodo del sistema eléctrico donde está la fuente armónica.

Potencia r

numero de neuronas por capa	V3 carga no lineal nodo 3	V4 carga no lineal nodo 3	V5 carga no lineal nodo 3	V3 carga no lineal nodo 4	V4 carga no lineal nodo 4	V5 carga no lineal nodo 4	V3 carga no lineal nodo 5	V4 carga no lineal nodo 5	V5 carga no lineal nodo 5
30-50-1e-3	0.80879 0.23642 0.0010762	0.93894 0.010793 0.027164	0.42422 0.0004828 0.92027	0.0086867 0.96075 0.033476	0.080602 0.96497 3.5115e-005	0.013687 0.87656 0.26282	2.0069e-006 0.095237 0.96916	0.84967 0.00089554 0.257	0.010856 0.010454 0.99475
30-50-1e-4	0.82985 0.21938 0.00020975	0.978 0.00557 0.017024	0.52359 0.00038184 0.91728	0.001464 0.99212 0.024947	0.02306 0.97824 1.2264e-005	0.0013021 0.78159 0.5932	5.6609e-008 0.031419 0.9854	0.80279 0.00024938 0.3066	0.0021615 0.010851 0.997

Potencia q

numero de neuronas por capa	V3 carga no lineal nodo 3	V4 carga no lineal nodo 3	V5 carga no lineal nodo 3	V3 carga no lineal nodo 4	V4 carga no lineal nodo 4	V5 carga no lineal nodo 4	V3 carga no lineal nodo 5	V4 carga no lineal nodo 5	V5 carga no lineal nodo 5
30-50-1e-3	0.88129 0.16189 0.000792	0.93774 0.014436 0.020718	0.58263 0.00040232 0.64256	0.011581 0.95643 0.028246	0.071673 0.96998 3.0639e-005	0.019448 0.88455 0.16663	1.5121e-006 0.073767 0.97596	0.67834 0.00026322 0.55887	0.014711 0.0072621 0.99443
30-50-1e-4	0.90808 0.12556 0.00013936	0.97904 0.0076036 0.012698	0.73018 0.00036733 0.81944	0.0022035 0.99118 0.019265	0.019965 0.98124 1.0846e-005	0.0020901 0.81927 0.41446	4.4768e-008 0.023365 0.98782	0.467 5.8792e-005 0.67422	0.0030843 0.0081067 0.99672

Potencia p

numero de neuronas por capa	V3 carga no lineal nodo 3	V4 carga no lineal nodo 3	V5 carga no lineal nodo 3	V3 carga no lineal nodo 4	V4 carga no lineal nodo 4	V5 carga no lineal nodo 4	V3 carga no lineal nodo 5	V4 carga no lineal nodo 5	V5 carga no lineal nodo 5
30-50-1e-3	0.89859 0.14395 0.00072178	0.93772 0.014334 0.020885	0.76746 0.00044861 0.57011	0.012789 0.95486 0.02676	0.061247 0.97528 2.5902e-005	0.027741 0.9245 0.068247	1.1476e-006 0.057486 0.98119	0.40024 8.546e-005 0.81285	0.019446 0.0057344 0.99357
30-50-1e-4	0.9297 0.098175 0.00011725	0.97993 0.0077717 0.012325	0.90197 0.00051235 0.48852	0.0026854 0.99058 0.016974	0.016786 0.98433 9.3354e-006	0.0034331 0.90254 0.17491	3.5379e-008 0.017259 0.98983	0.16092 1.6039e-005 0.89435	0.0043113 0.0066239 0.99613

Tabla 4. 2 Salidas de las redes neuronales para potencias “r”, “q” y “p”

Potencia I

numero de neuronas por capa	V3 carga no lineal nodo 3	V4 carga no lineal nodo 3	V5 carga no lineal nodo 3	V3 carga no lineal nodo 4	V4 carga no lineal nodo 4	V5 carga no lineal nodo 4	V3 carga no lineal nodo 5	V4 carga no lineal nodo 5	V5 carga no lineal nodo 5
30-50-1e-3	0.95252 0.07942 0.00046656	0.93703 0.016954 0.017855	0.91167 0.0012235 0.077939	0.01836 0.94744 0.02182	0.048958 0.98149 2.0102e-005	0.044735 0.96714 0.013376	8.8886e-007 0.045649 0.98508	0.12093 2.1351e-005 0.9532	0.026704 0.0059171 0.99009
30-50-1e-4	0.9768 0.034723 5.9902e-005	0.98185 0.0098441 0.009692	0.97772 0.002017 0.049612	0.0051065 0.98761 0.011304	0.0134 0.98795 7.4561e-006	0.0075771 0.97122 0.026516	2.823e-008 0.012741 0.99147	0.030697 3.631e-006 0.9771	0.0063855 0.0065756 0.99403

Potencia j

numero de neuronas por capa	V3 carga no lineal nodo 3	V4 carga no lineal nodo 3	V5 carga no lineal nodo 3	V3 carga no lineal nodo 4	V4 carga no lineal nodo 4	V5 carga no lineal nodo 4	V3 carga no lineal nodo 5	V4 carga no lineal nodo 5	V5 carga no lineal nodo 5
30-50-1e-3	0.97143 0.053304 0.00035266	0.93689 0.018636 0.016325	0.93788 0.0028224 0.018742	0.023463 0.9411 0.019016	0.043718 0.98409 1.7592e-005	0.051818 0.97973 0.0060413	8.2161e-007 0.042515 0.98615	0.073492 1.3529e-005 0.97155	0.029542 0.0069681 0.98697
30-50-1e-4	0.98898 0.017201 3.8724e-005	0.98311 0.011375 0.0083375	0.98543 0.0055722 0.012078	0.0081701 0.98411 0.0084086	0.012139 0.96946 6.6182e-006	0.0100113 0.8856 0.010322	2.6312e-008 0.011533 0.99195	0.01835 2.3389e-006 0.98564	0.0073087 0.0073999 0.99216

Potencia h

numero de neuronas por capa	V3 carga no lineal nodo 3	V4 carga no lineal nodo 3	V5 carga no lineal nodo 3	V3 carga no lineal nodo 4	V4 carga no lineal nodo 4	V5 carga no lineal nodo 4	V3 carga no lineal nodo 5	V4 carga no lineal nodo 5	V5 carga no lineal nodo 5
30-50-1e-3	0.99265 0.018463 0.00017001	0.93304 0.035739 0.0086821	0.97164 0.015279 0.0005716	0.061562 0.89936 0.010902	0.032844 0.98945 1.212e-005	0.12014 0.98557 0.00079875	6.2949e-007 0.03382 0.98914	0.012871 2.9897e-006 0.99469	0.063424 0.014037 0.99436
30-50-1e-4	0.99833 0.0029912 1.3095e-005	0.98392 0.026032 0.0037347	0.99407 0.040048 0.00061265	0.048317 0.94679 0.002746	0.0097163 0.9925 4.8601e-006	0.048106 0.99385 0.00086503	1.9959e-008 0.0078589 0.99353	0.0032335 5.7751e-007 0.99685	0.022463 0.013941 0.9504

Tabla 4. 3 Salidas de las redes neuronales para potencias “I”, “j” y “h”

Potencia e

numero de neuronas por capa	V3 carga no lineal nodo 3	V4 carga no lineal nodo 3	V5 carga no lineal nodo 3	V3 carga no lineal nodo 4	V4 carga no lineal nodo 4	V5 carga no lineal nodo 4	V3 carga no lineal nodo 5	V4 carga no lineal nodo 5	V5 carga no lineal nodo 5
20-30-1e-3	0.99849 0.0079694 1.4704e-005	0.8882 0.10637 0.004506	0.99802 0.037173 3.052e-005	0.41845 0.58967 0.0016252	0.026625 0.98846 1.9325e-005	0.2886 0.83908 0.0014105	1.5499e-005 0.027057 0.98123	0.0076381 5.9503e-005 0.99534	0.012403 0.28724 0.24634
40-60-1e-2	0.99061 0.049643 0.00018497	0.86141 0.15941 0.001397	0.98194 0.6572 0.00037001	0.43479 0.524 0.003439	0.013973 0.98824 1.1442e-006	0.40671 0.97652 0.00031287	1.7004e-006 0.074182 0.98951	0.0049435 2.8826e-006 0.99701	0.17078 0.056308 0.49212
30-50-1e-2	0.99496 0.054481 9.1527e-005	0.90516 0.12088 0.0023418	0.98991 0.10701 0.00050353	0.36276 0.56845 0.0036478	0.022335 0.99447 4.3321e-006	0.54098 0.96046 0.0017281	1.5142e-006 0.082776 0.99245	0.0052329 2.54e-006 0.99813	0.039853 0.084209 0.36645
30-50-1e-3	0.99706 0.0092761 0.00010503	0.90834 0.091939 0.0034846	0.94093 0.10813 0.00021188	0.2184 0.76247 0.0049083	0.022982 0.99344 7.9533e-006	0.18968 0.98444 0.00029689	6.6527e-007 0.035819 0.98857	0.006937 1.8273e-006 0.99701	0.14777 0.029681 0.66153
30-50-1e-4	0.99951 0.0010165 6.5468e-006	0.97322 0.08032 0.0013207	0.99232 0.1079 0.00026991	0.37317 0.68389 0.00062807	0.0078693 0.99445 3.7167e-006	0.1154 0.99447 0.00028594	2.0964e-008 0.008132 0.99341	0.0018148 3.7898e-007 0.99802	0.1099 0.031395 0.59162
40-60-1e-4	0.99931 0.0016421 5.0614e-006	0.96772 0.070509 0.0012227	0.98378 0.19742 0.00025706	0.30948 0.73813 0.00063675	0.0064561 0.99739 5.9717e-006	0.15495 0.99064 0.0003805	1.643e-007 0.0087887 0.99257	0.0019831 3.5814e-008 0.99859	0.13369 0.047053 0.29588
10-3-1e-4	0.99466 0.012275 0.00011435	0.78225 0.22644 0.0033072	0.98679 0.0049186 3.0643e-005	0.44491 0.5343 0.00074662	0.0094973 0.99206 0.00035077	0.98557 0.005444 3.2558e-005	0.0001687 0.01465 0.99841	0.0073208 2.0124e-006 0.9921	0.0014226 0.91288 0.21928

Potencia d

numero de neuronas por capa	V3 carga no lineal nodo 3	V4 carga no lineal nodo 3	V5 carga no lineal nodo 3	V3 carga no lineal nodo 4	V4 carga no lineal nodo 4	V5 carga no lineal nodo 4	V3 carga no lineal nodo 5	V4 carga no lineal nodo 5	V5 carga no lineal nodo 5
30-50-1e-3	0.99828 0.0063648 7.9722e-005	0.8806 0.16233 0.0019261	0.90649 0.24762 0.00015973	0.45907 0.57759 0.0026855	0.020011 0.99468 6.5606e-006	0.21072 0.98475 0.00021479	6.98e-007 0.037411 0.9881	0.0059497 1.6014e-006 0.99743	0.24373 0.036157 0.39879
30-50-1e-4	0.99976 0.00059969 4.3658e-006	0.95673 0.16231 0.00066658	0.98987 0.18235 0.00019607	0.80837 0.25642 0.00019692	0.0076701 0.99507 3.294e-006	0.13725 0.9953 0.00019904	2.2143e-008 0.0086425 0.99317	0.0016678 3.45e-007 0.99819	0.30286 0.040129 0.2359

Tabla 4. 4 Salidas de las redes neuronales para potencias “e” y “d”

Potencia c

numero de neuronas por capa	V3 carga no lineal nodo 3	V4 carga no lineal nodo 3	V5 carga no lineal nodo 3	V3 carga no lineal nodo 4	V4 carga no lineal nodo 4	V5 carga no lineal nodo 4	V3 carga no lineal nodo 5	V4 carga no lineal nodo 5	V5 carga no lineal nodo 5
30-50-1-e-3	0.99837 0.0061884 7.78e-005	0.88068 0.16828 0.0018428	0.89215 0.30816 0.0001479	0.5073 0.54208 0.002427	0.01908 0.99504 6.1549e-006	0.19707 0.96672 0.00020975	7.0972e-007 0.037946 0.98794	0.0059493 1.6015e-006 0.99744	0.26924 0.040946 0.32484
30-50-1e-4	0.99979 0.00051064 4.0807e-006	0.95791 0.16963 0.00062837	0.98865 0.21821 0.00017725	0.87187 0.179 0.00014795	0.0076582 0.99524 3.1719e-006	0.12133 0.9961 0.00019306	2.265e-008 0.0088793 0.99306	0.0017381 3.4758e-007 0.99816	0.37215 0.044567 0.167718

Tabla 4. 5 Salidas de las redes neuronales para la potencia “c”

La información presentada a continuación corresponde a las formas en que el espectro armónico en un nodo del sistema eléctrico va distorsionándose, con respecto a los cambios de carga en los nodos del mismo.

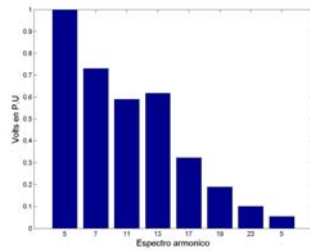


Figura 4. 1 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia C

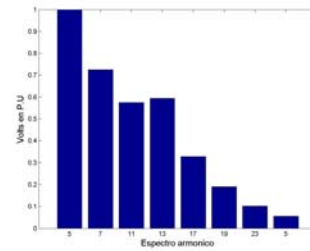


Figura 4. 2 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia D

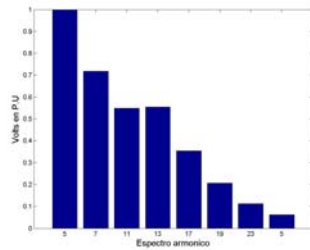


Figura 4.3 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia E

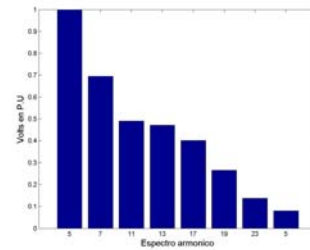


Figura 4.4 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia J

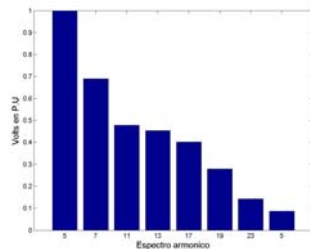


Figura 4.5 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia I

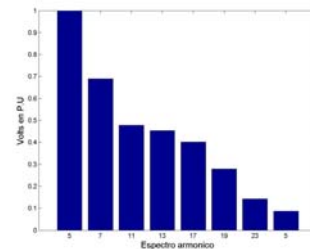


Figura 4.6 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia P

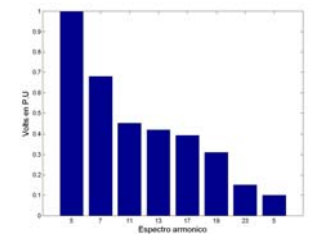


Figura 4.7 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia Q

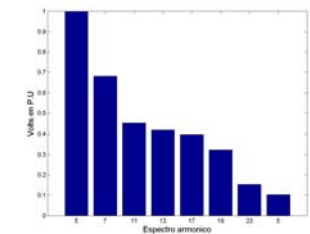


Figura 4.8 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia R

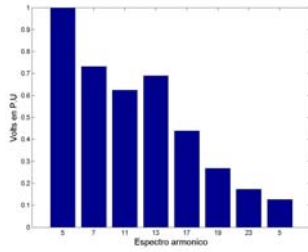


Figura 4. 9 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia C

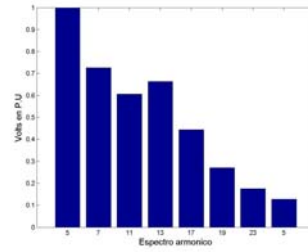


Figura 4. 10 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia D

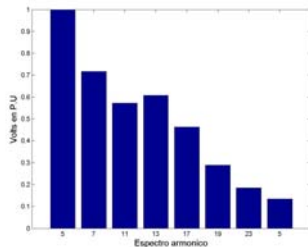


Figura 4. 11 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia E

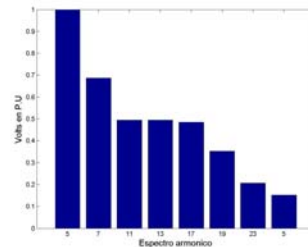


Figura 4. 12 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia J

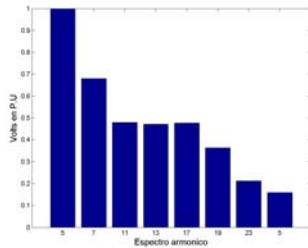


Figura 4. 13 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia I

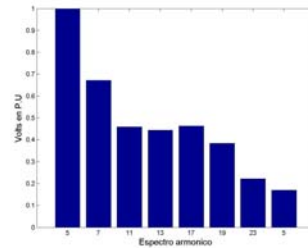


Figura 4. 14 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia P

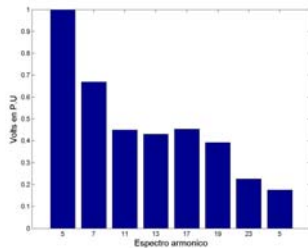


Figura 4. 15 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia Q

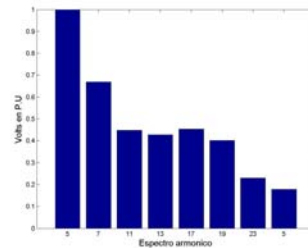


Figura 4. 16 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia R

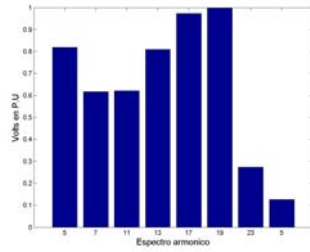


Figura 4. 17 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia C

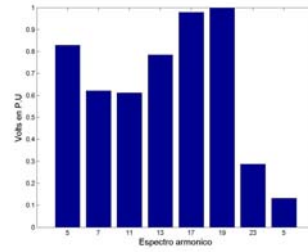


Figura 4. 18 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia D

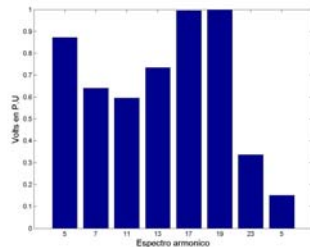


Figura 4. 19 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia E

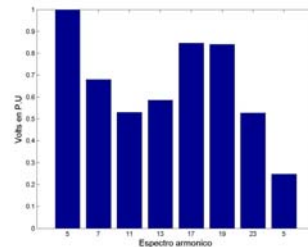


Figura 4. 20 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia J

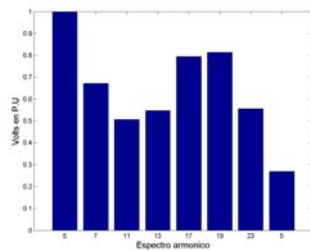


Figura 4. 21 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia I

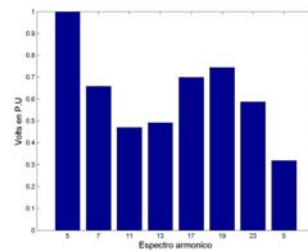


Figura 4. 22 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia P

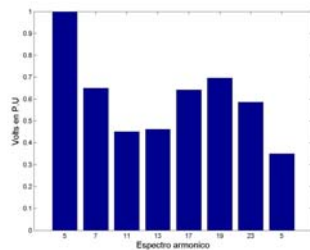


Figura 4. 23 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia Q

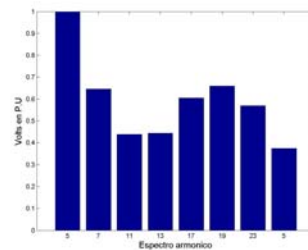


Figura 4. 24 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 3 y potencia R

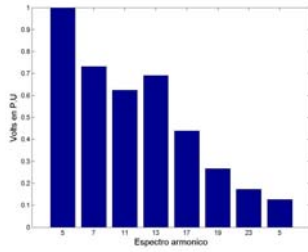


Figura 4. 25 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia C

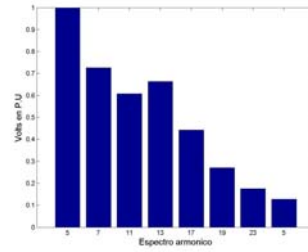


Figura 4. 26 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia D

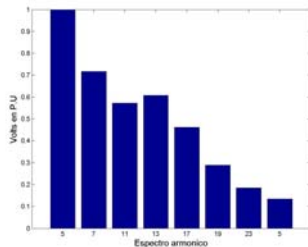


Figura 4. 27 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia E

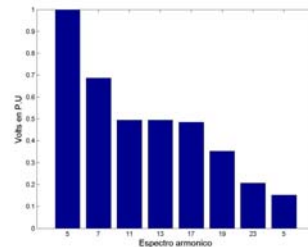


Figura 4. 28 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia J

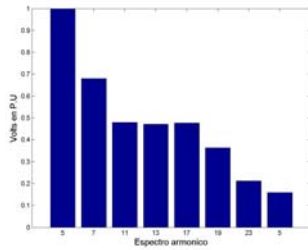


Figura 4. 29 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia I

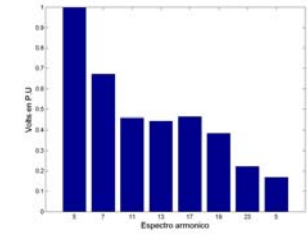


Figura 4. 30 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia P

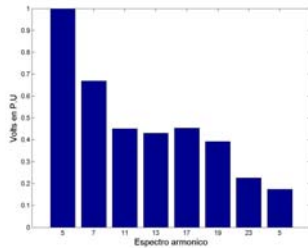


Figura 4. 31 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia Q

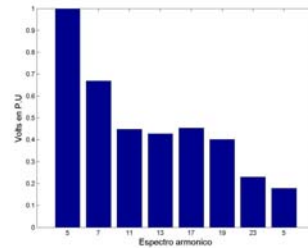


Figura 4. 32 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia R

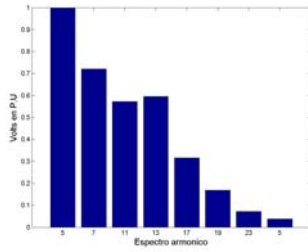


Figura 4. 33 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia C

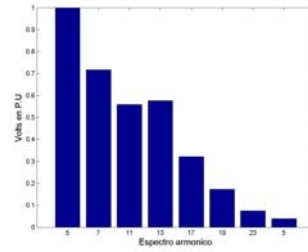


Figura 4. 34 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia D

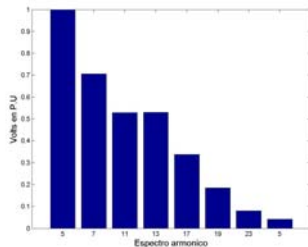


Figura 4. 35 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia E

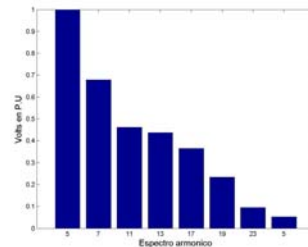


Figura 4. 36 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia J

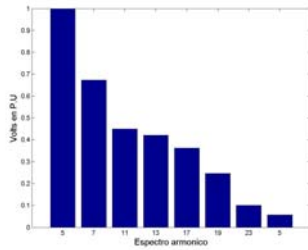


Figura 4. 37 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia I

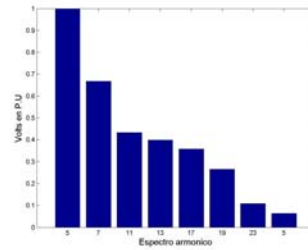


Figura 4. 38 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia P

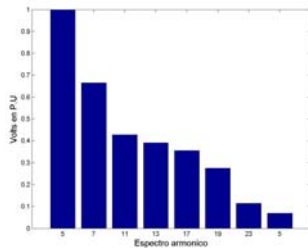


Figura 4. 39 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia Q

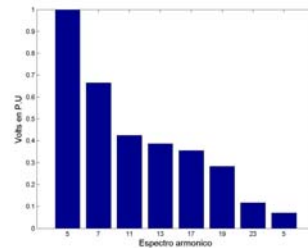


Figura 4. 40 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia R

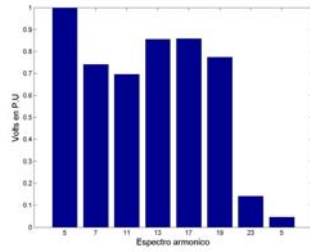


Figura 4. 41 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia C

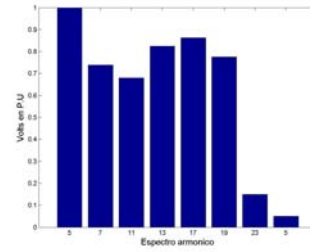


Figura 4. 42 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia D

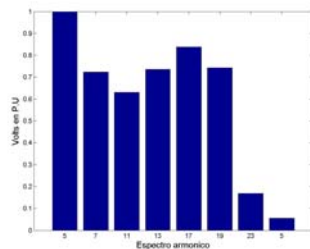


Figura 4. 43 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia E

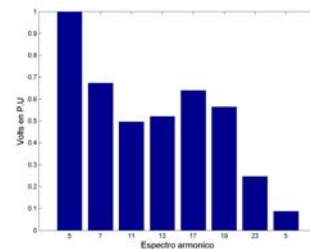


Figura 4. 44 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia J

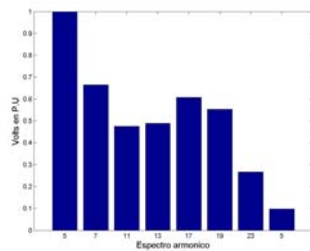


Figura 4. 45 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia I

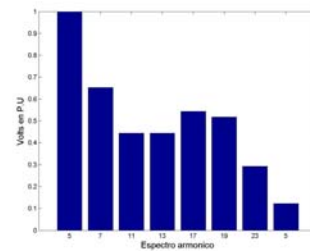


Figura 4. 46 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia P

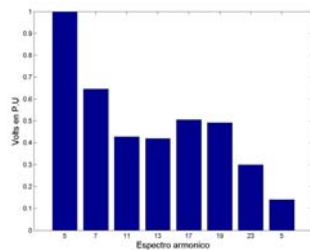


Figura 4. 47 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia Q

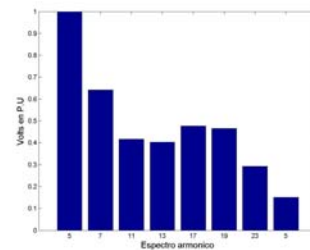


Figura 4. 48 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 4 y potencia R

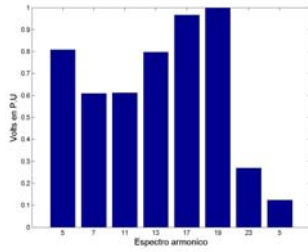


Figura 4. 49 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia C

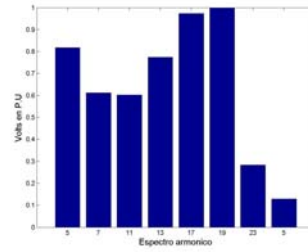


Figura 4. 50 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia D

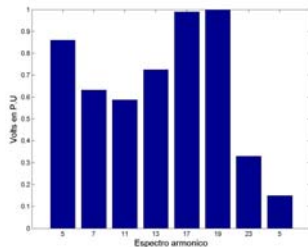


Figura 4. 51 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia E

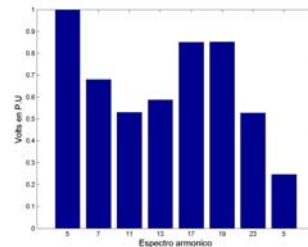


Figura 4. 52 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia J

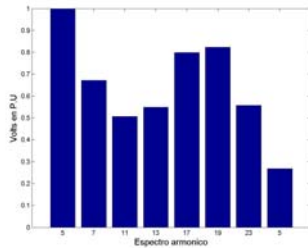


Figura 4. 53 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia I

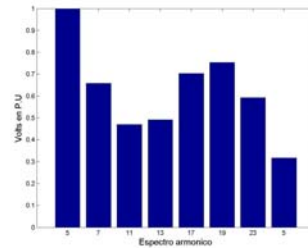


Figura 4. 54 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia P

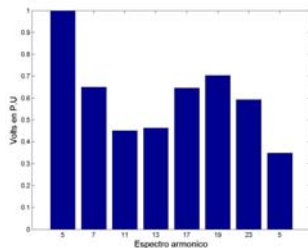


Figura 4. 55 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia Q

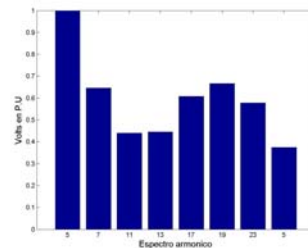


Figura 4. 56 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 3, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia R

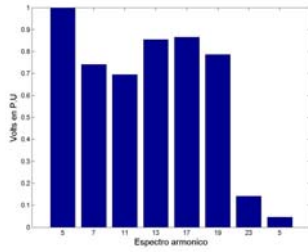


Figura 4. 57 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia C

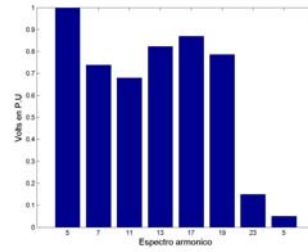


Figura 4. 58 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia D

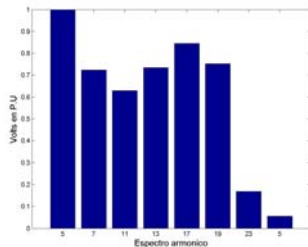


Figura 4. 59 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia E

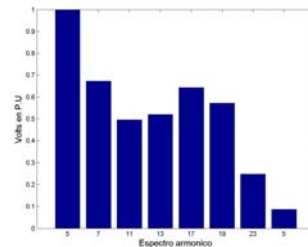


Figura 4. 60 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia J

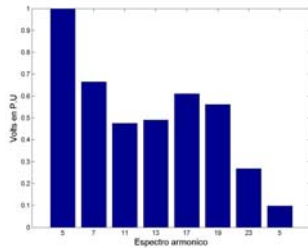


Figura 4. 61 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia I

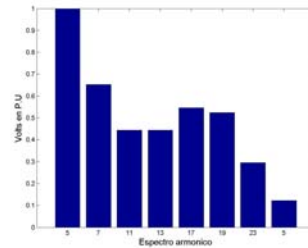


Figura 4. 62 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia P

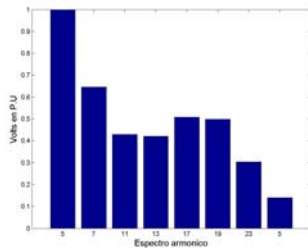


Figura 4. 63 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia Q

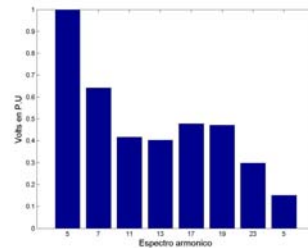


Figura 4. 64 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 4, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia R

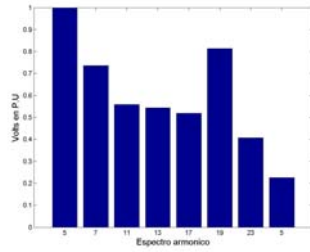


Figura 4. 65 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia C

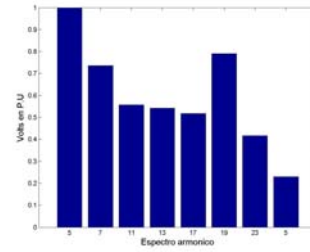


Figura 4. 66 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia D

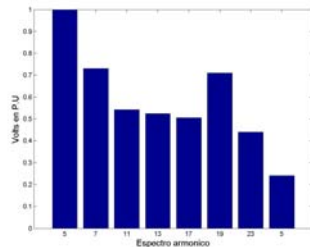


Figura 4. 67 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia E

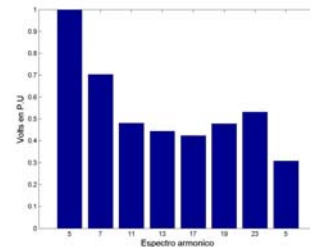


Figura 4. 68 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia J

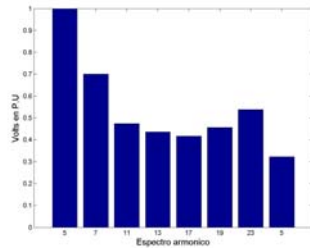


Figura 4. 69 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia I

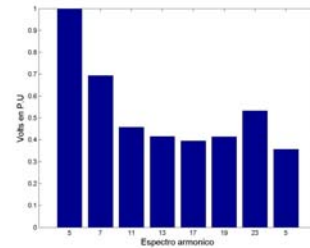


Figura 4. 70 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia P

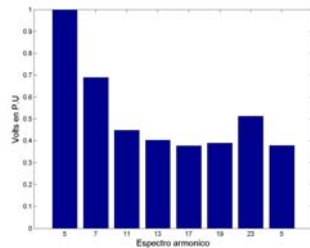


Figura 4. 71 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia Q

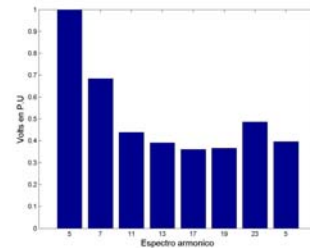


Figura 4. 72 Voltaje armónico Vs. Espectro armónico en nodo 5, con carga no lineal conectada en nodo 5 y potencia R

Como aplicación adicional a éste técnica de determinación de la ubicación de fuentes armónicas, es la de que con respecto a las salidas más estables podría tomarse la



decisión del nodo que presenta menor distorsión del espectro armónico, para distintas condiciones de operación del sistema, y así tomando ésta característica realizar las mediciones en ese punto.

4.2 Pruebas de detección de nodos utilizando el método de variación monoparamétrica

En el capítulo 3 se presentó el método de variación monoparamétrica, con modificaciones hechas a partir de una serie de necesidades planteadas en el capítulo anteriormente mencionado, a partir del método original. Una vez planteado los principios de funcionamiento del mismo, es necesario realizar diversas pruebas para observar la respuesta a distintos escenarios de operación de una y dos fuentes de contaminación de armónicos.

En éste apartado de pruebas, aparecen de forma inicial los archivos generados en las simulaciones de penetración de armónicos, originados con el programa presentado en el capítulo 2, y anexo a ésta lista de archivos la estructura del nombramiento de los mismos.

Posteriormente se indica en formato tipo tabla, el número de prueba y su respectivo contenido, esto con el fin de tener un claro panorama de los elementos involucrados en las pruebas.

De manera final se presentan los resultados obtenidos de manera consecutiva, y hasta el final de los mismos se incluyen las conclusiones.

4.2.1 Información involucrada en la generación de las pruebas

La información requerida para realizar las pruebas es obtenida de los estudios de penetración de armónicos (capítulo 2). En ésta sección se indican los archivos necesitados en la realización de las pruebas. Cada archivo porta la información del sistema eléctrico (archivo de datos en Matlab) para una condición específica de una o dos fuentes no lineales conectadas al sistema.

Archivos generados en el programa de simulación de armónicos (RUNARMO):

Una fuente no lineal en el sistema.

Formato del nombramiento de los archivos de datos armónicos:

Texto inicial: datos.

Primer número: nodo al cual se conecta una carga no lineal.

Segundo número: capacidad de la carga conectada en MVars.

Tabla 4. 6 Archivos generados para pruebas con una fuente armónica

datos31	datos41	datos51
datos32	datos42	datos52
datos33	datos43	datos53
datos310	datos410	datos510
datos320	datos420	datos520
datos330	datos430	datos530

Dos fuentes no lineales en el sistema:

Formato del nombramiento de los archivos de datos armónicos:

Texto inicial: datos.

Primer número: nodo fijo.

Segundo número: nodo variable.

Tercer número: capacidad de la carga conectada en MVars.

Tabla 4. 7 Archivos generados para pruebas con dos fuentes armónicas

datos341	datos351	datos451
datos342	datos352	datos452
datos343	datos353	datos453
datos431	datos531	datos541
datos432	datos532	datos542
datos433	datos533	datos543
datos3410	datos3510	datos4510
datos3420	datos3520	datos4520
datos3430	datos3530	datos4530
datos4310	datos5310	datos5410
datos4320	datos5320	datos5420
datos4330	datos5330	datos5430

4.2.2 Pruebas aplicadas al algoritmo de detección de nodos con presencia de cargas armónicas

Con el objetivo de demostrar, la capacidad de operación del algoritmo propuesto de detección de nodos con cargas armónicas en un sistema eléctrico de potencia, basado en el “**método de variación monoparamétrica**”, se presentan una serie de casos. La variación en estos casos corresponde a la inserción de carga(s) en nodos distintos de la red eléctrica, y variando la inyección de corriente armónica, mediante la variación de la capacidad reactiva de la carga que es la causante de contaminar al sistema. Los casos de prueba se presentan en la Tabla 4. 8.

Tabla 4. 8 Pruebas en el algoritmo de método de variación monoparamétrica

No. De Prueba	Nodo(s) contaminante(s)	Archivos	Descripción
1	3	datos31 datos32 datos33	Carga no lineal en nodo 3 con variaciones de potencia de 1 MVar, en el rango de 1-3 MVars
2	4	datos41 datos42 datos43	Carga no lineal en nodo 4 con variaciones de potencia de 1 MVar, en el rango de 1-3 MVars
3	5	datos51 datos52 datos53	Carga no lineal en nodo 5 con variaciones de potencia de 1 MVar, en el rango de 1-3 MVars
4	3 y 4	datos341 datos342 datos343	Carga no lineal en nodo 3 y 4 con variaciones de potencia de 1 MVar en el nodo 4 en el rango de 1-3 MVars y potencia fija de 3 MVars en el nodo 3.
5	4 y 5	datos451 datos452 datos453	Carga no lineal en nodo 4 y 5 con variaciones de potencia de 1 MVar en el nodo 5 en el rango de 1-3 MVars y potencia fija de 3 MVars en el nodo 4.
6	3 y 5	datos351 datos352 datos353	Carga no lineal en nodo 3 y y con variaciones de potencia de 1 MVar en el nodo 5 en el rango de 1-3 MVars y potencia fija de 3 MVars en el nodo 3.
7	3 y 4	datos4310 datos4320 datos4330	Carga no lineal en nodo 3 y 4 con variaciones de potencia de 10 MVars en el nodo 3 en el rango de 10-30 MVars y potencia fija de 30 MVars en el nodo 4.
8	4 y 5	datos5410 datos5420 datos5430	Carga no lineal en nodo 4 y 5 con variaciones de potencia de 10 MVars en el nodo 4 en el rango de 10-30 MVars y potencia fija de 30 MVars en el nodo 5.
9	3 y 5	datos5310 datos5320 datos5330	Carga no lineal en nodo 3 y 5 con variaciones de potencia de 10 MVars en el nodo 3 en el rango de 10-30 MVars y potencia fija de 30 MVars en el nodo 5.

4.2.3 Resultado de las pruebas de detección de nodos con carga armónica mediante el método de variación monoparamétrica

A continuación se presentan los resultados obtenidos de las pruebas propuestas en la Tabla 4. 8.



4.2.3.1 Resultados de la prueba 1 (nodo 3 con carga armónica)

>> discriminador2

introduce caso 1(1 fuente armonica)o 2(2 o mas fuentes armonicas)= 1

nfuentes =

1

introduce el numero de nodos de analisis= 3

nnodos =

3

introduce la numeracion inicial de nodos= 3

nodoinic =

3

Valores medidos

medI1 =

0.5102	0.8996	0.5884
0.5062	0.8991	0.5883
0.5023	0.8987	0.5882

medI5 =

1.0e-003 *

0.2816	0.0832	0.0160
0.5630	0.1662	0.0321
0.8441	0.2489	0.0480

medV5 =

1.0e-003 *

0.0927	0.0758	0.0263
0.1854	0.1515	0.0526
0.2780	0.2271	0.0789

Valores escalados

medescI1 =

1.0000	1.0000	1.0000
0.9922	0.9995	0.9998

medescI5 =

0.3337	0.3343	0.3338
0.6670	0.6676	0.6671

medescV5 =

0.3336	0.3336	0.3335
0.6669	0.6669	0.6669

Desea guardar las imagenes? S/Nn

analisis mediante graficas I5 Vs. I1

Deducción de I5 Vs. I1
3 es un nodo activo
4 es un nodo pasivo
5 es un nodo pasivo

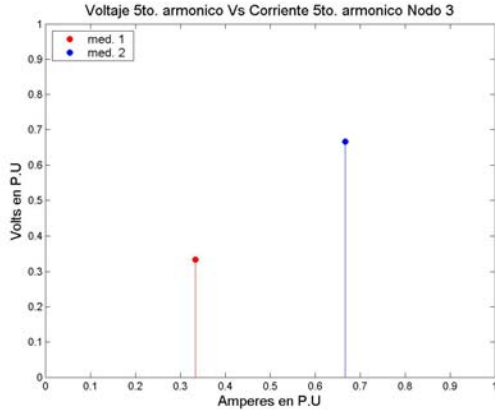


Figura 4. 73 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3

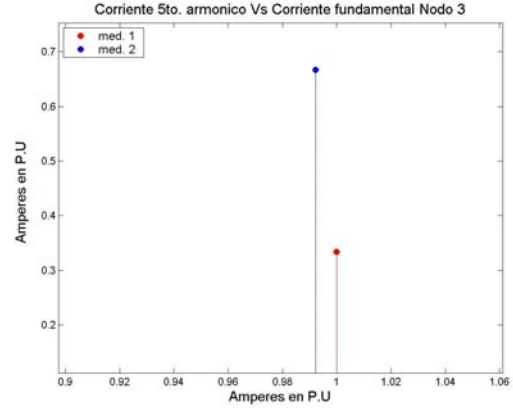


Figura 4. 74 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3

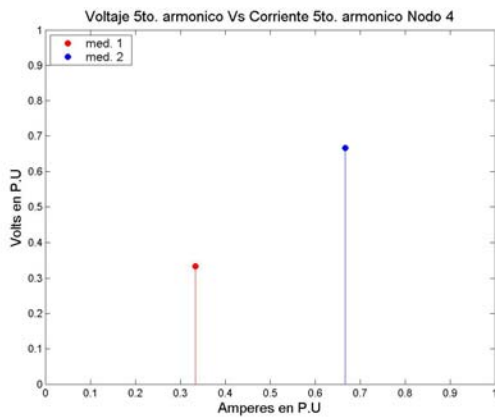


Figura 4. 75 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4

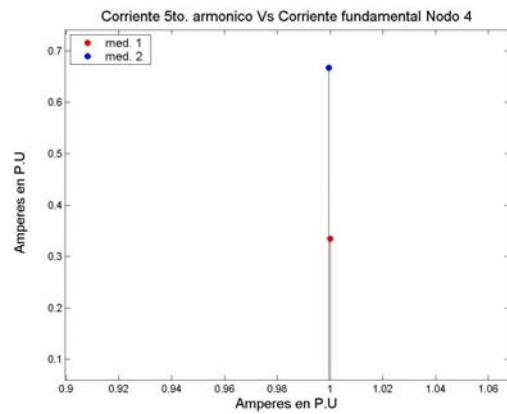


Figura 4. 76 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4

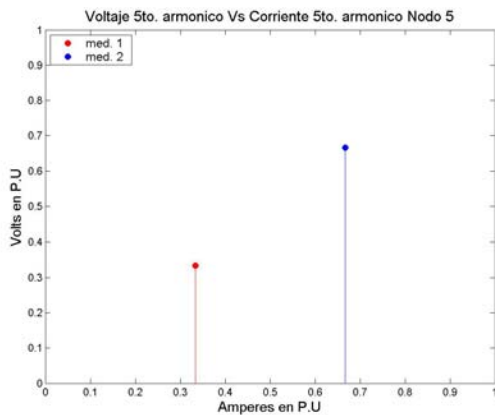


Figura 4. 77 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5

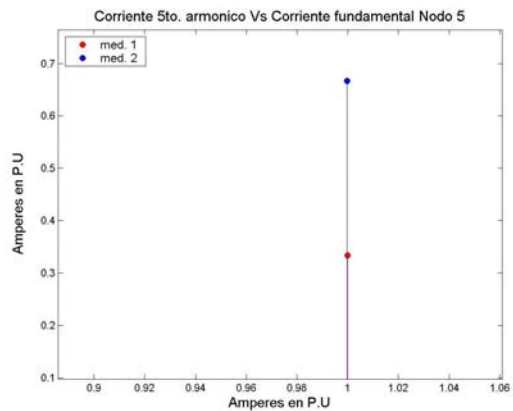


Figura 4. 78 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5



4.2.3.2 Resultados de la prueba 2 (nodo 4 con carga armónica)

>> discriminador2

introduce caso 1(1 fuente armonica)o 2(2 o mas fuentes armonicas)= 1

nfuentes =

1

introduce el numero de nodos de analisis= 3

nnodos =

3

introduce la numeracion inicial de nodos= 3

nodoinic =

3

Valores medidos

medI1 =

0.5140	0.8962	0.5884
0.5138	0.8924	0.5882
0.5135	0.8887	0.5881

medI5 =

1.0e-003 *

0.0433	0.2685	0.0203
0.0866	0.5368	0.0405
0.1297	0.8049	0.0607

medV5 =

1.0e-003 *

0.0764	0.0962	0.0333
0.1528	0.1923	0.0665
0.2291	0.2884	0.0998

Valores escalados

medescl1 =

1.0000	1.0000	1.0000
0.9995	0.9958	0.9998

medescl5 =

0.3342	0.3336	0.3338
0.6676	0.6669	0.6672

medescV5 =

0.3336	0.3336	0.3335
0.6669	0.6669	0.6669

Desea guardar las imagenes? S/Ns
 analisis mediante graficas I5 Vs. I1

Deducción de I5 Vs. I1
3 es un nodo pasivo
4 es un nodo activo
5 es un nodo pasivo

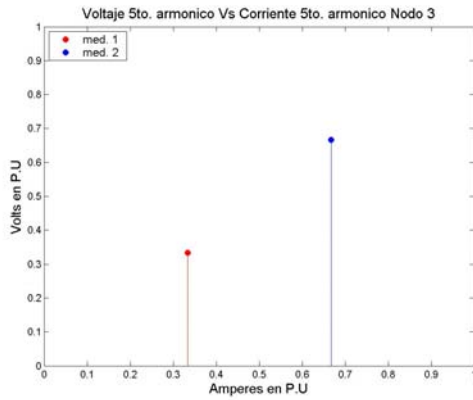


Figura 4. 79 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3

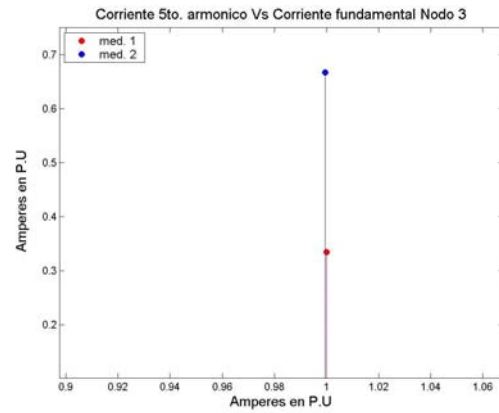


Figura 4. 80 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3

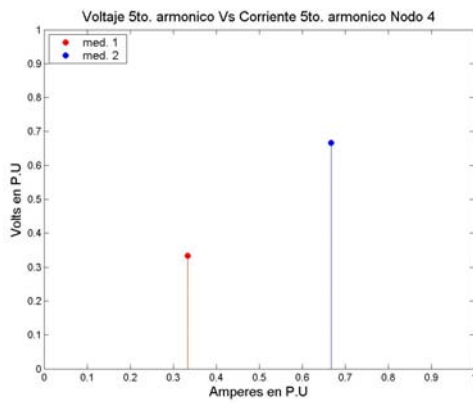


Figura 4. 81 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4

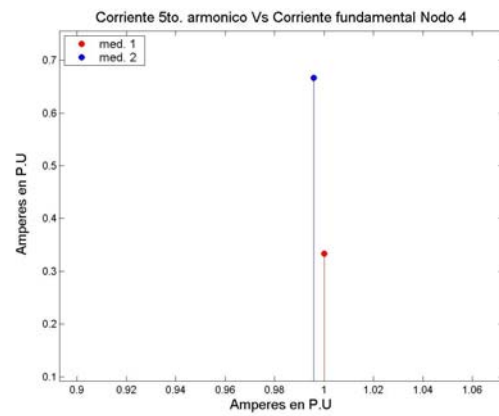


Figura 4. 82 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4

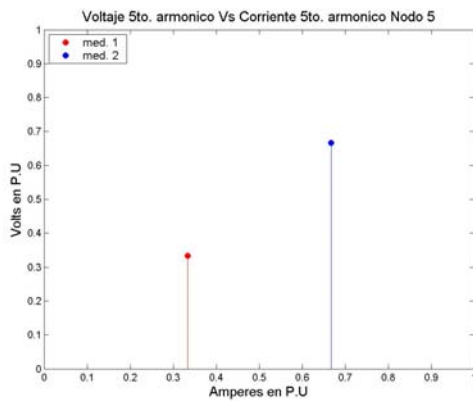


Figura 4. 83 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5

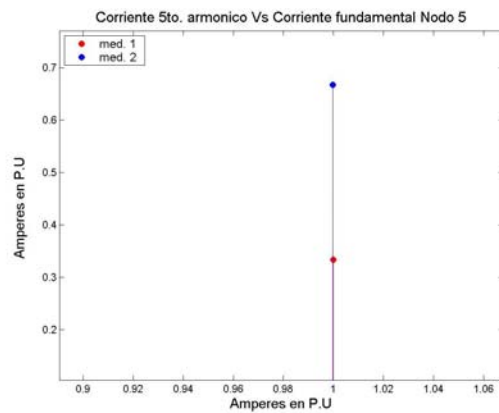


Figura 4. 84 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5



4.2.3.3 Resultados de la prueba 3 (nodo 5 con carga armónica)

>> discriminador2

introduce caso 1(1 fuente armonica)o 2(2 o mas fuentes armonicas)= 1

nfuentes =

1

introduce el numero de nodos de analisis= 3

nnodos =

3

introduce la numeracion inicial de nodos= 3

nodoinic =

3

Valores medidos

medI1 =

0.5142	0.8999	0.5838
0.5141	0.8997	0.5792
0.5140	0.8995	0.5747

medI5 =

1.0e-003 *

0.0151	0.0365	0.2802
0.0301	0.0730	0.5599
0.0451	0.1094	0.8393

medV5 =

1.0e-003 *

0.0265	0.0332	0.1338
0.0530	0.0665	0.2674
0.0795	0.0996	0.4008

Valores escalados

medescI1 =

1.0000	1.0000	1.0000
0.9998	0.9998	0.9921

medescI5 =

0.3340	0.3340	0.3338
0.6673	0.6674	0.6671

medescV5 =

0.3337	0.3337	0.3338
0.6671	0.6671	0.6671

Desea guardar las imagenes? S/Ns
 analisis mediante graficas I5 Vs. I1

Deducción de I5 Vs. I1
3 es un nodo pasivo
4 es un nodo pasivo
5 es un nodo activo

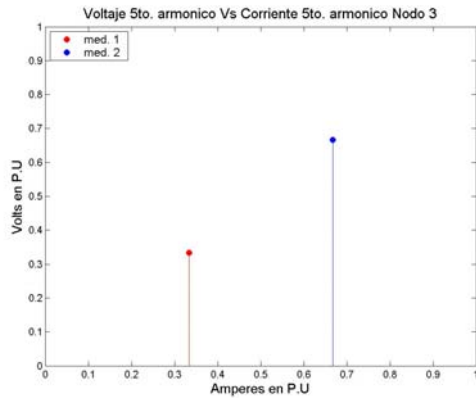


Figura 4. 85 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3

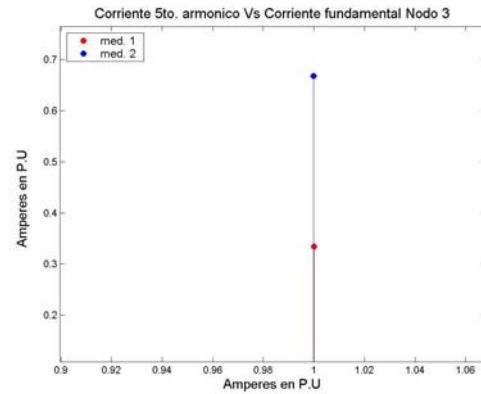


Figura 4. 86 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3

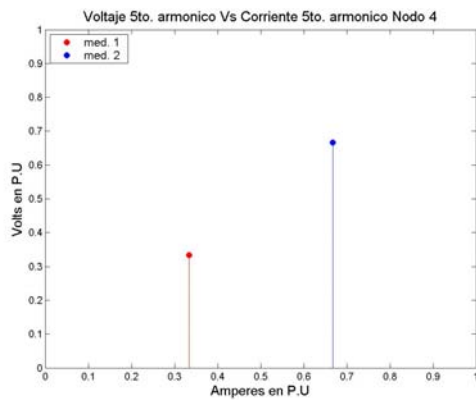


Figura 4. 87 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4

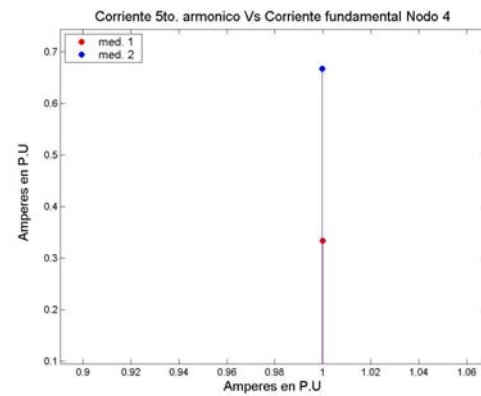


Figura 4. 88 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4

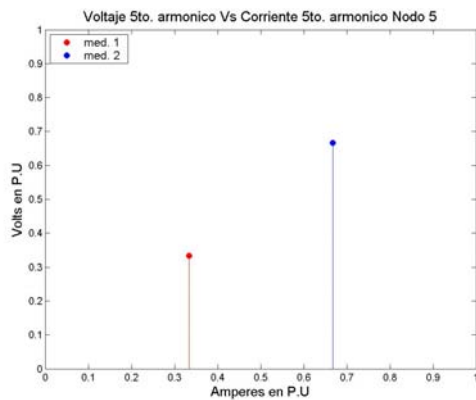


Figura 4. 89 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5

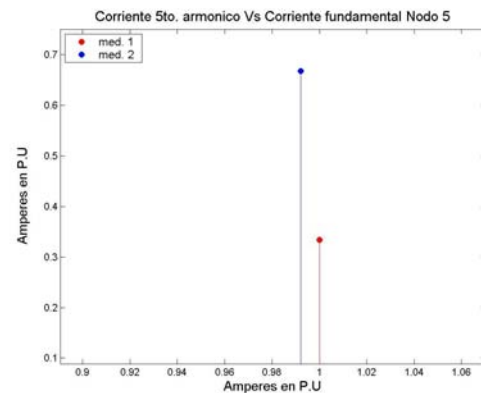


Figura 4. 90 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5



4.2.3.4 Resultados de la prueba 4 (nodo 3 y 4 con carga armónica, con variación en nodo 4)

>> discriminador2

introduce caso 1(1 fuente armonica)o 2(2 o mas fuentes armonicas)= 2

nfuentes =

2

introduce el numero de nodos de analisis= 3

nnodos =

3

introduce la numeracion inicial de nodos= 3

nodoinic =

3

Valores medidos

medl1 =

0.5021	0.8948	0.5881
0.5018	0.8910	0.5879
0.5015	0.8873	0.5878

medl5 =

1.0e-003 *

0.8232	0.3169	0.0682
0.8042	0.5317	0.0884
0.7872	0.7801	0.1085

medV5 =

1.0e-003 *

0.3535	0.3231	0.1121
0.4293	0.4191	0.1453
0.5052	0.5150	0.1785

Valores escalados

medesc1 =

1.0000	1.0000	1.0000
0.9995	0.9957	0.9998

medesc15 =

1.0000	0.4062	0.6286
0.9769	0.6816	0.8144

medescV5 =

0.6998	0.6274	0.6281
0.8498	0.8138	0.8141

Desea guardar las imagenes? S/Ns

análisis mediante gráficas V5 Vs. I5
3 es un nodo activo
4 es un nodo activo
5 es un nodo pasivo

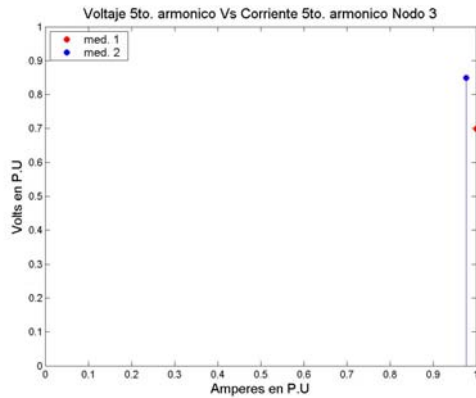


Figura 4. 91 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3

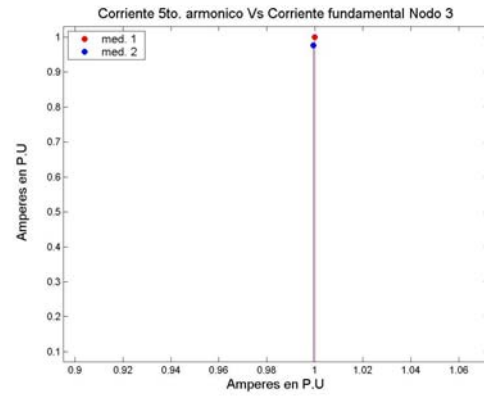


Figura 4. 92 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3

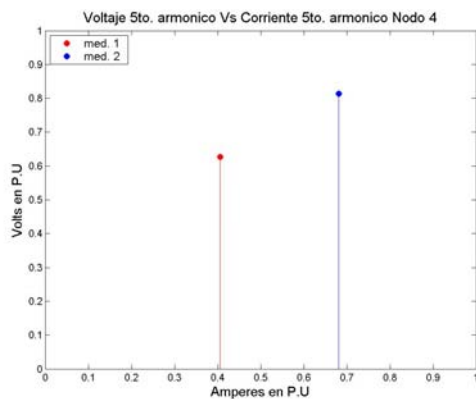


Figura 4. 93 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4

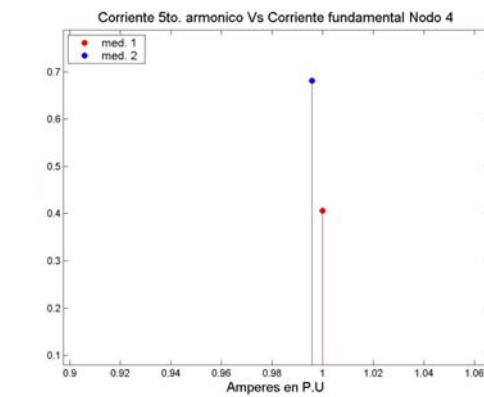


Figura 4. 94 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4

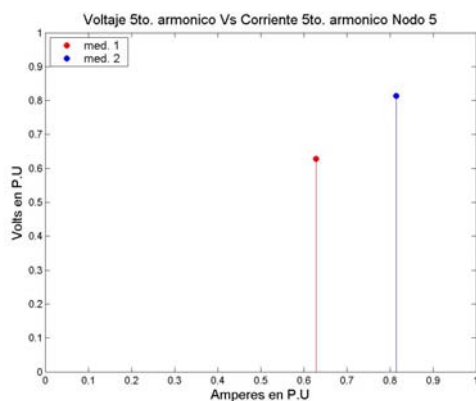


Figura 4. 95 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5

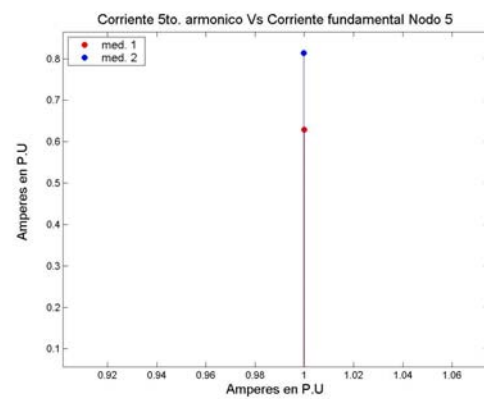


Figura 4. 96 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5



4.2.3.5 Resultados de la prueba 5 (nodo 4 y 5 con carga armónica, con variación en nodo 5)

>> discriminador2

introduce caso 1(1 fuente armonica)o 2(2 o mas fuentes armonicas)= 2

nfuentes =

2

introduce el numero de nodos de analisis= 3

nnodos =

3

introduce la numeracion inicial de nodos= 3

nodoinic =

3

Valores medidos

medl1 =

0.51343	0.88847	0.58338
0.51334	0.88826	0.57878
0.51324	0.88805	0.5743

medl5 =

0.00014422	0.00079	0.00024785
0.00015883	0.00077662	0.00052505
0.00017347	0.00076477	0.00080361

medV5 =

0.00025494	0.00032073	0.00022757
0.00028087	0.00035321	0.00035954
0.00030687	0.00038578	0.00049218

Valores escalados

medesc1 =

1	1	1
0.99982	0.99977	0.99211

medesc15 =

0.83137	1	0.30843
0.9156	0.98305	0.65337

medescV5 =

0.83078	0.83138	0.46237
0.91528	0.91558	0.73049

Desea guardar las imagenes? S/Ns

análisis mediante gráficas V5 Vs. I5
3 es un nodo pasivo
4 es un nodo activo
5 es un nodo activo

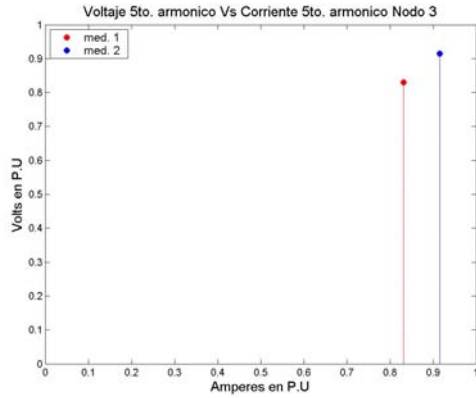


Figura 4. 97 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3

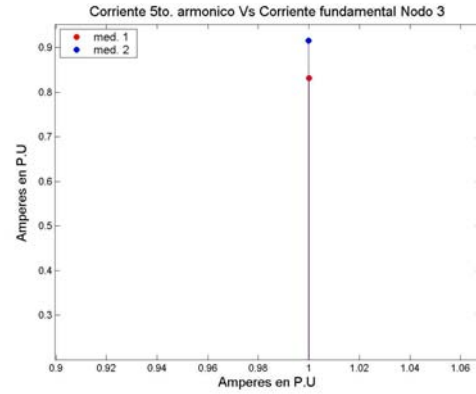


Figura 4. 98 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3

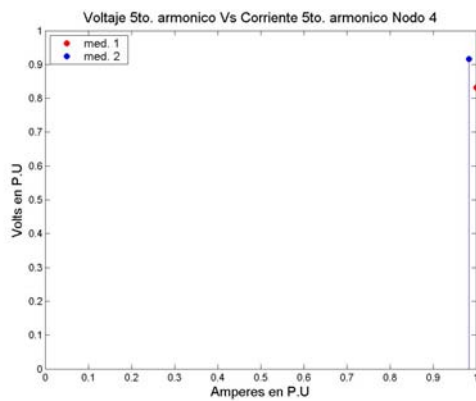


Figura 4. 99 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4

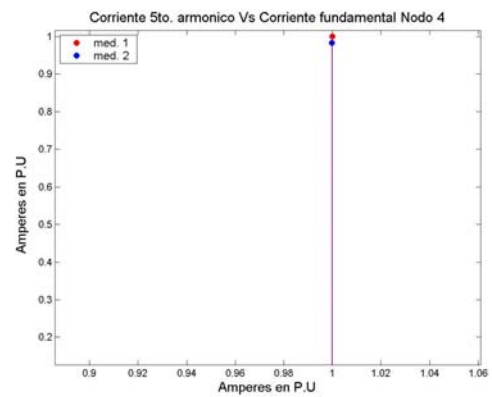


Figura 4. 100 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4

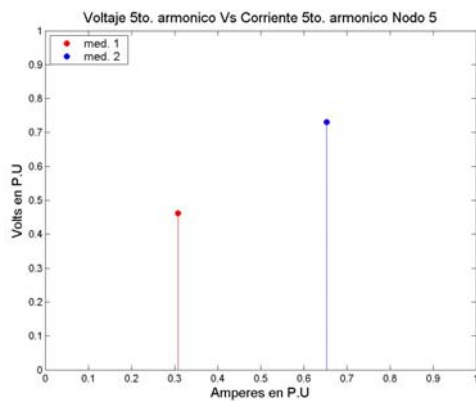


Figura 4. 101 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5

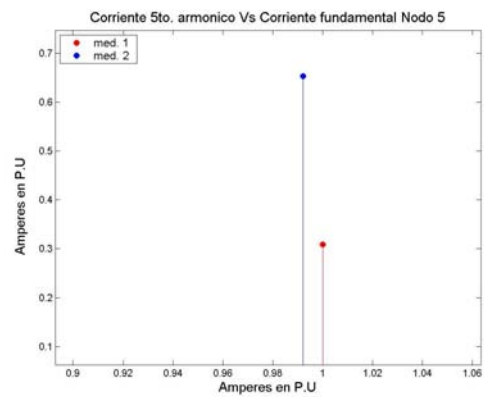


Figura 4. 102 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5



4.2.3.6 Resultados de la prueba 6 (nodo 3 y 5 con carga armónica, con variación en nodo 5)

>> discriminador2

introduce caso 1(1 fuente armonica)o 2(2 o mas fuentes armonicas)= 2

nfuentes =

2

introduce el numero de nodos de analisis= 3

nnodos =

3

introduce la numeracion inicial de nodos= 3

nodoinic =

3

Valores medidos

medl1 =

0.50223	0.89846	0.58347
0.50214	0.89825	0.57886
0.50204	0.89805	0.57438

medl5 =

0.0008337	0.00028471	0.00025143
0.00082349	0.00032054	0.00052976
0.00081345	0.00035637	0.00080866

medV5 =

0.0003026	0.00025989	0.00020618
0.0003275	0.00029272	0.00033831
0.0003526	0.0003256	0.00047107

Valores escalados

medesc1 =

1	1	1
0.99982	0.99977	0.99211

medesc15 =

1	0.79893	0.31092
0.98775	0.89945	0.6551

medescV5 =

0.85818	0.79819	0.43768
0.9288	0.89903	0.71816

Desea guardar las imagenes? S/NS

análisis mediante graficas V5 Vs. I5
3 es un nodo activo
4 es un nodo pasivo
5 es un nodo activo

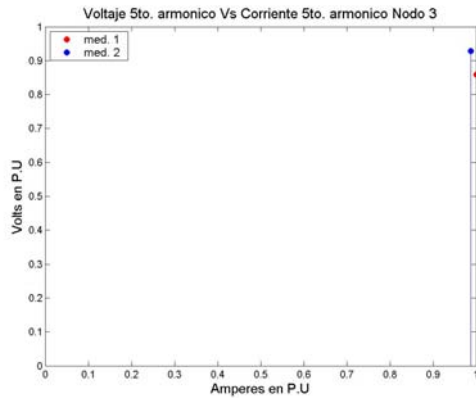


Figura 4. 103 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3

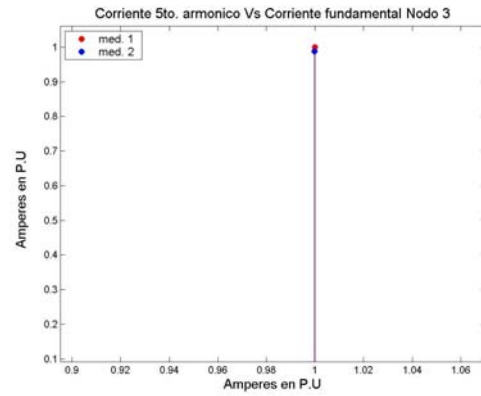


Figura 4. 104 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3

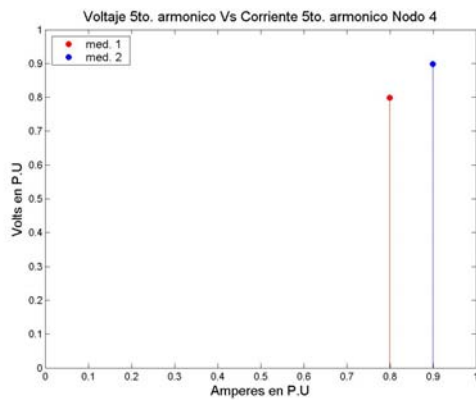


Figura 4. 105 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4

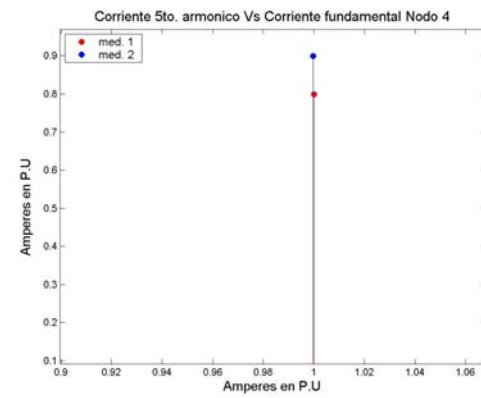


Figura 4. 106 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4

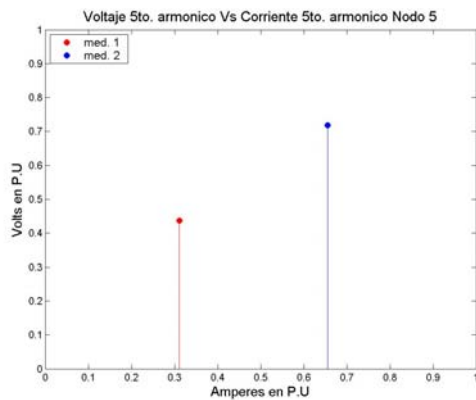


Figura 4. 107 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5

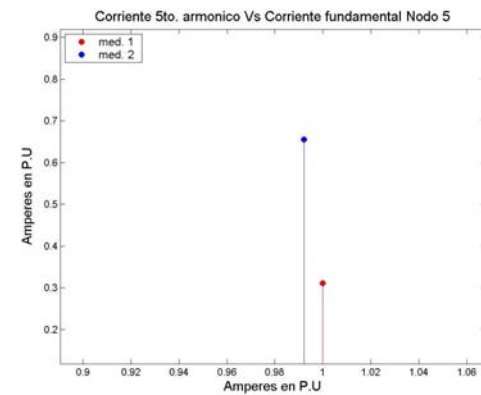


Figura 4. 108 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5



4.2.3.7 Resultados de la prueba 7 (nodo 4 y 3 con carga armónica, con variación en nodo 3)

>> discriminador2

introduce caso 1(1 fuente armonica)o 2(2 o mas fuentes armonicas)= 2

nfuentes =

2

introduce el numero de nodos de analisis= 3

nnodos =

3

introduce la numeracion inicial de nodos= 3

nodoinic =

3

Valores medidos

medl1 =

0.46926	0.82069	0.582
0.45443	0.81675	0.58091
0.46205	0.81284	0.57981

medl5 =

0.0024377	0.010376	0.00093748
0.0049316	0.010244	0.001086
0.0075728	0.01017	0.0012322

medV5 =

0.0039165	0.0045334	0.0015728
0.004813	0.0052666	0.0018288
0.0057037	0.0059942	0.002083

Valores escalados

medesc1 =

1	1	1
0.96841	0.9952	0.99812

medesc15 =

0.32191	1	0.76081
0.65122	0.9873	0.88131

medescV5 =

0.68666	0.75629	0.75509
0.84383	0.87861	0.87797

Desea guardar las imagenes? S/Ns

análisis mediante gráficas V5 Vs. I5
3 es un nodo activo
4 es un nodo activo
5 es un nodo pasivo

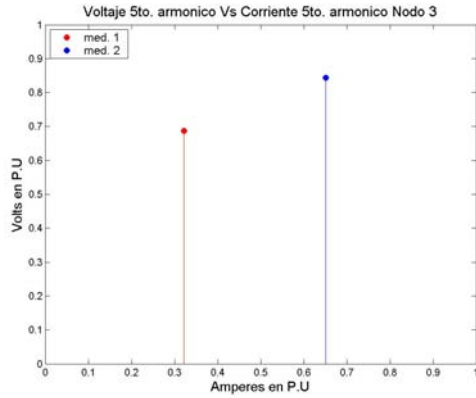


Figura 4. 109 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3

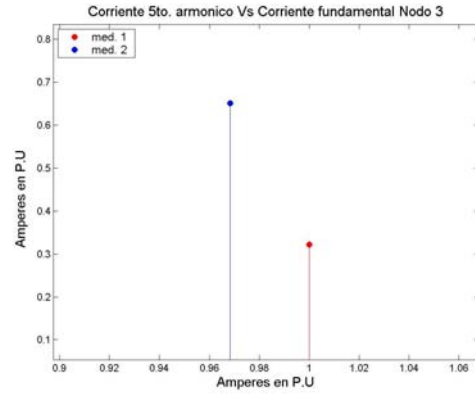


Figura 4. 110 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3

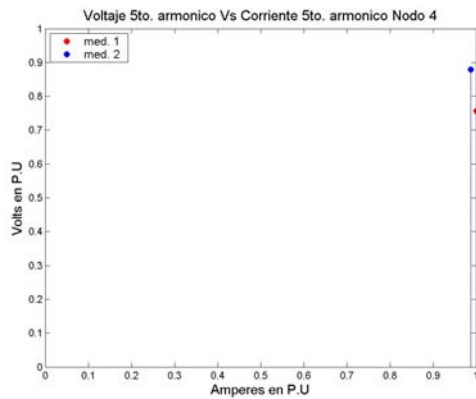


Figura 4. 111 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4

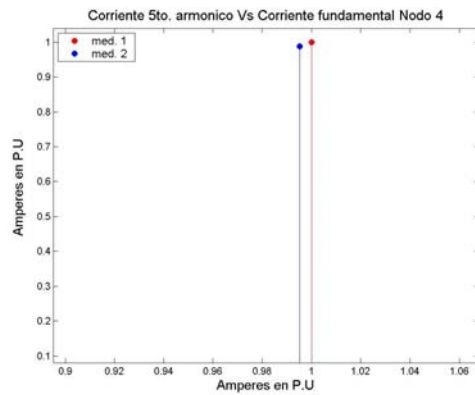


Figura 4. 112 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4

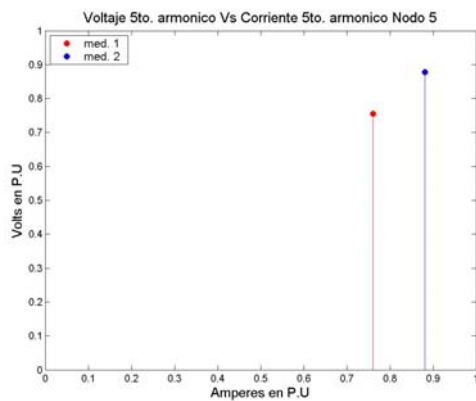


Figura 4. 113 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5

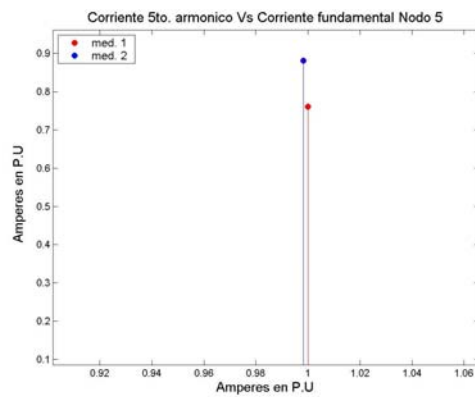


Figura 4. 114 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5



4.2.3.8 Resultados de la prueba 8 (nodo 5 y 4 con carga armónica, con variación en nodo 4)

>> discriminador2

introduce caso 1(1 fuente armonica)o 2(2 o mas fuentes armonicas)= 2

nfuentes =

2

introduce el numero de nodos de analisis= 3

nnodos =

3

introduce la numeracion inicial de nodos= 3

nodoinic =

3

Valores medidos

medl1 =

0.50796	0.85666	0.52578
0.50534	0.83178	0.52506
0.50272	0.81843	0.52434

medl5 =

0.00098866	0.002441	0.01077
0.00139	0.0049005	0.010645
0.0017811	0.0074684	0.010525

medV5 =

0.0017855	0.002241	0.0055039
0.0025363	0.0031854	0.005802
0.003284	0.0041257	0.0061014

Valores escalados

medesc1 =

1	1	1
0.99484	0.97096	0.99863

medesc15 =

0.5551	0.32684	1
0.78042	0.65617	0.98838

medescV5 =

0.54369	0.54318	0.90206
0.77233	0.7721	0.95092

Desea guardar las imagenes? S/Nn

análisis mediante gráficas V5 Vs. I5
3 es un nodo pasivo
4 es un nodo activo
5 es un nodo activo

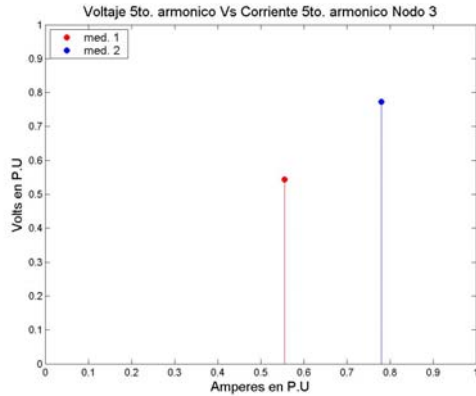


Figura 4. 115 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3

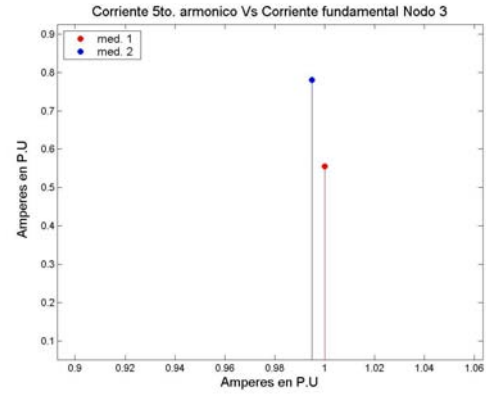


Figura 4. 116 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3

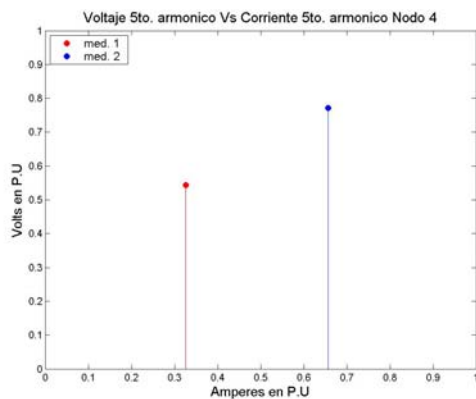


Figura 4. 117 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4

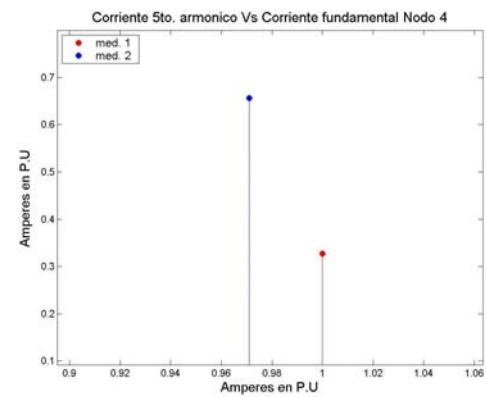


Figura 4. 118 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4

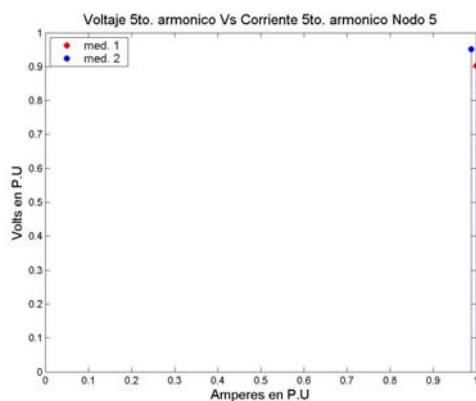


Figura 4. 119 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5

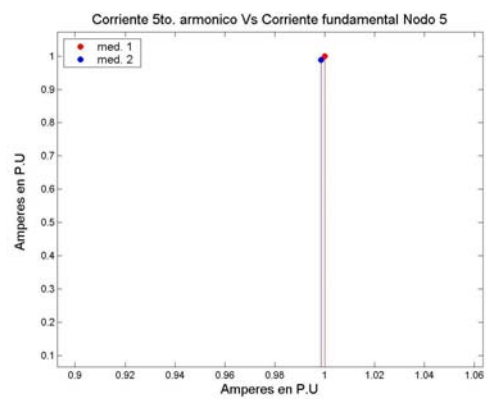


Figura 4. 120 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5



4.2.3.9 Resultados de la prueba 9 (nodo 5 y 3 con carga armónica, con variación en nodo 3)

>> discriminador2

introduce caso 1(1 fuente armonica)o 2(2 o mas fuentes armonicas)= 2
nfuentes =

2

introduce el numero de nodos de analisis= 3
nnodos =

3

introduce la numeracion inicial de nodos= 3
nodoinic =

3

Valores medidos

medl1 =

0.47623	0.88699	0.52593
0.46072	0.88233	0.52536
0.46673	0.87766	0.52479

medl5 =

0.002437	0.0021862	0.01079
0.0051827	0.0029529	0.010684
0.0079132	0.0036989	0.010581

medV5 =

0.0019242	0.0020475	0.0054363
0.0028288	0.0027949	0.0056666
0.0037329	0.0035383	0.0058982

Valores escalados

medesc1 =

1	1	1
0.96742	0.99474	0.99892

medesc15 =

0.30796	0.59105	1
0.65493	0.79832	0.99013

medescV5 =

0.51546	0.57867	0.92168
0.75781	0.78989	0.96072

Desea guardar las imagenes? S/Ns

análisis mediante gráficas V5 Vs. I5
3 es un nodo activo
4 es un nodo pasivo
5 es un nodo activo

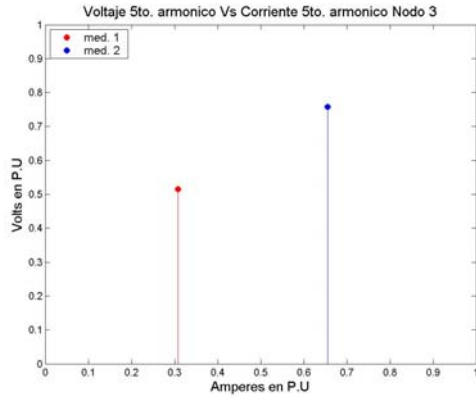


Figura 4. 121 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 3

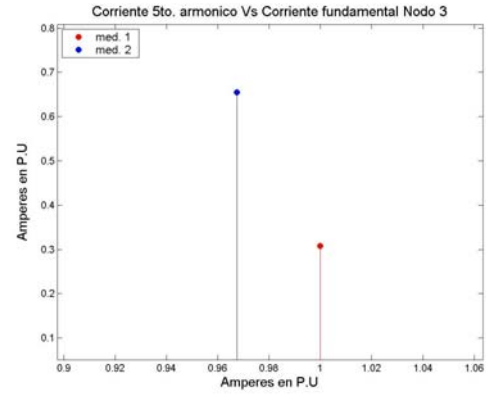


Figura 4. 122 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 3

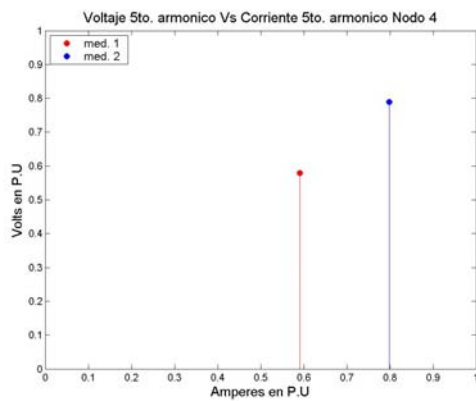


Figura 4. 123 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 4

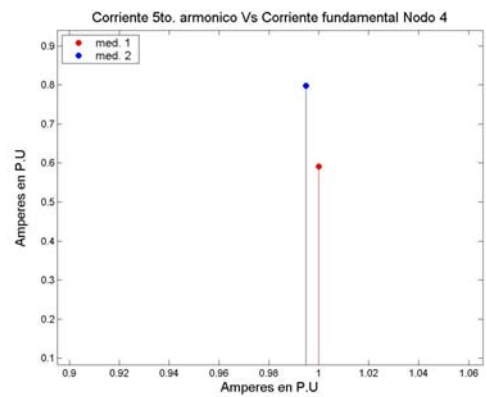


Figura 4. 124 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 4

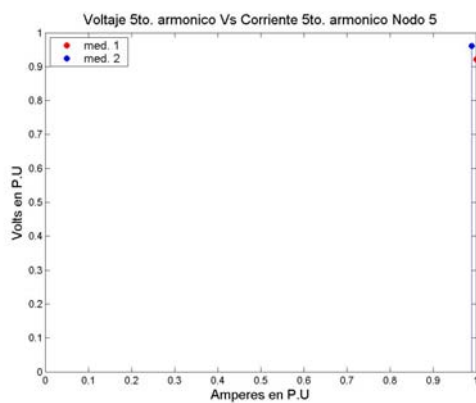


Figura 4. 125 Voltaje Vs. Corriente armónico 5 nodo 5

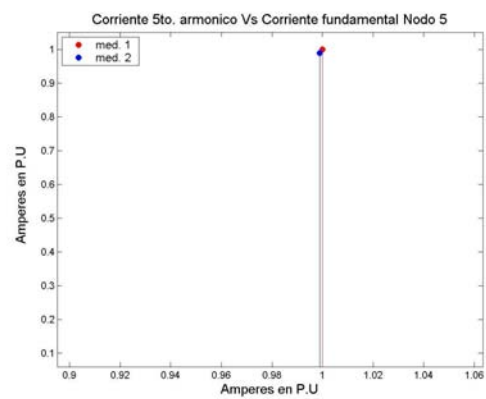


Figura 4. 126 Corriente armónica 5 Vs. Corriente fundamental nodo 5

4.3 Conclusiones

Al ejecutar el programa *discriminador2.m*, éste llama a rutinas de petición de información vital para la generación de los resultados. Es necesario contar con tres datos de voltaje armónico, corriente armónica y fundamental nodal en todos los nodos del sistema eléctrico, y donde estos datos son magnitudes variantes ascendentes como consecuencia de variaciones de consumo de energía de la carga contaminante armónica. El tercero y último dato se descarta del estudio, ya que su único uso es el de escalar los restantes valores y así obtener dos puntos diferentes (delta) de análisis, y que son suficientes para determinar el tipo de nodo ya sea activo o pasivo (posee carga no lineal o cargas pasivas).

En cada prueba puede observarse de forma simple la secuencia del programa, y para cuestiones de apreciación de resultados, en la última hoja de cada prueba se incorporaron las salidas del programa así como sus gráficas. Todas las pruebas realizadas resultaron satisfactorias, ya que el algoritmo es capaz de detectar de forma eficiente la característica de cada nodo del sistema.

Para fines prácticos, el método es totalmente dependiente de contar con mediciones en todos los nodos de estudio, y por lo tanto, es necesario un estimador de estados armónico capaz de proporcionar los datos necesarios para realizar éste estudio. Como otra alternativa de aplicación del método, y de acuerdo con el análisis realizado en el capítulo 3, el problema es mucho más manejable por medio de mediciones coordinadas de voltaje y corrientes armónicas en cada nodo por separado, si en el sistema existen instaladas más de una carga no lineal, influyentes en la contaminación del sistema. El problema se complica al tratar el caso de que en el sistema exista una sola carga no lineal, ya que como se vio, todas las gráficas $V_5 - I_5$ para todos los nodos, aún para el que posee la carga no lineal se comportan de manera semi-lineal. Como una alternativa para la detección, cuando existe esta condición es la de realizar mediciones periódicas de corriente armónica nodal con el armónico más representativo (mayor magnitud) para cada nodo, y aplicar estudios estadísticos para determinar por esta vía el nodo que maneje mayores magnitudes de corriente armónica y así identificar el posible nodo con carga no lineal conectada a él.

Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros

CAPÍTULO

5

El propósito de este capítulo es mostrar las conclusiones obtenidas durante el desarrollo del trabajo de tesis, así como en la etapa de pruebas de los algoritmos propuestos. Se incluyen las aportaciones de la tesis, como también las recomendaciones para trabajos futuros.

5.1 Conclusiones

1. Para valores de TDH de voltaje menores del 10% la técnica de análisis de inyección de corrientes posee características de programación accesible.
2. En casos donde el sistema posee bancos de capacitores el TDH de voltaje puede ser mayor en nodos que no contengan la carga no lineal.
3. las variaciones de carga en los nodos del sistema, repercute severamente en la distorsión del espectro armónico.
4. El algoritmo de determinación de la ubicación de nodos con carga no lineal utilizando redes neuronales, es aplicable únicamente cuando es posible determinar el tipo de carga por inspección del espectro característico, de acuerdo a patrones proporcionados por estándares establecidos.
5. Mediante el algoritmo de determinación de la ubicación de nodos con carga no lineal, por el medio del método de variación monoparamétrica, es posible determinar multicargas armónicas conectadas a un sistema eléctrico.
6. la limitación del método de variación monoparamétrica, es el de la necesidad de disponer de mediciones en tiempo real de los parámetros eléctricos del sistema para un armónico en particular (mayor magnitud).
7. la implementación de la normalización en ambas técnicas de determinación de nodos, fue la manera de adaptar los valores obtenidos en las simulaciones a un entorno el cual fuera de utilidad para el funcionamiento de los dos algoritmos.



8. Para la existencia de dos o más cargas no lineales conectadas a un sistema eléctrico, el problema puede resolverse utilizando las gráficas comparativas de voltaje armónico contra corriente armónica.
9. Para la existencia de una sola carga armónica conectada al sistema, el problema consiste en identificar el nodo que presente mayor cambio de magnitud de la corriente fundamental, con respecto a los nodos restantes del sistema eléctrico en estudio.

5.2 Aportaciones de la Tesis

Las aportaciones que presenta este trabajo de tesis son las siguientes:

- Desarrollo de un programa de análisis de armónicos, utilizando el método de inyección de corrientes, con flujos de potencia acoplado.
- Desarrollo de un programa de determinación de la ubicación de una carga no lineal, utilizando redes neuronales del tipo progresivo multicapa con retropropagación del error, utilizando las herramientas prediseñadas que incorpora el programa computacional Matlab[®] v.6.5.
- Desarrollo de un programa de determinación de la ubicación de una o dos cargas no lineales, utilizando los principios del método de variación monoparamétrica, planteado por A.M. Dán, Zs. Czira, y adaptándolos a las necesidades requeridas con base a resultados obtenidos de simulaciones, y transformando los principios de análisis a programas que puedan realizar la determinación en forma automática.
- Presentación de los resultados obtenidos, aplicando los dos métodos desarrollados para determinar la ubicación de cargas armónicas.

5.3 Recomendaciones para trabajos futuros

- Extender el algoritmo de análisis de armónicos para sistemas desbalanceados, con el objetivo de realizar estudios armónicos de sistemas eléctricos cuando existen armónicos de secuencia cero.
- Analizar el problema del efecto armónico en componentes eléctricos.
- Diseñar modelos de cargas y componentes, para realizar estudios armónicos con técnicas más poderosas de análisis, cuando existan grados



de distorsión de la forma de onda de voltaje en los puntos de acoplamiento común mayores a un 10% de la fundamental.

- Desarrollar una técnica de detección de cargas armónicas, por medio del cual pueda determinarse el tipo o tipos de carga causantes de contaminar un sistema eléctrico por el tipo de espectro armónico que presentan.
- Extender la funcionalidad del método de determinación de la ubicación de nodos con cargas no lineales, esto con la incorporación de otras cargas armónicas, con el fin de obtener una amplia gama de respuestas.
- Calcular los coeficientes de Fourier mediante la aplicación de redes neuronales artificiales.
- Diseñar un estimador de estados armónico.
- Ampliar los estudios utilizando el método de variación monoparamétrica, utilizando otros tipos de cargas no lineales
- Aplicar un estimador de estados, para realizar estudios de repuesta del algoritmo del método de variación monoparamétrica.

REFERENCIAS

- [1] IEEE Std 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.
- [2] E. Acha, Manuel Madrigal. Power Systems Harmonics, Computer Modelling and Analysis. John Wiley & Sons. 2001.
- [3] J. Arrillaga, N. R. Watson, Power system harmonics, Wiley & Sons, second edition.
- [4] C.J. Melhorn, M. F. McGranaghan, Interpretation and Analysis of Power Quality Measurements
- [5] Carl. G. Looney. Pattern recognition using neural networks, Theory and Algorithms for Engineers and Scientists
- [6] B. M. del Brío, A. S. Molina, Redes Neuronales y Sistemas Difusos, Alfaomega-Ra-Ma, 2ª edición ampliada y revisada.
- [7] A.M. Dán, Zs. Czira, Identification of Harmonic Sources
- [8] Kishan G, Chilukuri K, Sanjay Ranka. Bounds on the number of samples needed for neural learning.
- [9] A. G. Expósito. Análisis y operación de sistemas de energía eléctrica. M.C Graw Hill, 2002.
- [10] G. W. Chang, P. F. Ribeiro. Harmonics Theory.
- [11] J. Schlabbach. Voltage quality in electrical power systems. p.p 4-5.
- [12] Ricardo.O. Mota Palomino, Miguel Jiménez Guzmán, Manuel Madrigal Martínez. Calidad de la energía en empresas eléctricas distribuidoras: Armónicos y Calidad del Voltaje.
- [13] Hwei P. Hsu. Análisis de Fourier. Pearson Educación.
- [14] Muhammad H. Rashid, Electrónica de Potencia. Pearson Educación. Segunda edición.
- [15] R.E.Ziemer, W.H.Tranter, D.R. Fannin. Signals & Systems Continuous and Discrete. Prentice Hall. Fourth edition.
- [16] Mack Grady. Understanding Power System Harmonics. September 2000.



- [17] Joseph S. Subjak jr, John S. McQuilkin. Harmonics- Causes, Effects, Measurements and Analysis- Update.
- [18] S. Mark Halpin, Reuben F. Burch. Harmonic Limit Compliance Evaluations Using IEEE519-1992.
- [19] J. Arrillaga, B. Smith, N. R. Watson, A. R. Wood. Power System Harmonic Analysis. John Wiley & Sons.
- [20] S. Mark Halpin, Paulo F. Ribeiro, J.J. Dai. Frequency-Domain Harmonic Analysis Methods.
- [21] Task force on Harmonics Modeling and Simulation. Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in electric Power Networks. Part I: Concepts, Models, and Simulation Techniques.
- [22] S.J. Ranade, W. Xu. An Overview of Harmonics Modeling and Simulation.
- [23] W. Xu, S.J. Renade. Analysis of Unbalanced Harmonic Propagation in Multiphase Power Systems.
- [24] Gary W. Chang, Wilsun Xu, Paulo F. Ribeiro. Modeling of Harmonic Sources Power Electronic Converters.
- [25] IEEE Working Group on Power Systems Harmonics. "Power System Harmonics: An Overview". IEEE trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-102, Aug. 1983, pp. 2455-2460.
- [26] E.L Owen, "A History of Harmonics in Power Systems", IEEE Industry Applications Magazine, January/ February 1998, pp. 6-12.
- [27] W. Mack Grady, Surya Santoso. IEEE Power Engineering Review. Published: Nov 2001. Volume: 2111, page(s): 8-11.
- [28] Bimal K. Bose, Modern Power Electronics and AC Drives. Prentice Hall PTR.
- [29] Freeman James. Redes neuronales: algoritmos, aplicaciones y técnicas de programación
- [30] Hush, D.R.; Horne, B.G. Progress in supervised neural networks. IEEE Signal Processing Magazine. Published: Jan. 1993. Volume: 10 1, page(s): 8-39.
- [31] Khandaker M.S. Islam, Abdul H. Samra. Identification of Harmonic Sources in Power Distribution Systems.



-
- [32] G.T. Heydt, Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, January 1989.
- [33] Rutisurhata K. Hartana, Gill G. Richards. Constrained Neural Network-Based Identification of Harmonic Sources.

Programas para el estudio de armónicas

A.1. Introducción

En esta sección se presentan los archivos involucrados, para que en conjunto de los mismos se efectúe el estudio armónico en un sistema eléctrico de potencia. El código fue desarrollado en el programa computacional Matlab v.6.5. A continuación se presenta en formato de lista los archivos, y a la vez, la función que desempeña cada uno de ellos.

Nombre de archivo	Función
armonicos.m	Programa principal, que en sus líneas ejecuta a todos los archivos restantes, para llevar a cabo la simulación, y calcula en el mismo los voltajes armónicos.
indices_bus.m	Crea índices de identificación para los elementos de la matriz bus , ubicada en el archivo de datos de entrada (armo1f.m y armo2f.m).
indices_rama.m	Crea índices de identificación para los elementos de la matriz rama , ubicada en el archivo de datos de entrada (armo1f.m y armo2f.m).
indices_gen.m	Crea índices de identificación para los elementos de la matriz gen , ubicada en el archivo de datos de entrada (armo1f.m y armo2f.m).
armo1f.m	Archivo de datos de entrada con las características del sistema y para una fuente armónica.
armo2f.m	Archivo de datos de entrada con las características del sistema y para dos fuentes armónicas.
tipos_bus.m	Obtiene las posiciones de los elemento en la matriz bus , de los tipos de nodo del sistema. ref= bus de referencia pv= bus de voltaje pq= buses de carga
const_Ybus.m	Construye la matriz de admitancias del sistema
const_sbus.m	Construye el vector de inyecciones de potencia de los nodos.
newtonfp.m	Programa de flujos de potencia.
fpsoln.m	Cálculo de las potencias con base a los voltajes calculados en el estudio de flujos de potencia (newtonfp.m y ds_bus_dv.m).
ds_bus_dv.m	Programa complementario en el estudio de flujos de potencia, cuya función es la de crear los elementos del Jacobiano.



Nombre de archivo	Función
bf.m	Realiza el estudio de barrido de frecuencias
Const_Ybusarmo.m	Construye la matriz de admitancias armónicas del sistema.

A.2 Código del programa *armonicos.m*

```
function armonicos(archivo)

clear all
clc

[PQ, PV, REF, BUS_I, BUS_TIPO, PD, QD, GS, BS, VM, VA, BASE_KV,VMAX, VMIN, CARGATIPO,
PArmo, QArmo] = indices_bus;
[F_BUS, T_BUS, RAMA_R, RAMA_X, RAMA_B, TAP, SHIFT, RAMA_ESTATUS] = indices_rama;
[GEN_BUS, PG, QG, VG, GEN_ESTATUS, RssGen, XssGen] = indices_gen;

archivo = 'acha'; %% nombre del archivo de datos

%% lectura de datos y conversión a numeración interna
[baseMVA, bus, gen, rama, farmo] = feval(archivo);

%% vectores de tipos de buses
[ref, pv, pq] = tipos_bus(bus, gen);

%% creación de Ybus
[Ybus, Yf, Yt, Ys1, nl] = const_Ybus(baseMVA, bus, rama);

%% Vector de inyecciones de potencia compleja (generación - carga)
Sbus = const_sbus(baseMVA, bus, gen);

%% información de generadores
on = find(gen(:, GEN_ESTATUS));

%% inicializar V and Pg desde los datos del archivo de datos
V0 = bus(:, VM) .* exp(sqrt(-1) * pi/180 * bus(:, VA));
V0(gen(on, GEN_BUS)) = gen(on, VG) ./ abs(V0(gen(on, GEN_BUS))).* V0(gen(on, GEN_BUS));

%% ejecuta flujos de potencia

t0 = clock;
[V, success, iterations] = newtonfp(Ybus, Sbus, V0, ref, pv, pq, 1e-8, 20);
disp('Voltajes nodales');
V

%% calcular flujos
[bus, gen, rama, pot] = pfsoln(baseMVA, bus, gen, rama, Ybus, Yf, Yt, V, ref, pv, pq);
disp('voltajes actualizados');
bus(:, VM)
assignin('base', 'VM', bus(:, VM));
disp('angulos actualizados');
bus(:, VA)
assignin('base', 'VA', bus(:, VA));
```



```
VMr=bus(:,VM).*(cos(bus(:,VA).*(pi/180))+i.*sin(bus(:,VA).*(pi/180)))
assignin('base','VMr',VMr);
f = rama(:, F_BUS);

t = rama(:, T_BUS);
for k=1:nl

    %vector de diferencias de potencial
    dpotff(k,1)=VMr(f(k,1))-VMr(t(k,1));

end
I=[f,t,dpotff.*Ys1];
assignin('base','dpotf',dpotff);
assignin('base','IFrama',I);
disp('inyecciones de corriente (de)');
If1=[f,t,(Yf*V)];
%Ifpolar=[real(If1),imag(If1)]
Ifpolar=[f,t,abs(If1(:,3)),angle(If1(:,3)).*(180/pi)]
assignin('base','IF',If1);
assignin('base','IFpolar',Ifpolar);
disp('inyecciones de corriente (a)');
It1=[t,f,(Yt*V)];
Itpolar=[t,f,abs(It1(:,3)),angle(It1(:,3)).*(180/pi)];
assignin('base','IT',It1);
assignin('base','ITpolar',Itpolar);
disp('potencias "nodo real imag(potencia saliente del bus) | nodo real imag(potencia inyectada al nodo)");
in_out_pot=[rama(:,F_BUS),pot(:,1),pot(:,2),rama(:,T_BUS),pot(:,3),pot(:,4)]
assignin('base','IN_OUT_POT',in_out_pot);
et = etime(clock, t0);

disp('estudio armonico');
disp(' ');
%% constantes
nb = size(bus, 1);           %% número de buses
nl = size(rama, 1);         %% número de líneas
ng = size(gen, 1);          %% número de generadores
nfarmo=size(farmo,1);      %% numero de fuentes armonicas
sp=1;

for k=1:nb
    %Rutina que retira la carga no lineal como
    if (bus(k,BS)~=0 & bus(k,QArmo)~=0) %elemento pasivo en el estudio de flujos, para
        a(k,1)=0;                    %considerarlo como fuente de I en el estudio
    else
        %de armonicos
        a(k,1)=1;
    end
end
modbus=a.*bus(:,BS);
bus(:,BS)=modbus;

%ESTUDIO DE BARRIDO DE FRECUENCIAS

ejecuta=0;
BF(V,bus,Ybus,ejecuta,baseMVA,gen, rama, farmo); %llama a la funcion BF(barrido de frecuencias)
```



```
% Calculo de propagaciones armonicas

% formación de la matriz Ibus Armonica
Ifun=zeros(nb,1);
Ibus=zeros(nb,1);
sumaV=zeros(nb,1);
sumaI=zeros(nl,1);

%Calculo de Voltajes Armonicos
for h=2:100
    existe=0;
    for j=1:nfarmo
        if farmo(j,1)==h
            %
            Ifun(farmo(j,2))=(bus(farmo(j,2), PArmo)/baseMVA+j*bus(farmo(j,2),
            QArmo)/baseMVA)/(sqrt(3)*abs(V(farmo(j,2))))*exp(i*(angle(V(farmo(j,2)))+pi/2));
            P=bus(farmo(j,2), PArmo);
            Q=bus(farmo(j,2), QArmo);
            S=conj(P/baseMVA+i*Q/baseMVA);
            Vo=conj(V(farmo(j,2)));
            Ifun(farmo(j,2))=(S)/(sqrt(3)*(Vo));
            magIfun=abs(Ifun);
            angleIfun=angle(Ifun)*180/pi;
            % se afecta la fundamental por el porcentaje de la fuente armonica
            Ibus(farmo(j,2))=Ifun(farmo(j,2))*(farmo(j,3)/100)
            Ifundam(j,:)=[farmo(j,2),Ifun(farmo(j,2))];
            larmo(j,:)=[farmo(j,2),h,Ibus(farmo(j,2))];

            % se suma el angulo de desplazamiento de la armonica
            %Ibus(farmo(j,2))=Ibus(farmo(j,2))*(cos((farmo(j,4))*pi/180)+j*sin((farmo(j,4))*pi/180))
            magIfun=abs(Ibus) ;
            angleIfun=angle(Ibus)*180/pi;
            existe=1;
        end
    end
end
if existe==1
    ejecuta=1;
    [Ybus, Yf, Yt] = const_Ybusarmo(baseMVA, bus, rama, gen, h, V, sp,ejecuta);
    Vbus=inv(Ybus)*Ibus;
    if h==5

        assignin('base','Ybusarmo5',Ybus)
    end

    str = int2str(h);
    %assignin=['base',['Z',str],z);
    disp(['Armónica ',str ])
    disp(' ');
    disp(' nodo Voltaje');

    assignin('base',['V',str],Vbus);
    Vmag=abs(Vbus);
    Vang=angle(Vbus)*180/pi;
    disp(' nodo Voltaje angulo');
```



```
Vmag1=[bus(:,BUS_I),Vmag,Vang]
assignin('base',['Vpolar',str],Vmag1);
sumaV=sumaV+(abs(Vbus)).^2;

%CALCULO DE LAS CORRIENTES ARMONICAS
stat = rama(:, RAMA_ESTATUS);

Ys = stat ./ (rama(:, RAMA_R) + i*(h)* rama(:, RAMA_X));
tap = ones(nl, 1);

p = find(rama(:, TAP));

tap(p) = rama(p, TAP);

ang=exp(i * rama(:, SHIFT)*pi/180);
tap = tap .* ang;

Ys=Ys ./tap;
%Corrientes nodales

If1h=[f,t,(Yf*Vbus)];
assignin('base',['Ifnodal',str],If1h);
It1h=[t,f,(Yt*Vbus)];
assignin('base',['Itnodal',str],It1h);

%corrientes de rama
Ih1=(Vbus(rama(:, F_BUS))-Vbus(rama(:, T_BUS))).*Ys;
disp('Ih1=(Vf-Vt)/Ys ');
disp(' nodo sal      nodo ent      Ih1');
Ih1sal=[rama(:,F_BUS),rama(:,T_BUS),Ih1]
assignin('base',['Iframa',str],Ih1sal);
Ih1mag=abs(Ih1);
Ih1ang=angle(Ih1)*180/pi;
disp(' nodo sal nodo ent  Ih1(mag)  Ih1(ang)');
Ih1magsal=[rama(:,F_BUS),rama(:,T_BUS),Ih1mag,Ih1ang]
assignin('base',['Ifpolarrama',str],Ih1magsal);
Ih=(Vbus(rama(:, T_BUS))-Vbus(rama(:, F_BUS))).*Ys;
%disp('Ih= (Vt-Vf)/Ys (forma compleja)');
%disp(' nodo sal      nodo ent      Ih');
Ihsal=[rama(:,T_BUS),rama(:,F_BUS),Ih];
assignin('base',['Itrama',str],Ihsal);
sumaI=sumaI+Ih.^2;
end
ejecuta=0;
end
% Calculo del THD de Voltaje
for j=1:nb
    THDV(bus(j, BUS_I))=sqrt(sumaV(bus(j, BUS_I))/abs(V(bus(j, BUS_I)))^2)*100;
end

assignin('base','Ifundam',Ifundam);
assignin('base','Iarm',Iarm);

THDV=abs(THDV)
assignin('base','THDV',THDV);
```



```
return;
```

A.3 Código del programa *indices_bus.m*

```
function [PQ, PV, REF, BUS_I, BUS_TIPO, PD, QD, GS, BS, VM, ...
        VA, BASE_KV, VMAX, VMIN, CARGATIPO, PArmo, QArmo] = indices_bus

% tipo de bus
PQ          = 1;
PV          = 2;
REF         = 3;

% indices
BUS_I       = 1;    % numero de bus
BUS_TIPO    = 2;    % tipo de bus (1 - PQ bus, 2 - PV bus, 3 - bus de referencia)
PD          = 3;    % Pd, potencia real demandada (MW)
QD          = 4;    % Qd, potencia reactiva demandada (MVAR)
GS          = 5;    % Gs, conductancia de derivacion (MW a V = 1.0 p.u.)
BS          = 6;    % Bs, susceptancia de derivacion (MVAR a V = 1.0 p.u.)
VM          = 7;    % Vm, magnitud de voltaje (p.u.)
VA          = 8;    % Va, angulo de voltaje (degrees)
BASE_KV     = 9;    % baseKV, voltaje base (kV)
VMAX        = 10;   % magnitud maxima de voltaje (p.u.)
VMIN        = 11;   % minVm, magnitud minima de voltaje (p.u.)
CARGATIPO   = 12;   % Modelo de Carga de CIGRE (p.u.)
PArmo       = 13;   % Potencia Activa de Carga de la Fuente Armonica en (p.u.)
QArmo       = 14;   % Potencia Reactiva de Carga de la Fuente Armonica en (p.u.)
return;
```

A.4 Código del programa *indices_rama.m*

```
function [F_BUS, T_BUS, RAMA_R, RAMA_X, RAMA_B, TAP, SHIFT, RAMA_ESTATUS, PF, QF, PT,
        QT] = indices_rama

% define los indices
F_BUS       = 1;    % f, numero from bus
T_BUS       = 2;    % t, numero to bus
RAMA_R      = 3;    % r, resistencia (p.u.)
RAMA_X      = 4;    % x, reactancia (p.u.)
RAMA_B      = 5;    % b, susceptancia total de carga de la linea (p.u.)
TAP         = 6;    % relacion de transformacion
SHIFT       = 7;    % angulo de cambio de fase
RAMA_ESTATUS = 8;   % estatus de la linea, 1 - en servicio, 0 - fuera de servicio
return;
```

A.5. Código del programa *indices_gen.m*

```
function [GEN_BUS, PG, QG, VG, GEN_ESTATUS, RssGen, XssGen] = indices_gen

% define los indices
GEN_BUS     = 1;    % numero del bus
PG          = 2;    % Pg, potencia real de salida (MW)
QG          = 3;    % Qg, potencia reactiva de salida (MVAR)
```




```

VG = 4; % Vg, manitud de voltaje setpoint (p.u.)
GEN_ESTATUS= 5; % estatus, 1 -maquina en servicio, 0 - maquina fuera de servicio
RssGen = 6; % Resistencia SubSincrona del Generador en p.u.
XssGen = 7; % Reactancia SubSincrona del Generador en p.u.

```

```
return;
```

A.6. Código del programa armo1f.m

```
function [baseMVA, bus, gen, rama, farmo] = acha
```

```
baseMVA = 100.0000;
```

```
%%% datos del bus
```

```

bus = [ 1 3 0.0 0.0 0.0 0.00 1.0500 0.0000 100.0000 1.5000 0.8000 0 0000.000 0000.0000;
       2 2 0.0 0.0 0.0 0.00 1.0000 0.0000 100.0000 1.5000 0.8000 0 0000.000 0000.0000;
       3 1 45.0 20.0 0.0 0.00 1.0000 0.0000 100.0000 1.5000 0.8000 3 0000.000 0000.0000;
       4 1 80.0 30.0 0.0 0.30 1.0000 0.0000 100.0000 1.5000 0.8000 3 0000.000 0000.0000;
       5 1 50.0 25.0 0.0 0.40 1.0000 0.0000 100.0000 1.5000 0.8000 3 0000.000 -40.0000];

```

```
% Formato de los datos del bus
```

```

% 1 numero del bus
% 2 tipo de bus
%    PQ bus = 1
%    PV bus = 2
%    bus de referencia = 3
%
% 3 Pd, potencia real demandada (MW)
% 4 Qd, potencia reactiva demandada (MVAR)
% 5 Gs, conductancia de derivacion (MW a V = 1.0 p.u.)
% 6 Bs, susceptancia de derivacion (MVAR a V = 1.0 p.u.)
%
% 7 Vm, magnitud de voltaje (p.u.)
% 8 Va, angulo de voltaje (grados)
%
% 9 baseKV, voltaje base (kV)
%
% (+) 10 maxVm, maxima magnitud de voltaje (p.u.)
% (+) 11 minVm, minima magnitud de voltaje (p.u.)
% (+) 12 Carga Tipo CIGRE 1) ,2) ,3)
% (+) 13 Potencia Activa de Carga de la Fuente Armonica en (p.u.)
% (+) 14 Potencia Reactiva de Carga de la Fuente Armonica en (p.u.)

```

```
%%% datos del generador
```

```

gen = [ 1 100.00 0.0000 1.0500 1 0.0000 0.0001;
       2 30.00 0.0000 1.0000 1 0.0000 0.0010];

```

```
% Formato de los datos del generados
```

```

% 1 numero del bus
% 2 Pg, potencia real de entrega (MW)
% 3 Qg, potencia reactiva de salida (MVAR)
% 4 Vg, punto de ajuste de la magnitud de voltaje (p.u.)

```



```
% 5 estatus, 1 - maquina en servicio , 0 - maquina fuera de
% servicio
% 6 Resistencia SubSincrona del Generador en p.u.
% 7 Reactancia SubSincrona del Generador en p.u.
```

```
%% datos de rama
```

```
rama = [ 1 2 0.020 0.0600 0.0600 1.0000 0.0000 1;
         1 3 0.080 0.2400 0.0500 1.0000 0.0000 1;
         2 3 0.060 0.1800 0.0400 1.0000 0.0000 1;
         2 4 0.060 0.1800 0.0400 1.0000 0.0000 1;
         2 5 0.040 0.1200 0.0300 1.0000 0.0000 1;
         3 4 0.010 0.0300 0.0200 1.0000 0.0000 1;
         4 5 0.080 0.2400 0.0500 1.0000 0.0000 1];
```

```
% Formato de los datos de ramas
```

```
% 1 f, numero de bus from
% 2 t, numero de bus to
% 3 r, resistencia (p.u.)
% 4 x, reactancia (p.u.)
% 5 b, susceptancia de carga total de linea (p.u.)
% 6 ratio, transformer off nominal turns ratio
% 7 angulo, angulo de fase de cambio del transformador (grados)
% 8 estatus inicial de rama , 1 - en servicio, 0 - fuera de servicio
```

```
% Información sobre las fuentes Armonicas
```

```
% Armonica
```

```
farmo=[ 5 5 5.05;
        7 5 2.59;
        11 5 1.05;
        13 5 0.75;
        17 5 0.44;
        19 5 0.35;
        23 5 0.24;
        25 5 0.20];
```

```
% (+) Armonica h
% (+) Nodo en la que se inyecta la Armonica h
% (+) Porcentaje de la Fundamental
% (+) Angulo de desplazamiento
```

```
return;
```

A.7. Código del programa *armo2f.m*

```
function [baseMVA, bus, gen, rama, farmo] = armo2f
```

```
baseMVA = 100.0000;
```

```
%% datos del bus
```

```
bus = [ 1 3 0.0 0.0 0.0 0.00 1.0500 0.0000 100.0000 1.5000 0.8000 0 0000.000 0000.0000;
        2 2 0.0 0.0 0.0 0.00 1.0000 0.0000 100.0000 1.5000 0.8000 0 0000.000 0000.0000;
        3 1 45.0 20.0 0.0 0.00 1.0000 0.0000 100.0000 1.5000 0.8000 3 0000.000 0000.0000;
        4 1 80.0 30.0 0.0 0.10 1.0000 0.0000 100.0000 1.5000 0.8000 3 0000.000 -10.0000;
        5 1 50.0 25.0 0.0 0.30 1.0000 0.0000 100.0000 1.5000 0.8000 3 0000.000 -30.0000];
```



```

% Formato de los datos del bus
% 1 numero del bus
% 2 tipo de bus
%   PQ bus      = 1
%   PV bus      = 2
%   bus de referencia = 3
%
% 3 Pd, potencia real demandada (MW)
% 4 Qd, potencia reactiva demandada (MVAR)
% 5 Gs, conductancia de derivacion (MW a V = 1.0 p.u.)
% 6 Bs, susceptancia de derivacion (MVAR a V = 1.0 p.u.)

% 7 Vm, magnitud de voltaje (p.u.)
% 8 Va, angulo de voltaje (grados)
%
% 9 baseKV, voltaje base (kV)

% (+) 10 maxVm, maxima magnitud de voltaje (p.u.)
% (+) 11 minVm, minima magnitud de voltaje (p.u.)
% (+) 12 Carga Tipo CIGRE 1) ,2) ,3)
% (+) 13 Potencia Activa de Carga de la Fuente Armonica en (p.u.)
% (+) 14 Potencia Reactiva de Carga de la Fuente Armonica en (p.u.)

```

```

%% datos del generador
gen = [ 1      100.00  0.0000 1.0500  1      0.0000 0.0001;
        2      30.00  0.0000 1.0000  1      0.0000 0.0010];

```

```

% Formato de los datos del generados
% 1 numero del bus
% 2 Pg, potencia real de entrega (MW)
% 3 Qg, potencia reactiva de salida (MVAR)
% 4 Vg, punto de ajuste de la magnitud de voltaje (p.u.)
% 5 estatus, 1 - maquina en servicio , 0 - maquina fuera de
%   servicio
% 6 Resistencia SubSincrona del Generador en p.u.
% 7 Reactancia SubSincrona del Generador en p.u.

```

```

%% rama data
rama = [ 1      2      0.020  0.0600  0.0600  1.0000  0.0000  1;
         1      3      0.080  0.2400  0.0500  1.0000  0.0000  1;
         2      3      0.060  0.1800  0.0400  1.0000  0.0000  1;
         2      4      0.060  0.1800  0.0400  1.0000  0.0000  1;
         2      5      0.040  0.1200  0.0300  1.0000  0.0000  1;
         3      4      0.010  0.0300  0.0200  1.0000  0.0000  1;
         4      5      0.080  0.2400  0.0500  1.0000  0.0000  1];

```

```

% Formato de los datos de ramas
% 1 f, numero de bus from
% 2 t, numero de bus to
% 3 r, resistencia (p.u.)
% 4 x, reactancia (p.u.)
% 5 b, susceptancia de carga total de linea (p.u.)
% 6 ratio, transformer off nominal turns ratio
% 7 angulo, angulo de fase de cambio del transformador (grados)
% 8 estatus inicial de rama , 1 - en servicio, 0 - fuera de servicio

```



```

% Información sobre las fuentes Armonicas
% Armonica
farmo=[ 5  4  5.05;
        7  4  2.59;
        11 4  1.05;
        13 4  0.75;
        17 4  0.44;
        19 4  0.35;
        23 4  0.24;
        25 4  0.20;
        5  5  5.05;
        7  5  2.59;
        11 5  1.05;
        13 5  0.75;
        17 5  0.44;
        19 5  0.35;
        23 5  0.24;
        25 5  0.20];
%      (+) Armonica h
%      (+) Nodo en la que se inyecta la Armonica h
% (+) Porcentaje de la Fundamental
% (+) Angulo de desplazamiento

return;

```

A.8. Código del programa *tipos_bus.m*

```

function [ref, pv, pq] = tipos_bus(bus, gen)
% Generadores con estatus "fuera de servicio", son tratados como buses PQ con generación cero

% constantes
[PQ, PV, REF, BUS_I, BUS_TIPO, PD, QD, GS, BS, VM, VA, BASE_KV, VMAX, VMIN, CARGATIPO,
PArmo, QArmo] = indices_bus;

[GEN_BUS, PG, QG, VG, GEN_ESTATUS, RssGen, XssGen] = indices_gen;
% Obtiene el estatus del generador
bus_gen_status = zeros(size(bus, 1), 1);
bus_gen_status(gen(:, GEN_BUS)) = gen(:, GEN_ESTATUS);

% formación de listas para los buses de compensación, PV y PQ
ref = find(bus(:, BUS_TIPO) == REF & bus_gen_status); %Bus de referencia
pv = find(bus(:, BUS_TIPO) == PV & bus_gen_status); % buses PV
pq = find(bus(:, BUS_TIPO) == PQ | ~bus_gen_status); % buses PQ

%% Selecciona un nuevo bus de referencia si no existe alguno
if isempty(ref)
    ref = pv(1); % usa el primer bus PV
    pv = pv(2:length(pv)); % lo retira de la lista
end

return;

```

A.9. Código del programa *const_Ybus*

```

function [Ybus, Yf, Yt, Ys1, nl] = const_Ybus(baseMVA, bus, rama, sp)

```



```
if nargin < 4
    sp = 1;
end

% constantes
j = sqrt(-1);
nb = size(bus, 1);           % numero de buses
nl = size(rama, 1);         % numero de lineas

[PQ, PV, REF, BUS_I, BUS_TYPE, PD, QD, GS, BS, VM, VA, BASE_KV, VMAX, VMIN, CARGATIPO,
PArmo, QArmo] = indices_bus;

[F_BUS, T_BUS, RAMA_R, RAMA_X, RAMA_B, TAP, SHIFT, RAMA_ESTATUS] = indices_rama;

% Revision de la secuencia de numeracion de los buses
if any(bus(:, BUS_I) ~= [1:nb])
    error('La numeracion de buses debe capturarse en secuencia')
end

%Inicio de la creacion de Ybus
f = rama(:, F_BUS);
    % lista de buses "from"
t = rama(:, T_BUS);
    % lista de buses "to"
stat = rama(:, RAMA_ESTATUS);           %
Lineas cerradas
Ys = stat ./ (rama(:, RAMA_R) + j * rama(:, RAMA_X));    % admitancia serie
Ys1=Ys;
Bc = stat .* rama(:, RAMA_B);           %
susceptancia de la linea
rama(:,3)+rama(:,4)*j;
rama(:,5)*j/2;
tap = ones(nl, 1);

i = find(rama(:, TAP));
tap(i) = rama(i, TAP);
tap = tap .* exp(j*pi/180 * rama(:, SHIFT));           % suma cambios de fase
Ytt = Ys + j*Bc/2;
Yff = Ytt .* (tap .* conj(tap));
Yft = -(Ys) .* conj(tap);
Ytf = -(Ys) .* tap;

% Construye Yf y Yt
if nargout > 1
    i = [[1:nl]'; [1:nl]'];

    if sp
        %Version esparcida
        Yf = sparse(i, [f; t], [Yff; Yft]);

        Yt = sparse(i, [f; t], [Ytf; Ytt]);
    else
        %Version llena
        Yf = zeros(nl, nb);
    end
end
```



```

        Yt = zeros(nl, nb);
        Yf(i, [f; t]) = [Yff; Yft];
        Yt(i, [f; t]) = [Ytf; Ytt];
    end
end

%suma los elementos de la diagonal

Ys = (bus(:, GS) + j * bus(:, BS));%%/ baseMVA; %% Vector de admitancias en derivacion
if sp

    % version esparcida
    Ybus = spdiags(Ys, 0, nb, nb);
else

    %% version llena
    Ybus = diag(Ys);
end

%Crea Ybus
for i = 1:nl

    Ybus( f(i), f(i) ) = Ybus( f(i), f(i) ) + Yff(i);
    Ybus( f(i), t(i) ) = Ybus( f(i), t(i) ) + Yft(i);
    Ybus( t(i), f(i) ) = Ybus( t(i), f(i) ) + Ytf(i);
    Ybus( t(i), t(i) ) = Ybus( t(i), t(i) ) + Ytt(i);
end
Yb=full(Ybus)
assignin('base','Ybus',Yb);
return;

```

A.10. Código del programa *const_sbus.m*

```

function Sbus = const_sbus(baseMVA, bus, gen)

% constantes
j = sqrt(-1);

[PQ, PV, REF, BUS_I, BUS_TIPO, PD, QD, GS, BS, VM, ...
    VA, BASE_KV, VMAX, VMIN, CARGATIPO, PArmo, QArmo] = indices_bus;
[GEN_BUS, PG, QG, VG, ...
    GEN_ESTATUS, RssGen, XssGen] = indices_gen;

%% informacion del generador
on = find(gen(:, GEN_ESTATUS)); %% que generadores se encuentran en
operacion? %% En que buses se encuentran ellos
gbus = gen(on, GEN_BUS);

%% forma el vector de inyeccion de potencias
Sbus = -(bus(:, PD) + j * bus(:, QD)); % potencia inyectada por
las cargas %
Sbus(gbus) = (Sbus(gbus) + gen(on, PG) + j * gen(on, QG)); % mas generacion
Sbus = Sbus / baseMVA; %
convierte a p.u.

```



```
return;
```

A.11. Código del programa *newton_fp.m*

```
function [V, converged, i] = newtonfp(Ybus, Sbus, V0, ref, pv, pq, tol, max_it)

disp('ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA');
%% argumentos por default
max_it = 20;

%% inicializar
j = sqrt(-1);
converged = 0;
i = 0;
V = V0;
Va = angle(V);
Vm = abs(V);

npv = length(pv);
npq = length(pq);
j1 = 1;          j2 = npv;          %% j1:j2 - V ángulo de pv buses
j3 = j2 + 1;    j4 = j2 + npq;    %% j3:j4 - V ángulo de pq buses
j5 = j4 + 1;    j6 = j4 + npq;    %% j5:j6 - V magnitud de pq buses

%% evalúa F(x0)
mis = (Sbus) - conj(conj(V) .* (Ybus * V));
F = [ real(mis(pv));
      real(mis(pq));
      imag(mis(pq)) ];

%% supervisa la tolerancia
normF = norm(F, inf);

fprintf('\nmax( F(x%d) ) = %.2e\n', i, normF);

if normF < tol
    converged = 1;
    fprintf('\nConverged!\n');
end

%% realiza las iteraciones de Newton-Raphson
while (~converged & i < max_it)
    %% actualiza el contador de iteraciones
    i = i + 1;

    %% evalúa el Jacobiano
    [dSbus_dVm, dSbus_dVa] = dSbus_dV(Ybus, V);
    J = [
        imag(dSbus_dVa(pv, pv)), imag(dSbus_dVa(pv, pq)), real(dSbus_dVm(pv, pq));
        imag(dSbus_dVa(pq, pv)), imag(dSbus_dVa(pq, pq)), real(dSbus_dVm(pq, pq));
        real(dSbus_dVa(pq, pv)), real(dSbus_dVa(pq, pq)), imag(dSbus_dVm(pq, pq));
    ];
```



```

%% calcula el paso de actualización

dx =(J \ F);

%% actualiza voltaje
Va(pv) = Va(pv) + dx(j1:j2);
Va(pq) = Va(pq) + dx(j3:j4);

param1=j6-j4;
param1=ones(param1,1);
Vm(pq) = Vm(pq).*(param1+ dx(j5:j6));
V = Vm .* exp(j * Va);

%% evalúa F(x)
mis = (Sbus)-conj(conj(V) .* (Ybus * V));
F = [ real(mis(pv));
      real(mis(pq));
      imag(mis(pq)) ];

%% supervisa la convergencia
normF = norm(F, inf);
fprintf('\nmax( F(x%d) ) = %.2e', i, normF);

if normF < tol
    converged = 1;
    fprintf('\nConvergió en %d iteraciones.\n', i);
end
end

if ~converged
    fprintf('\nNo convergió en %d iteraciones.\n', i);
end

```

A.12. Código del programa *fpsoln.m*

```

function [bus, gen, rama,pot] = fpsoln(baseMVA, bus0, gen0, rama0, Ybus, Yf, Yt, V, ref, pv, pq);

%% constantes
j = sqrt(-1);
i=0;
nl = size(rama0, 1);          %% numero de lineas

%%Carga indices
[PQ, PV, REF, BUS_I, BUS_TIPO, PD, QD, GS, BS, VM, VA, BASE_KV, VMAX, VMIN, CARGATIPO,
PArmo, QArmo] = indices_bus;
[GEN_BUS, PG, QG, VG, GEN_ESTATUS, RssGen, XssGen] = indices_gen;
[F_BUS, T_BUS, RAMA_R, RAMA_X, RAMA_B, TAP, SHIFT, RAMA_ESTATUS] = indices_rama;

bus      = bus0;
gen      = gen0;
rama    = rama0;

%%actualiza voltajes de buses
bus(:, VM) = abs(V);
bus(:, VA) = angle(V) * 180 / pi;

```




```

%%% informacion de generadores
on = find(gen(:, GEN_ESTATUS));
gbus = gen(on, GEN_BUS);
están conectados
n_gen=size(gbus);
refgen = find(gen(on, GEN_BUS) == ref);

%% Generadores en operacion
%% Buses a los cuales
% Cual es el generador de referencia

%%% calcula la potencia total inyectada

Sg =(V(gbus)) .* conj((Ybus(gbus, :) *(V))
gbusa=zeros(size(bus(:,BUS_I)));

for i=1:n_gen(1,1);
    if i==gbus(i,1)
        gbusa(gbus(i,1),1)=Sg(i,1);
    else
        gbusa(i,1)=0;
    end
end

for i=1:size(bus(:,BUS_I));
    if i == gbusa(i,1)
        Sn=(V(i)) .* conj(Ybus(i, :) * V)-bus(i,3)-(bus(i,4)*j);%sumatoria de potencias en los gen. + carga adicional
    else
        Sn=(V(i)) .* conj(Ybus(i, :) * V);
    end
    Sn1(i)=Sn;
end
Sgen=Sn1.'
assignin('base','Sgen',Sgen);

% actualiza Qg para todos los generadores
gen(:, QG) = zeros(size(gen, 1), 1);
gen(on, QG) = imag(Sg) * baseMVA + bus(gbus, QD);

% Matriz de ceros
%% inj Q + Qd local

% actualiza Pg para el gen de referencia
gen(on(refgen), PG) = real(Sg(refgen)) * baseMVA + bus(ref, PD);

%% inj P + Pd local

%%potencias de ramas
Sf =conj(V(rama(:, F_BUS))) .* (Yf* V) * baseMVA;
%potencia compleja inyectada a "from"
St =conj(V(rama(:, T_BUS))) .* (Yt * V) * baseMVA;
potencia compleja inyectada a "to" bus
pot(:, [1, 2, 3, 4]) = [real(Sf) imag(Sf) real(St) imag(St)];
return;

```

A.13. Código del programa *ds_bus_dv.m*

```
function [dSbus_dVm, dSbus_dVa] = dSbus_dV(Ybus, V)
```

```

j = sqrt(-1);
n = length(V);
Ibus = (Ybus * V);

```



```
if issparse(Ybus) %Version esparcida (si Ybus es esparcida)
    diagV = spdiags(V, 0, n, n);
    diagIbus= spdiags(Ibus, 0, n, n);
    diagVnorm = spdiags(V./abs(V), 0, n, n);
else %Version densa
    diagV = diag(V);
    diagIbus= diag(Ibus);
    diagVnorm = diag(V./abs(V));
end

dSbus_dVm = conj(diagV) * (conj(diagIbus) + conj(Ybus*(diag(V))));
dSbus_dVa = conj(diagV)*(diagIbus - (Ybus * diagV));
return;
```

A.14. Código del programa *bf.m*

```
function BF(V,bus,Ybus,ejecuta,baseMVA,gen, rama, farmo)

% Calculo de propagaciones armonicas
% barrido en frecuencia

[PQ, PV, REF, BUS_I, BUS_TIPO, PD, QD, GS, BS, VM, VA, BASE_KV, VMAX, VMIN, CARGATIPO,
PArmo, QArmo] = indices_bus;
nb = size(bus(:,1)); % numero de buses
sp=1;
fi=0; % frecuencia inicia
ff=30; % frecuencia final
finc=0.1; % incremento de la frecuencia
cont=0;
B=diag(Ybus);
%obtencion del tipo de carga utilizado en el estudio (cigre)
poscarg=find(bus(:,14));
tcarga=bus(poscarg(1),14);
tcargastr=int2str(tcarga);

for h=fi+finc:finc:ff
    [Ybus, Yf, Yt] = const_Ybusarmo(baseMVA, bus, rama, gen, h, V, sp,ejecuta);

    Zbus=inv(Ybus);
    cont=cont+1;
    Frec(cont)=h;
    Bf=diag(Zbus);
    B(:,cont)=Bf;
    Bfzequiv(:,cont)=Zbus(farmo(1,2),:);

end
a=['r','g','b','k','m','c','y'];
conteo=1;
figure(1)
for k=1:nb
    x=Frec';

    y=abs(B(bus(k,BUS_I,:)));
    if conteo>size(a)
```



```
    conteo=1;

end

str = int2str(bus(k,BUS_I));
str2=['nodo',str];
strresp(k,:)=str2;
plot(x,y,a(conteo,1));legend(strresp,-1);title(['Impedancia Driving Point,Utilizando el modelo de carga',...
    tcargastr]);xlabel('Armonico');ylabel('Magnitud [p.u.]');
hold on

    conteo=conteo+1;

end

%calculos y graficas de impedancias equivalente vistas desde los nodos
%de conexion de cargas armonicas hacia el resto de los nodos

%obtencion de parametros necesarios para graficar las impedancias
%equivalentes (proveniente del programa prueba)

for k=1:nb

    o=find(farmo(:,2)==k);
    carrvac=isempty(o); %no encuentra fuente?
    if carrvac==1
        ndscnlin=0;
        v(:,k)=ndscnlin; %no encuentra fuente =0
    else

        v(:,k)=k; %encuentra fuente

    end

end

posfarmo=find(v); %posicion de las fuentes armonicas
rang=size(v);

for k=1:rang(1,2) %crea un vector de 1's y 0's, si existe fuente o no
    if v(1,k)~=0
        nf1(k)=1;
    else
        nf1(k)=0;
    end
end
nfnlin=sum(nf1); %calculo del numero de fuentes

for k=1:nfnlin
    conteo=1;
    cont=0;
    strresp=[];
    str = int2str(posfarmo(1,k)); %captura nodo de conexion de carga armo
```



```
for h=fi+finc:finc:ff
    [Ybus, Yf, Yt] = const_Ybusarmo(baseMVA, bus, rama, gen, h, V, sp,ejecuta);
    Zbus=inv(Ybus);
    cont=cont+1;
    Bfzequiv(:,cont)=Zbus(posfarmo(1,k),:).';
end

figure(k+1);

for w=1:nb

    str2=['Z',str,'-Z',int2str(w)]; %forma la cadena para la leyenda
    stresp1(w,:)=str2;
    y2=abs(Bfzequiv(bus(w,BUS_I),:));

    if conteo>size(a)
        conteo=1;
    end
    plot(x,y2,a(conteo,1));legend(stresp1,-1);title(['Impedancia equivalente, Utilizando modelo de carga
',tcargastr]);xlabel('armonico');ylabel('Magnitud [p.u.]');
    hold on
    conteo=conteo+1;
end
end

return;
```

A.15. Código del programa *const_Ybusarmo.m*

```
function [Ybus, Yf, Yt] = const_Ybusarmo(baseMVA, bus, rama, gen, h, V, sp,ejecuta)

sp = 1;

% constantes
j = sqrt(-1);
nb = size(bus, 1);           % numero de buses
nl = size(rama, 1);         % numero de lineas
ng = size(gen, 1);          % numero de generadores

% define named indices into bus, rama matrices
[PQ, PV, REF, BUS_I, BUS_TIPO, PD, QD, GS, BS, VM, VA, BASE_KV, VMAX, VMIN, CARGATIPO,
PArmo, QArmo] = indices_bus;
[F_BUS, T_BUS, RAMA_R, RAMA_X, RAMA_B, TAP, SHIFT, RAMA_ESTATUS] = indices_rama;
[GEN_BUS, PG, QG, VG, GEN_ESTATUS, RssGen, XssGen] = indices_gen;

% Revision de la secuencia de numeracion de los buses
if any(bus(:, BUS_I) ~= [1:nb])
```



```
error('La numeracion de buses debe capturarse en secuencia')
end

%Inicio de la creacion de Ybus
f = rama(:, F_BUS);
                                % lista de buses "from"
t = rama(:, T_BUS);
                                %lista de buses "to"
stat = rama(:, RAMA_ESTATUS);
                                %Líneas cerradas
%disp('admitancias de los elementos de red');
Ys = stat ./ (rama(:, RAMA_R) + j*(h)* rama(:, RAMA_X));           %admitancia serie

Bc = stat .* rama(:, RAMA_B)* (h);
                                %susceptancia de la linea
%disp('impedancia de linea');
Zs=(rama(:, RAMA_R) + j*(h)* rama(:, RAMA_X)) ;
%disp('susceptancia total de linea Bc/2');
(rama(:, RAMA_B)* (h))/2;
tap = ones(nl, 1);

i = find(rama(:, TAP));

tap(i) = rama(i, TAP);

tap = tap .* exp(j*pi/180 * rama(:, SHIFT));           %suma cambios de fase

Ytt = Ys + (j*Bc/2);
Yff = Ytt .* (tap .* conj(tap));
Yft = -(Ys).* conj(tap);
Ytf = -(Ys).* tap;

% Construye Yf y Yt
if nargout > 1
    i = [[1:nl]'; [1:nl]'];

    if sp
                                                %Version esparcida
        Yf = sparse(i, [f; t], [Yff; Yft]);
        Yt = sparse(i, [f; t], [Ytf; Ytt]);
    else
                                                %Version llena
        Yf = zeros(nl, nb);
        Yt = zeros(nl, nb);
        Yf(i, [f; t]) = [Yff; Yft];
        Yt(i, [f; t]) = [Ytf; Ytt];
    end
end

end

Ys=zeros(nl,1);
if sp
                                % versión esparcida
    Ybus = spdiags(Ys, 0, nb, nb);
```



```
else
                                % versión densa
    Ybus = diag(Ys);
end

%suma los elementos de la diagonal
for i = 1:nl
    Ybus( f(i), f(i) ) = Ybus( f(i), f(i) ) + Yff(i);
    Ybus( f(i), t(i) ) = Ybus( f(i), t(i) ) + Yft(i);
    Ybus( t(i), f(i) ) = Ybus( t(i), f(i) ) + Ytf(i);
    Ybus( t(i), t(i) ) = Ybus( t(i), t(i) ) + Ytt(i);
end

vec_carg_arm=zeros(nb,1);
% Suma a YbusArmo los modelos de carga de cigre
for i=1:nb
    Tipo=bus(i, CARGATIPO);
    if V(bus(i, BUS_I))~=0 & bus(i, PD)~=0 & bus(i, QD)~=0
        if Tipo==1
            % i) Paralelo R-XL
            Vmag=abs(V(bus(i, BUS_I)));
            PDpu=(bus(i, PD)/baseMVA);
            PQpu=bus(i, QD)/baseMVA;
            R=Vmag^2/PDpu;
            Xl=j*(h)*Vmag^2/PQpu;
            YhCarga=((R+Xl)/(R*Xl));
            vec_carg_arm(i,1)=YhCarga;

            elseif Tipo==2
            % ii) Paralelo R-XL
            Vmag=abs(V(bus(i, BUS_I)));
            PDpu=(bus(i, PD)/baseMVA);
            PQpu=bus(i, QD)/baseMVA;
            k=0.1*(h)+0.9;
            R=Vmag^2/(k*PDpu);
            Xl=j*Vmag^2/(k*PQpu);
            YhCarga=(R+Xl)/(R*Xl);
            vec_carg_arm(i,1)=YhCarga;
            elseif Tipo==3
            % iii) Paralelo R-XL en serie con Xs
            Vmag=abs(V(bus(i, BUS_I)));
            PDpu=(bus(i, PD)/baseMVA);
            PQpu=bus(i, QD)/baseMVA;
            R=Vmag^2/PDpu;
            Xl=j*((h)*R)/(6.7*((PQpu/PDpu)-0.74));
            Xs=j*(h)*R*0.073;
            YhCarga=1/(((R*Xl)/(R+Xl))+Xs);
            vec_carg_arm(i,1)=YhCarga;
        end
    Ybus(bus(i, BUS_I),bus(i, BUS_I))=Ybus(bus(i, BUS_I),bus(i, BUS_I))+YhCarga;

end
end
```



```
% inclusión del modelo de capacitores para armonicos
for i=1:nb
    if V(bus(i, BUS_I))~=0 & bus(i, QD)~=0 & bus(i, BS)~=0

        Xc=-j*((bus(i,VM))^2/((h)*bus(i, BS)));
        Ybus(bus(i, BUS_I),bus(i, BUS_I))=Ybus(bus(i, BUS_I),bus(i, BUS_I))+(1/Xc);
        vec_carg_arm(i,1)=vec_carg_arm(i,1)+(1/Xc);

    end
end

% inclusión de la reactancia subsincrona de los generadores
for i=1:ng
    if gen(i, XssGen)~=0
        Xg=gen(i, RssGen)*sqrt(h)+j*(h)*gen(i, XssGen);
        Ybus(gen(i, GEN_BUS),gen(i, GEN_BUS))=Ybus(gen(i, GEN_BUS),gen(i, GEN_BUS))+(1/Xg);
        vv(i,1)=Xg;
        vec_carg_arm(i,1)=vec_carg_arm(i,1)+(1/Xg);

    end
end
str = int2str(h);
if ejecuta==1
    assignin('base',['vec_carg',str],vec_carg_arm);
end

return;
```

Programa de detección de un nodo con presencia de carga no lineal por reconocimiento de patrones del espectro armónico de magnitudes de voltaje basado en redes neuronales artificiales

A continuación se presenta el conjunto de programas involucrados en el algoritmo de detección de nodos con presencia de una carga armónica. El funcionamiento del algoritmo se introduce en formato de diagramas de bloques, donde cada bloque representa un programa realizado en el programa computacional MATLAB ver. 6.5.

En la Figura B.1 se aprecian las rutinas principales que definen el funcionamiento del método. El bloque *impres_mediciones.m* es un programa, en el cuál, en su código fuente se incorporan rutinas de formación de matrices de datos del espectro armónico de voltaje para todos los nodos del sistema eléctrico, y para cada conectividad de la carga no lineal en todos los nodos para una condición de carga en específico. La operación del bloque *red_principal.m* consiste en cargar los archivos de datos de las redes neuronales entrenadas para cada nodo, y finalmente con una sentencia de selección de acuerdo al número de nodo introducido, se ejecuta la red entrenada para éste nodo, y esta realiza el cálculo de salida. En la Figura B.2 se aprecia la operación del algoritmo en diagramas de bloques.

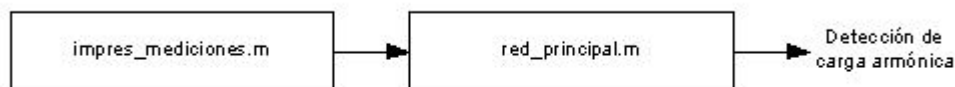


Figura B.1 Secuencia principal de programas del método de detección por reconocimiento de patrones

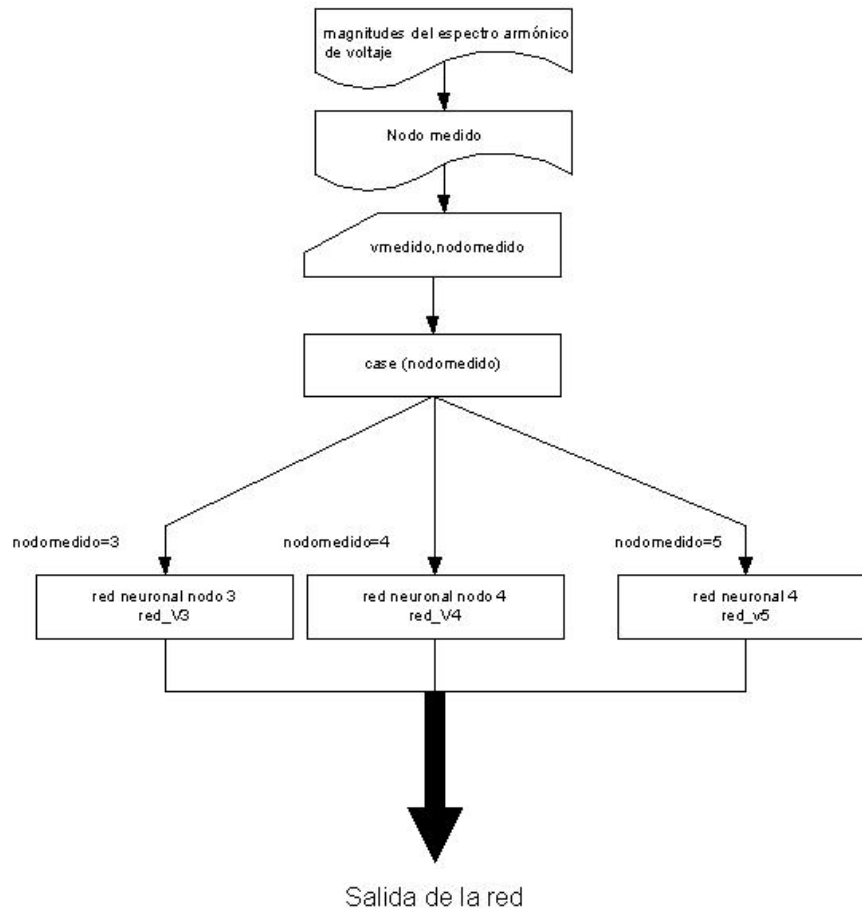


Figura B.2 Secuencia de ejecución del programa red_principal.m

El programa impres_mediciones.m se utiliza como rutina de creación de matrices de datos del espectro armónico de voltajes para todos los nodos. Este programa fue utilizado en la realización de las pruebas. La información requerida por el programa se obtiene de simulaciones previas, llevadas a cabo con el programa de análisis de penetración de armónicos. Las matrices generadas son: nodo3, nodo4 y nodo5, que representan el nodo donde la carga no lineal está conectada, y cada una de éstas matrices tiene una dimensión de (5×8) , las filas representan a los nodos y las columnas el armónico en estudio [5,7,11,13,17,19,23,25].

B.1 Código del programa *Impres_mediciones.m*

- %CARGA ARCHIVOS DE DATOS
- clc
-
- N3=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\1fuente\datosq3p');
- N4=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\1fuente\datosq4p');
- N5=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\1fuente\datosq5p');
-



```
▪ %GENERA LOS MATRICES DE DATOS
▪
▪ %presenta formato de datos
▪ disp('filas= nodos')
▪ disp('columnas=armonicos 5,7,11,13,17,19,23,25')
▪
▪ %nodo 3
▪ nodo35=N3.Vpolar5;
▪ nodo37=N3.Vpolar7;
▪ nodo311=N3.Vpolar11;
▪ nodo313=N3.Vpolar13;
▪ nodo317=N3.Vpolar17;
▪ nodo319=N3.Vpolar19;
▪ nodo323=N3.Vpolar23;
▪ nodo325=N3.Vpolar25;
▪ nodo3=[nodo35(:,2),nodo37(:,2),nodo311(:,2),nodo313(:,2),nodo317(:,2),nodo319(:,2),nodo323(:,2),nodo
325(:,2)]
▪
▪ %nodo 4
▪ nodo45=N4.Vpolar5;
▪ nodo47=N4.Vpolar7;
▪ nodo411=N4.Vpolar11;
▪ nodo413=N4.Vpolar13;
▪ nodo417=N4.Vpolar17;
▪ nodo419=N4.Vpolar19;
▪ nodo423=N4.Vpolar23;
▪ nodo425=N4.Vpolar25;
▪ nodo4=[nodo45(:,2),nodo47(:,2),nodo411(:,2),nodo413(:,2),nodo417(:,2),nodo419(:,2),nodo423(:,2),nodo
425(:,2)]
▪
▪ %nodo 5
▪ nodo55=N5.Vpolar5;
▪ nodo57=N5.Vpolar7;
▪ nodo511=N5.Vpolar11;
▪ nodo513=N5.Vpolar13;
▪ nodo517=N5.Vpolar17;
▪ nodo519=N5.Vpolar19;
▪ nodo523=N5.Vpolar23;
▪ nodo525=N5.Vpolar25;
▪ nodo5=[nodo55(:,2),nodo57(:,2),nodo511(:,2),nodo513(:,2),nodo517(:,2),nodo519(:,2),nodo523(:,2),nodo
525(:,2)]
```

El programa `red_principal`, es básicamente un programa que llama a una red neuronal, de acuerdo al número de nodo donde se obtienen los datos, por lo tanto es necesario introducir el número de nodo del sistema eléctrico, así como el espectro armónico de magnitudes de voltaje.

B.2 Código del programa *Red_principal.m*

```
%PROGRAMA QUE PREDICE EL NODO CON CARGA
%NO LINEAL CONECTADA, INTRODUCIENDO
%LOS VOLTAJES ARMONICOS MEDIDOS
```

```
N3=load(['C:\MATLAB6p5\work\corr_redes\proyec_final_red\sinvalidacion',...
```



```
'todosarmo3\red_V3\red_V3');
N4=load(['C:\MATLAB6p5\work\corr_redes\proyec_final_red\sinvalidacion',...
'todosarmo3\red_V4\red_V4');
N5=load(['C:\MATLAB6p5\work\corr_redes\proyec_final_red\sinvalidacion',...
'todosarmo3\red_v5\red_V5'];
disp('Los datos deben introducirse en un vector columna')
vmedido = input('introduce los voltajes medidos= ')
nodomedido = input('introduce el numero de nodo donde se realizan las mediciones= ')

%Escala el valor medido para las redes de cada nodo

maxvmedido=max(vmedido);
vmedidoesc=vmedido/maxvmedido
switch nodomedido
    case 3
        pescalado = sim(N3.red,vmedidoesc)

    case 4
        pescalado = sim(N4.red,vmedidoesc)

    case 5
        pescalado = sim(N5.red,vmedidoesc)

    otherwise
        disp('nodo no establecido en la base de datos')
        break
end
```

Los programas V3_allbuses_redneuro.m, V4_allbuses_redneuro.m y V5_allbuses_redneuro.m, son requeridos para el entrenamiento de las redes neuronales artificiales. El funcionamiento de los programas son similares entre ellos, con la única diferencia que cada uno utiliza datos concernientes a un nodo en específico donde la carga no lineal se encuentra conectada, y así de ésta manera se genera un archivo de datos de la red entrenada (red_V3, red_V4 y red_V5).

B.3 Código del programa V3_allbuses_redneuro.m

```
%PROGRAMA QUE ENTRENA A UNA RED NEURONAL
%PARA PATRONES DE VOLTAJE EN EL NODO 3 CON CARGA NO LINEAL
%CONECTADA EN LOS NODO 3,4 Y 5.
```

```
N3=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\1fuente\datos340');
N4=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\1fuente\datos440');
N5=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\1fuente\datos540');
```

```
farmo=[5 7 11 13 17 19 23 25]';
```

```
%Datos de voltaje nodo 3 con carga no lineal en nodo 5 conectada
yV35=[N5.Vpolar5(3,2);N5.Vpolar7(3,2);N5.Vpolar11(3,2);N5.Vpolar13(3,2);...
N5.Vpolar17(3,2);N5.Vpolar19(3,2);N5.Vpolar23(3,2);N5.Vpolar25(3,2)];
maxyV35=max(yV35)
yV35=yV35/maxyV35
```

```
%Datos de voltaje nodo 5 con carga no lineal en nodo 4 conectada
```



```
yV34=[N4.Vpolar5(3,2);N4.Vpolar7(3,2);N4.Vpolar11(3,2);N4.Vpolar13(3,2);...  
      N4.Vpolar17(3,2);N4.Vpolar19(3,2);N4.Vpolar23(3,2);N4.Vpolar25(3,2)];
```

```
maxyV34=max(yV34)
```

```
yV34=yV34/maxyV34
```

```
%Datos de voltaje nodo 5 con carga no lineal en nodo 3 conectada
```

```
yV33=[N3.Vpolar5(3,2);N3.Vpolar7(3,2);N3.Vpolar11(3,2);N3.Vpolar13(3,2);...  
      N3.Vpolar17(3,2);N3.Vpolar19(3,2);N3.Vpolar23(3,2);N3.Vpolar25(3,2)];
```

```
maxyV33=max(yV33)
```

```
yV33=yV33/maxyV33
```

```
%REDES NEUORNALES
```

```
%Creacion del patron de entrenamiento
```

```
t=[1 0 0;0 1 0;0 0 1];
```

```
p=[yV33,yV34,yV35];
```

```
PR=[0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1];
```

```
S1=30; %tamaño capa de entrada
```

```
S2=50; %tamaño capa intermedia
```

```
S3=3; %tamaño capa de salida
```

```
S=[S1 S2 S3]; % Vector de tamaños de capas
```

```
ncapas=size(S);
```

```
FT={'logsig','logsig','logsig'};
```

```
BTF='traingdx';
```

```
BLF='learngdm';
```

```
PF='mse';
```

```
red = newff(PR,S,FT,BTF,BLF,PF); %Crea red neronal del tipo feed-forward
```

```
%Rutina que modifica las funciones de inicializacion
```

```
%de la red neuronal creada, utilizando la funcion "RANDS", que
```

```
%genera valores aleatorios en el rango de [-1 1]
```

```
red.initFcn='initlay';
```

```
for j=1:ncapas(1,2)
```

```
    red.layers{j}.initFcn='initwb';
```

```
end
```

```
red.inputweights{1,1}.initFcn='rands';
```

```
for j=2:ncapas(1,2)
```

```
    red.layerweights{j,j-1}.initFcn='rands';
```

```
end
```

```
red=init(red); %inicializa los pesos de la red
```

```
%Parametros de entrenamiento
```

```
ptr = [p(:,1),p(:,2),p(:,3)];
```

```
ttr = [t(:,1),t(:,2),t(:,3)];
```

```
%Almacena la configuracion original
```



```
%w1inic=red.IW{1,1}
%w2inic=red.LW{2,1}
%w3inic=red.LW{3,2}

%b1inic=red.b{1};
%b2inic=red.b{2};
%b3inic=red.b{3};

%Se copian datos almacenados a pesos y bias
%guardados previamente

%red.IW{1,1}=w1inic;
%red.LW{2,1}=w2inic;
%red.LW{3,2}=w3inic;

%red.b{1}=b1inic;
%red.b{2}=b2inic;
%red.b{3}=b3inic;

red.trainParam.epochs=1500;      % Numero maximo de iteraciones al entrenar
red.trainParam.goal=1e-3;        %precision a alcanzar
red.trainParam.lr= 0.05;         %razon de aprendizaje
red.trainParam.lr_inc=1.05;      %Relacion de incremento de la razon de aprendizaje
red.trainParam.lr_dec=0.70;     %Relacion de decremento en la razon de aprendizaje
red.trainParam.max_perf_inc=1.01; %Incremento maximo de desempeño
red.trainParam.mc=0.95;         %Constante de momento
red.trainParam.min_grad= 1e-6;   %Desempeño minimo del gradiente
red.trainParam.show=10;         %Entrenamiento mostrado entre cada iteracion
red.trainParam.time=360;        %Tiempo maximo de entrenamiento en segundos
[red,tr,Y,E,Pf,Af] = train(red,ptr,ttr); %Inicia entrenamiento

%w1fin=red.IW{1,1};
%w2fin=red.LW{2,1};
%w3fin=red.LW{3,2};

%b1fin=red.b{1};
%b2fin=red.b{2};
%b3fin=red.b{3};
```

B.4 Código del programa V4_allbuses_redneuro.m

```
%PROGRAMA QUE ENTRENA A UNA RED NEURONAL
%PARA PATRONES DE VOLTAJE EN EL NODO 4 CON CARGA NO LINEAL
%CONECTADA EN LOS NODO 3,4 Y 5.

N3=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\1fuente\datos340');
N4=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\1fuente\datos440');
N5=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\1fuente\datos540');

farmo=[5 7 11 13 17 19 23 25]';

%Datos de voltaje nodo 4 con carga no lineal en nodo 5 conectada
yV45=[N5.Vpolar5(4,2);N5.Vpolar7(4,2);N5.Vpolar11(4,2);N5.Vpolar13(4,2);...
      N5.Vpolar17(4,2);N5.Vpolar19(4,2);N5.Vpolar23(4,2);N5.Vpolar25(4,2)];
maxyV45=max(yV45)
```



```
yV45=yV45/maxyV45

%Datos de voltaje nodo 4 con carga no lineal en nodo 4 conectada
yV44=[N4.Vpolar5(4,2);N4.Vpolar7(4,2);N4.Vpolar11(4,2);N4.Vpolar13(4,2);...
      N4.Vpolar17(4,2);N4.Vpolar19(4,2);N4.Vpolar23(4,2);N4.Vpolar25(4,2)];
maxyV44=max(yV44)
yV44=yV44/maxyV44
%Datos de voltaje nodo 4 con carga no lineal en nodo 3 conectada
yV43=[N3.Vpolar5(4,2);N3.Vpolar7(4,2);N3.Vpolar11(4,2);N3.Vpolar13(4,2);...
      N3.Vpolar17(4,2);N3.Vpolar19(4,2);N3.Vpolar23(4,2);N3.Vpolar25(4,2)];
maxyV43=max(yV43)
yV43=yV43/maxyV43

%REDES NEUORNALES

%Creacion del patron de entrenamiento

t=[1 0 0;0 1 0;0 0 1];
p=[yV43,yV44,yV45];

PR=[0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1]

S1=30; %tamaño capa de entrada
S2=50;%tamaño capa intermedia
S3=3; %tamaño capa de salida

S=[S1 S2 S3]; % Vector de tamaños de capas
ncapas=size(S);
FT={'logsig','logsig','logsig'};
BTF='traingdx';
BLF='learnngdm';
PF='mse';
red = newff(PR,S,FT,BTF,BLF,PF); %Crea red neronal del tipo feed-forward
%Rutina que modifica las funciones de inicializacion
%de la red neuronal creada, utilizando la funcion "RANDS", que
%genera valores aleatorios en el rango de [-1 1]

red.initFcn='initlay';
for j=1:ncapas(1,2)
    red.layers{j}.initFcn='initwb';
end

red.inputweights{1,1}.initFcn='rands';
for j=2:ncapas(1,2)
    red.layerweights{j,j-1}.initFcn='rands';
end

end
red=init(red); %inicializa los pesos de la red

%Parametros de entrenamiento

ptr = [p(:,1),p(:,2),p(:,3)];
ttr = [t(:,1),t(:,2),t(:,3)];
```



```
%Almacena la configuracion original

%w1inic=red.IW{1,1}
%w2inic=red.LW{2,1}
%w3inic=red.LW{3,2}

%b1inic=red.b{1};
%b2inic=red.b{2};
%b3inic=red.b{3};

%Se copian datos almacenados a pesos y bias
%guardados previamente

%red.IW{1,1}=w1inic;
%red.LW{2,1}=w2inic;
%red.LW{3,2}=w3inic;

%red.b{1}=b1inic;
%red.b{2}=b2inic;
%red.b{3}=b3inic;

red.trainParam.epochs=1500;      % Numero maximo de iteraciones al entrenar
red.trainParam.goal=1e-3;        % precision a alcanzar
red.trainParam.lr= 0.05;         % razon de aprendizaje
red.trainParam.lr_inc=1.05;      % Relacion de incremento de la razon de aprendizaje
red.trainParam.lr_dec=0.70;      % Relacion de decremento en la razon de aprendizaje
red.trainParam.max_perf_inc=1.01; % Incremento maximo de desempeño
red.trainParam.mc=0.95;          % Constante de momento
red.trainParam.min_grad= 1e-10;  % Desempeño minimo del gradiente
red.trainParam.show=10;          % Entrenamiento mostrado entre cada iteracion
red.trainParam.time=360;         % Tiempo maximo de entrenamiento en segundos
[red,tr,Y,E,Pf,Af] = train(red,ptr,ttr);

%w1fin=red.IW{1,1};
%w2fin=red.LW{2,1};
%w3fin=red.LW{3,2};

%b1fin=red.b{1};
%b2fin=red.b{2};
%b3fin=red.b{3};
```

B.5 Código del programa V5_allbuses_redneuro.m

```
%PROGRAMA QUE ENTRENA A UNA RED NEURONAL
%PARA PATRONES DE VOLTAJE EN EL NODO 5 CON CARGA NO LINEAL
%CONECTADA EN LOS NODO 3,4 Y 5.

N3=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\1fuente\datos340');
N4=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\1fuente\datos440');
N5=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\1fuente\datos540');
```



```
farmo=[5 7 11 13 17 19 23 25]';
```

```
%Curva de voltaje nodo 5 con carga no lineal en nodo 5 conectada  
yV55=[N5.Vpolar5(5,2);N5.Vpolar7(5,2);N5.Vpolar11(5,2);N5.Vpolar13(5,2);...  
      N5.Vpolar17(5,2);N5.Vpolar19(5,2);N5.Vpolar23(5,2);N5.Vpolar25(5,2)];  
maxyV55=max(yV55)  
yV55=yV55/maxyV55
```

```
%Curva de voltaje nodo 5 con carga no lineal en nodo 4 conectada  
yV54=[N4.Vpolar5(5,2);N4.Vpolar7(5,2);N4.Vpolar11(5,2);N4.Vpolar13(5,2);...  
      N4.Vpolar17(5,2);N4.Vpolar19(5,2);N4.Vpolar23(5,2);N4.Vpolar25(5,2)];  
maxyV54=max(yV54)  
yV54=yV54/maxyV54
```

```
%Curva de voltaje nodo 5 con carga no lineal en nodo 3 conectada  
yV53=[N3.Vpolar5(5,2);N3.Vpolar7(5,2);N3.Vpolar11(5,2);N3.Vpolar13(5,2);...  
      N3.Vpolar17(5,2);N3.Vpolar19(5,2);N3.Vpolar23(5,2);N3.Vpolar25(5,2)];  
maxyV53=max(yV53)  
yV53=yV53/maxyV53
```

```
%REDES NEUORNALES
```

```
%Creacion del patron de entrenamiento
```

```
t=[1 0 0;0 1 0;0 0 1];  
p=[yV53,yV54,yV55];
```

```
PR=[0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1;0,1]
```

```
S1=30; %tamaño capa de entrada  
S2=50;%tamaño capa intermedia  
S3=3; %tamaño capa de salida
```

```
S=[S1 S2 S3]; % Vector de tamaños de capas  
ncapas=size(S);  
FT={'logsig','logsig','logsig'};  
BTF='traingdx';  
BLF='learnngdm';  
PF='mse';  
red = newff(PR,S,FT,BTF,BLF,PF); %Crea red neronal del tipo feed-forward  
%Rutina que modifica las funciones de inicializacion  
%de la red neuronal creada, utilizando la funcion "RANDS", que  
%genera valores aleatorios en el rango de [-1 1]
```

```
red.initFcn='initlay';  
for j=1:ncapas(1,2)  
    red.layers{j}.initFcn='initwb';  
end
```

```
red.inputweights{1,1}.initFcn='rands';  
for j=2:ncapas(1,2)  
    red.layerweights{j,j-1}.initFcn='rands';
```

```
end
```




```
red=init(red); %inicializa los pesos de la red

%Parametros de entrenamiento

ptr = [p(:,1),p(:,2),p(:,3)];
ttr = [t(:,1),t(:,2),t(:,3)];

%Almacena la configuracion original

%w1inic=red.IW{1,1}
%w2inic=red.LW{2,1}
%w3inic=red.LW{3,2}

%b1inic=red.b{1};
%b2inic=red.b{2};
%b3inic=red.b{3};

%Se copian datos almacenados a pesos y bias
%guardados previamente

%red.IW{1,1}=w1inic;
%red.LW{2,1}=w2inic;
%red.LW{3,2}=w3inic;

%red.b{1}=b1inic;
%red.b{2}=b2inic;
%red.b{3}=b3inic;

red.trainParam.epochs=1500;      % Numero maximo de iteraciones al entrenar
red.trainParam.goal=1e-3;       %precision a alcanzar
red.trainParam.lr= 0.05;        %razon de aprendizaje
red.trainParam.lr_inc=1.05;     %Relacion de incremento de la razon de aprendizaje
red.trainParam.lr_dec=0.70;    %Relacion de decremento en la razon de aprendizaje
red.trainParam.max_perf_inc=1.01; %Incremento maximo de desempeño
red.trainParam.mc=0.95;        %Constante de momento
red.trainParam.min_grad= 1e-10; %Desempeño minimo del gradiente
red.trainParam.show=10;        %Entrenamiento mostrado entre cada iteracion
red.trainParam.time=360;       %Tiempo maximo de entrenamiento en segundos
[red,tr,Y,E,Pf,Af] = train(red,ptr,ttr);
%w1fin=red.IW{1,1};
%w2fin=red.LW{2,1};
%w3fin=red.LW{3,2};

%b1fin=red.b{1};
%b2fin=red.b{2};
%b3fin=red.b{3};
```

Programa de detección de nodos con presencia de cargas no lineales utilizando el método de variación monoparamétrica

A continuación se presenta el conjunto de programas involucrados en el algoritmo de detección de nodos con presencia de carga o cargas armónicas. Éste algoritmo se plasma inicialmente en formato de diagramas de bloques, donde cada bloque representa un programa realizado en el programa computacional MATLAB ver. 6.5.

En la Figura C. 1 se aprecian las rutinas principales que definen el funcionamiento del método. El bloque *gen_datos_clases3.m* es un programa principal que en su código fuente se incorporan rutinas de llamado a otros programas (Figura C. 2). El bloque *discriminador2.m* es el programa encargado de aplicar el método de detección. A continuación se presentan en forma de lista éstos programas y la descripción básica de su funcionamiento, así como de forma posterior los códigos de los programas citados.

- **gen_datos_clases3.m:** Programa que ejecuta rutinas de llamado a otros programas, con el objetivo de generar el conjunto de datos de entrada al programa de detección a partir de simulaciones de penetración de armónicos.
- **discriminador2.m:** Programa de detección de nodos con presencia de cargas armónicas.
- **datos_metvarmono.m:** Carga archivos de simulaciones de penetración de armónicos realizados previamente para una fuente no lineal, y cálculos con los datos para la formación de datos de parámetros eléctricos.
- **trat_se3.m:** Escalamiento de datos calculados en *datos_met_varmono.m* y *datos_metvarmono2f.m*.
- **datos_metvarmono2f.m:** Carga archivos de simulaciones de penetración de armónicos realizados previamente para dos fuentes no lineales, y cálculos con los datos para la formación de datos de parámetros eléctricos.

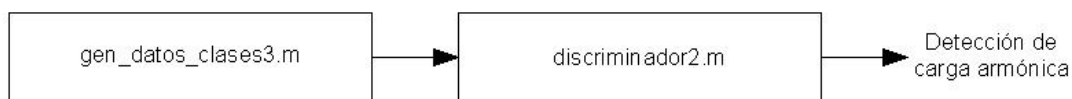


Figura C. 1 Secuencia principal de programas del método de variación monoparamétrica

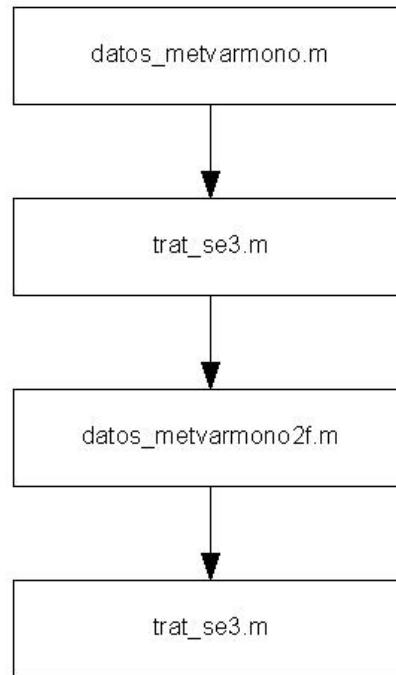


Figura C. 2 Secuencia de ejecución de rutinas auxiliares del método de variación monoparamétrica

El programa `gen_datos_clases3.m` se utiliza como rutina principal en la formación del conjunto de datos, que utiliza el algoritmo de detección. Para llevar a cabo la ejecución de éste programa es necesario contar con tres archivos de simulación de penetración de armónicos, cuya diferencia entre ellos sea la variación de potencia de la carga armónica.

C.1 Código del programa `gen_datos_clases3.m`

```
function gen_datos_clases
clc
clear all

%RUTINA PARA 1 FUENTE
datos_metvarmono
trat_se3
disp('si selecciona "S" no se eliminaran automaticamente las figuras')
pregunta=input('Desea guardar las imagenes? S/N','s');
if pregunta=='S'|pregunta=='s'
    pause
else
    close (figure(1))
    close (figure(2))
    close (figure(3))
    close (figure(4))
    close (figure(5))
    close (figure(6))
end
```



```
end
assignin('base','escVarmo1f',escVarmo);
assignin('base','escIarmo1f',escIarmo);
assignin('base','escIfun1f',escIfun);
assignin('base','medV51f',medV5);
assignin('base','medI51f',medI5);
assignin('base','medI11f',medI);
assignin('base','valmaxVaIaIf1fuente',valmaxVaIaIf);

%RUTINA PARA 2 FUENTES

datos_metvarmono2f
trat_se3
disp('si selecciona "S" no se eliminaran automaticamente las figuras')
pregunta=input('Desea guardar las imagenes? S/N','s');
if pregunta=='S'|pregunta=='s'
    pause
else
    close (figure(1))
    close (figure(2))
    close (figure(3))
    close (figure(4))
    close (figure(5))
    close (figure(6))
end
assignin('base','escVarmo2f',escVarmo);
assignin('base','escIarmo2f',escIarmo);
assignin('base','escIfun2f',escIfun);
assignin('base','medV52f',medV5);
assignin('base','medI52f',medI5);
assignin('base','medI12f',medI);
assignin('base','valmaxVaIaIf2fuente',valmaxVaIaIf);
```

El programa *datos_metvarmono.m* carga los tres archivos generados en el estudio armónico. Como característica principal de ésta rutina, es la que realiza las sumatorias de las corrientes de línea salientes de cada nodo, esto con el objetivo de calcular las corrientes nodales del sistema eléctrico de potencia, las corrientes calculadas corresponden a la corriente fundamental y corrientes armónicas. Los datos de voltaje armónico nodal se agrupan en un orden preestablecido. Los datos calculados en ésta rutina son:

- *PtemporalV*
- *TtemporalI*
- *Ifundnodal*

La matriz *PtemporalV* (datos de voltaje nodal armónico) la forman tres matrices internas. La estructura se muestra a continuación:

$$\begin{pmatrix} (5 \times 8) \\ (5 \times 8) \\ (5 \times 8) \end{pmatrix}$$



Donde cada matriz de dimensión (5x8) incluye los datos para una potencia específica, cuyo orden descendente corresponde a incrementos de potencia de la carga armónica de menor a mayor. Las filas de cada submatriz indican los nodos del sistema eléctrico, y las columnas los armónicos (5,7,11,13,17,19,23,25).

La matriz *TtemporalI* está formada de la misma forma que *PtemporalV*, pero ésta porta los datos de corrientes armónicas nodales.

La matriz *Ifundnodal* es una matriz de dimensión (5x3), donde las filas de la matriz indican los nodos del sistema eléctrico y las columnas en orden incremental los cambios de potencia de la carga armónica de menor a mayor variación.

C.2 Código del programa *datos_metvarmono.m*

```
N1=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\1fuente\datos41');
N2=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\1fuente\datos42');
N3=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\1fuente\datos43');

farmo=[5;7;;11;13;17;19;23;25];
longfarmo=size(farmo);
%Obtiene los valores de corriente a la frecuencia fundamental
%Para distintas capacidades de potencia 40-45 MVA
for k=1:3 %No. de Variaciones de carga
    nodoetiq=int2str(k);

    eval(['I1','=N',nodoetiq,'.IF(1,3)+' , 'N',nodoetiq,'.IF(2,3)']);
    disp('Nodo2')
    eval(['I2','=N',nodoetiq,'.IT(1,3)+' , 'N',nodoetiq,'.IF(3,3)+' , ...
        'N',nodoetiq,'.IF(4,3)+' , 'N',nodoetiq,'.IF(5,3)']);
    disp('Nodo3')
    eval(['I3','=N',nodoetiq,'.IT(2,3)+' , 'N',nodoetiq,'.IT(3,3)+' , ...
        'N',nodoetiq,'.IF(6,3)']);
    disp('Nodo4')
    eval(['I4','=N',nodoetiq,'.IT(6,3)+' , 'N',nodoetiq,'.IF(7,3)+' , ...
        'N',nodoetiq,'.IT(4,3)']);
    disp('Nodo5')
    eval(['I5','=N',nodoetiq,'.IT(5,3)+' , 'N',nodoetiq,'.IT(7,3);']);
    eval(['Ifundnodal(:,',nodoetiq,')=[I1;I2;I3;I4;I5];' ] );

end
Ifundnodalabs=abs(Ifundnodal);
clear I1,I2,I3,I4,I5;
for k=1:3 %no. de variaciones de carga
    nodoetiq=int2str(k);
    for j=1:longfarmo(1,1)
        etiqarmo=int2str(farmo(j,1));
        etiqlongarmo=int2str(j);
        disp(['Armonico ',etiqarmo])
    end
end
```



```

disp('Nodo1')
eval(['I1','=N',nodoetiq,'.Ifnodal',etiqarmo,'(1,3)+' ,N',nodoetiq,...
      '.Ifnodal',etiqarmo,'(2,3)']);
disp('Nodo2')
eval(['I2','=N',nodoetiq,'.Itnodal',etiqarmo,'(1,3)+' ,N',nodoetiq,...
      '.Ifnodal',etiqarmo,'(3,3)+' ,...
      'N',nodoetiq,'.Ifnodal',etiqarmo,'(4,3)+' ,N',nodoetiq,...
      '.Ifnodal',etiqarmo,'(5,3)']);
disp('Nodo3')
eval(['I3','=N',nodoetiq,'.Itnodal',etiqarmo,'(2,3)+' ,N',nodoetiq,...
      '.Itnodal',etiqarmo,'(3,3)+' ,...
      'N',nodoetiq,'.Ifnodal',etiqarmo,'(6,3)']);
disp('Nodo4')
eval(['I4','=N',nodoetiq,'.Itnodal',etiqarmo,'(6,3)+' ,N',nodoetiq,...
      '.Ifnodal',etiqarmo,'(7,3)+' ,...
      'N',nodoetiq,'.Itnodal',etiqarmo,'(4,3)']);
disp('Nodo5')
eval(['I5','=N',nodoetiq,'.Itnodal',etiqarmo,'(5,3)+' ,N',nodoetiq,...
      '.Itnodal',etiqarmo,'(7,3)']);
eval(['Iarmonodal',nodoetiq,'(:,',etiqlongarmo,')]=[I1;I2;I3;I4;I5];' ] );
eval(['Varmonodal',nodoetiq,'(:,',etiqlongarmo,')=N',nodoetiq,'.V',etiqarmo,...
      ';' ] ); %Almacenamiento de datos de voltaje
end
eval(['TtemporalI(',nodoetiq,',:)='{abs(Iarmonodal',nodoetiq,...
      ')}'); %cell array que contiene Iarmonodal(todos)
eval(['PtemporalV(',nodoetiq,',:)='{abs(Varmonodal',nodoetiq,...
      ')}'); %cell array que contiene Varmonodal(todos)
end

```

El programa *trat_se3.m* extrae los datos de la primera columna de las matrices *TtemporalI* y *PtemporalV* (5to. armónico) para formar matrices temporales. La matriz de datos de corriente nodal armónica es transformada a valores absolutos y se forma una matriz temporal con éstos nuevos datos. A las matrices temporales se le extrae el máximo valor de cada columna y se divide cada columna por su respectivo máximo determinado. Las matrices resultantes de estas operaciones son:

- *escVarmo* (matriz de voltajes armónicos nodales)
- *esclarmo* (matriz de corrientes armónicas nodales)
- *esclfun* (matriz de corrientes fundamentales nodales)

Como herramienta adicional, en ésta rutina se generan gráficas de $V_5 - I_5$ y $I_5 - I_1$ con los datos calculados.

C.3 Código del programa *trat_se3.m*

```

nodoini=3;
nodofin=5;
j=1;

```



```
for n=nodoini:nodofin

    V1=PtemporalV{1,1}(n,1);
    V2=PtemporalV{2,1}(n,1);
    V3=PtemporalV{3,1}(n,1);
    V5=[V1;V2;V3];
    medV5(:,j)=[V1;V2;V3];
    I1=TtemporalI{1,1}(n,1);
    I2=TtemporalI{2,1}(n,1);
    I3=TtemporalI{3,1}(n,1);
    I5=[I1;I2;I3];
    medI5(:,j)=[I1;I2;I3];
    clear I1,I2,I3,I4
    I1=Ifundnodalabs(n,1);
    I2=Ifundnodalabs(n,2);
    I3=Ifundnodalabs(n,3);
    I=[I1;I2;I3];
    medI(:,j)=[I1;I2;I3];
    maxIarmo=max(I5);
    maxVarmo=max(V5);
    maxIfun=max(I);
    valmaxIarmo(j,:)=maxIarmo;
    valmaxVarmo(j,:)=maxVarmo;
    valmaxIfun(j,:)=maxIfun;
    %Escalado en P.u
    escVarmo(:,j)={V5./maxVarmo};
    esclarmo(:,j)={I5./maxIarmo};
    esclfun(:,j)={I./maxIfun};
    j=j+1;
    clear V5,I5,I,maxVarmo,maxIarmo,maxIfun
end
valmaxVaIaIf=[valmaxVarmo,valmaxIarmo,valmaxIfun];
%GRAFICADO
%""""Escalado en el rango de 0-1 con respecto al maximo del vector""""
numnodosest=3;
numgraf=numnodosest*2;

%V5 vs I5

j=1;
for g=1:2:numgraf
    nodocadena=int2str(nodoini);
    figure(g)
    stem_handles(:,1)=stem(escIarmo{1,j}(1,1),escVarmo{1,j}(1,1),'fill','r');
    hold on
    stem_handles(:,2)=stem(escIarmo{1,j}(2,1),escVarmo{1,j}(2,1),'fill','b');
    stem_handles(:,3)=stem(escIarmo{1,j}(3,1),escVarmo{1,j}(3,1),'fill','g');
    xlim([0.00 1.0]);
    ylim([0.00 1.0]);
    legend_handles = [stem_handles(1,1);stem_handles(1,2);stem_handles(1,3)];
    legend(legend_handles,'1Mvar','2Mvar','3Mvar',2)
    ylabel('Volts en P.U');
    xlabel('Amperes en P.U');
    hold off
    clear stem_handles
    %I5 vs I1
```



```
figure(g+1)
stem_handles(:,1)=stem(escIfun{1,j}(1,1),esclarmo{1,j}(1,1),'fill','r');
hold on
stem_handles(:,2)=stem(escIfun{1,j}(2,1),esclarmo{1,j}(2,1),'fill','b');
stem_handles(:,3)=stem(escIfun{1,j}(3,1),esclarmo{1,j}(3,1),'fill','g');
xlim([0.00 1.0]);
ylim([0.00 1.0]);
legend_handles = [stem_handles(1,1);stem_handles(1,2);stem_handles(1,3)];
legend(legend_handles,'1Mvar','2Mvar','3Mvar',2)
ylabel('Amperes en P.U');
xlabel('Amperes en P.U');
hold off
clear stem_handles
j=j+1;
nodoini=nodoini+1;
end
```

Al finalizar la primera ejecución de *trat_se3.m*, se crean las matrices *escVarmo1f*, *esclarmo1f*, *escIfun1f* y se crean en el espacio de trabajo del programa de cómputo utilizado. Posteriormente aparece en pantalla la petición de guardar las gráficas. Si se desea guardar, el programa permanece en pausa para poder hacer ésta actividad. Al terminar de guardar, y al presionar “Enter”, las figuras se eliminan de forma automática de manera similar ocurre si se selecciona no guardar.

Las características de éstas matrices generadas se muestran a continuación:

Las matrices *escVarmo1f*, *esclarmo1f* y *escIfun1f* tienen una dimensión de $((3 \times 1) \ (3 \times 1) \ (3 \times 1))$, donde cada submatriz representa cada nodo del sistema eléctrico, y a su vez cada fila de cada submatriz, en orden descendente a cambios de voltaje armónico nodal, corriente armónica nodal y corriente fundamental nodal, debido a cambios de potencia de la carga no lineal de menor a mayor capacidad.

El programa *datos_metvarmono2f.m* elabora el mismo proceso de cálculo que el de *datos_metvarmono.m*, con la única diferencia, que con mención al primero, éste llama a archivos de simulación con dos fuentes armónicas en el sistema eléctrico de potencia.

C.4 Código del programa *datos_metvarmono2f.m*

```
N1=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\2fuentes\datos351');
N2=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\2fuentes\datos352');
N3=load('C:\MATLAB6p5\work\armo_datos\sin_banco_cap\2fuentes\datos353');
farmo=[5;7;11;13;17;19;23;25];
longfarmo=size(farmo);
%Obtiene los valores de corriente a la frecuencia fundamental
%Para distintas capacidades de potencia 40-45 MVA
for k=1:3 %No. de Variaciones de carga
    nodoetiq=int2str(k);

    eval(['I1','=N',nodoetiq,'.IF(1,3)+'N',nodoetiq,'.IF(2,3)']);
```




```
disp('Nodo2')
eval(['I2','=N',nodoeti,'.IT(1,3)+' ,N',nodoeti,'.IF(3,3)+' ,...
      'N',nodoeti,'.IF(4,3)+' ,N',nodoeti,'.IF(5,3)']);
disp('Nodo3')
eval(['I3','=N',nodoeti,'.IT(2,3)+' ,N',nodoeti,'.IT(3,3)+' ,...
      'N',nodoeti,'.IF(6,3)']);
disp('Nodo4')
eval(['I4','=N',nodoeti,'.IT(6,3)+' ,N',nodoeti,'.IF(7,3)+' ,...
      'N',nodoeti,'.IT(4,3)']);
disp('Nodo5')
eval(['I5','=N',nodoeti,'.IT(5,3)+' ,N',nodoeti,'.IT(7,3)']);
eval(['Ifundnodal(:,nodoeti,)= [I1;I2;I3;I4;I5];' ] );

end
Ifundnodalabs=abs(Ifundnodal);
clear I1,I2,I3,I4,I5;
for k=1:3 %no. de variaciones de carga

nodoeti=int2str(k);
for j=1:longfarmo(1,1)
    etiarmo=int2str(farmo(j,1));
    etiqlongarmo=int2str(j);
    disp(['Armonico ',etiarmo])

disp('Nodo1')
eval(['I1','=N',nodoeti,'.Ifnodal',etiarmo,'(1,3)+' ,N',nodoeti,...
      '.Ifnodal',etiarmo,'(2,3)']);
disp('Nodo2')
eval(['I2','=N',nodoeti,'.Itnodal',etiarmo,'(1,3)+' ,N',nodoeti,...
      '.Ifnodal',etiarmo,'(3,3)+' ,...
      'N',nodoeti,'.Ifnodal',etiarmo,'(4,3)+' ,N',nodoeti,...
      '.Ifnodal',etiarmo,'(5,3)']);
disp('Nodo3')
eval(['I3','=N',nodoeti,'.Itnodal',etiarmo,'(2,3)+' ,N',nodoeti,...
      '.Itnodal',etiarmo,'(3,3)+' ,...
      'N',nodoeti,'.Ifnodal',etiarmo,'(6,3)']);
disp('Nodo4')
eval(['I4','=N',nodoeti,'.Itnodal',etiarmo,'(6,3)+' ,N',nodoeti,...
      '.Ifnodal',etiarmo,'(7,3)+' ,...
      'N',nodoeti,'.Itnodal',etiarmo,'(4,3)']);
disp('Nodo5')
eval(['I5','=N',nodoeti,'.Itnodal',etiarmo,'(5,3)+' ,N',nodoeti,...
      '.Itnodal',etiarmo,'(7,3)']);
eval(['Iarmonodal',nodoeti,'(:,',etiqlongarmo,')= [I1;I2;I3;I4;I5];' ] );
eval(['Varmonodal',nodoeti,'(:,',etiqlongarmo,')=N',nodoeti,...
      '.V',etiarmo,'; ' ] ); %Almacenamiento de datos de voltaje
end
eval(['TtemporalI(',nodoeti,')=','{abs(Iarmonodal',nodoeti,...
      ')}']; %cell array que contiene Iarmonodal(todos)
eval(['TtemporalV(',nodoeti,')=','{abs(Varmonodal',nodoeti,...
      ')}']; %cell array que contiene Varmonodal(todos)
```



end

Al terminar la ejecución del programa *gen_datos_clases3.m* se cuenta con la información necesaria para ejecutar el programa *discriminador2.m*, que es el cuál donde se programó el algoritmo de detección de nodos contaminados, a continuación se presenta el diagrama de flujo del mencionado programa y posteriormente aparece el código fuente del mismo.

De forma inicial, al ejecutar el programa *discriminador2.m*, éste realiza la petición si se introducen los datos de simulaciones de armónicos de una o dos fuentes. La siguiente petición se refiere el número de nodos y así como el número inicial de los nodos del sistema. Posteriormente se organizan los datos para lograr un manejo de ellos. Los parámetros eléctricos ya organizados, se comparan entre sí ($V_5 - I_5$) y se obtiene el error absoluto de ellos y se comparan con un valor de error preestablecido. Cada dato comparado (correspondiente a un nodo) se marca con un valor de 0 o 1, dependiendo si cumplen o cumplen la condición. Como herramienta adicional se incorpora en éste programa una rutina de graficado, esto con el fin de comparar la deducción final del programa con las gráficas.

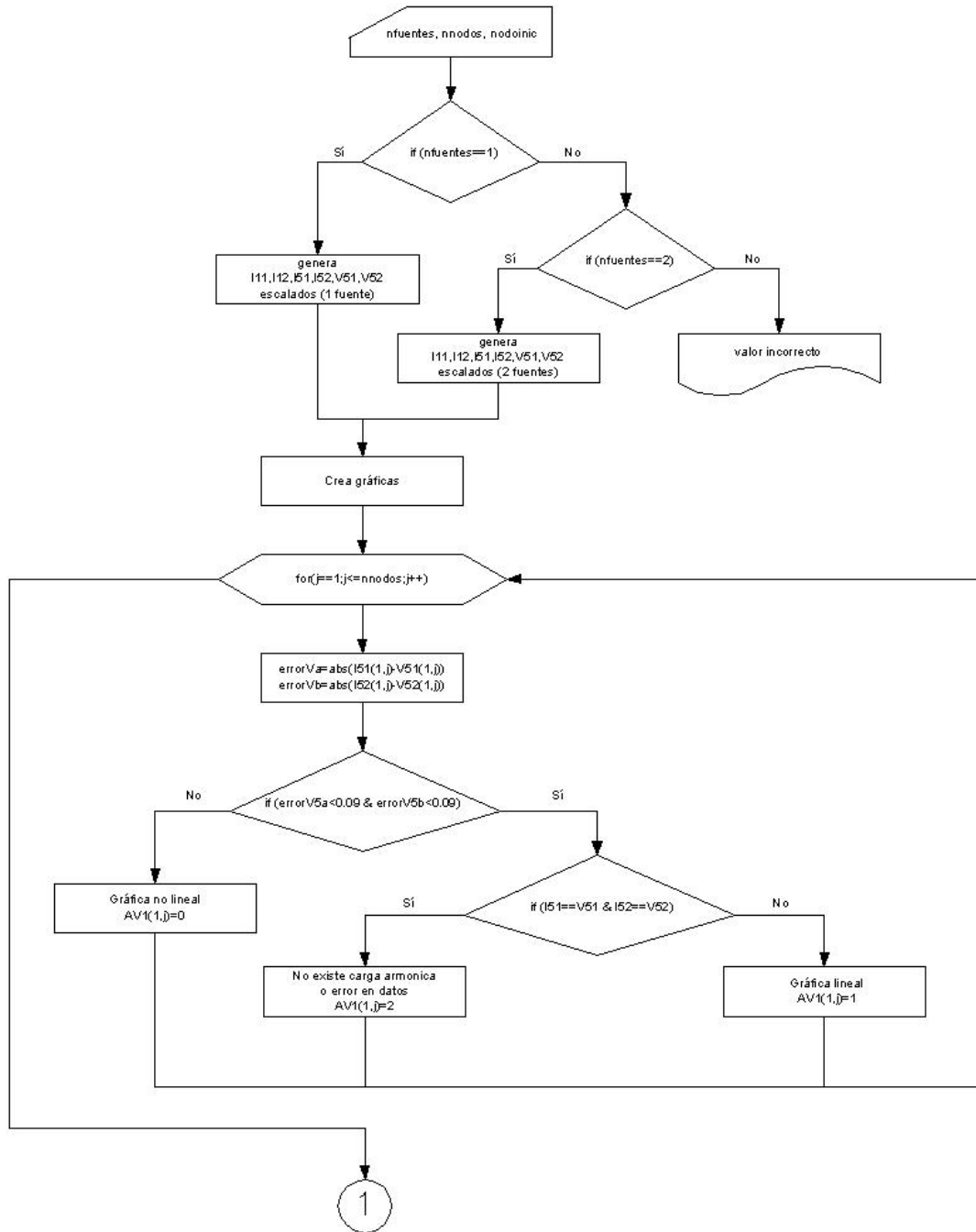


Figura C. 3 Diagrama de flujo del algoritmo de detección de nodos armónicos utilizando el método de variación monoparamétrica 1-7

Se realiza el análisis del vector que contiene las etiquetas de linealidad o no linealidad, dependiendo de éstos estados se habilitan dos permisos para identificar si existe una o un número mayor de fuentes armónicas. Para protección del programa contra datos incorrectos, se incorpora un comparador. Si no se cumple con ésta condición se detiene la ejecución del programa, y si los datos cumplen con la condición se comparan los permisos de número de fuentes. Si el permiso de

numero de fuentes mayores a uno se cumple, se realiza una comparación de los datos, y se marcan éstos en una nueva matriz, con 0's y 1's, el primero para gráfica no lineal y el segundo para su contrario.

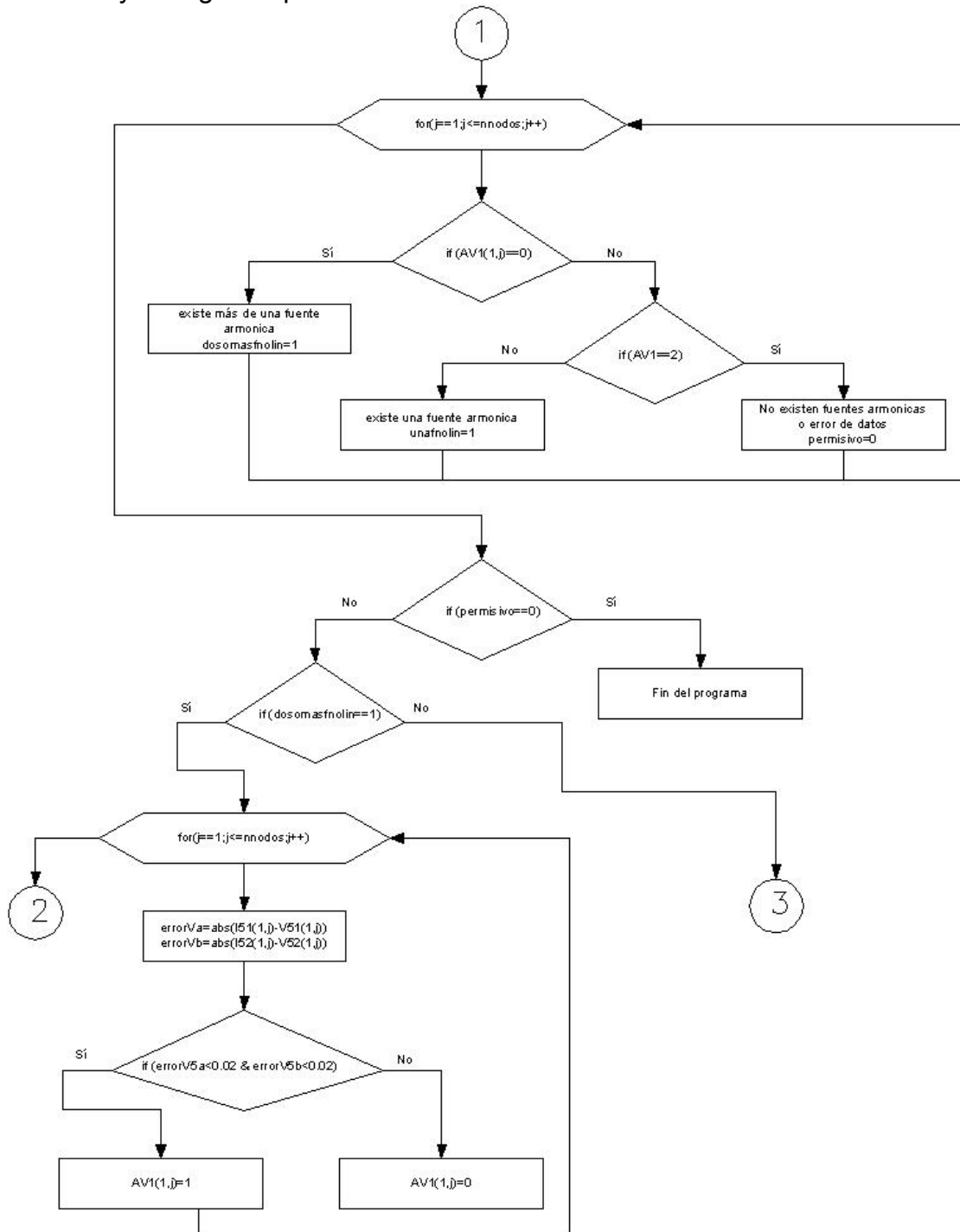


Figura C. 4 Diagrama de flujo del algoritmo de detección de nodos armónicos utilizando el método de variación monoparamétrica 2-7

Debido a que en las gráficas $V_5 - I_5$ se aprecia que los nodos pasivos el comportamiento de los datos escalados son muy cercanos a la linealidad, y los nodos activos no lo son, se propone una restricción de búsqueda de nodos pasivos. Esto para determinar si el valor de restricción de comportamiento lineal se encuentra o no en un valor muy pequeño, y debido a esto podría suceder que no se detecte ningún nodo pasivo. Si se puede apreciar de forma visual en las gráficas de $V_5 - I_5$ que ningún nodo se comporta de forma muy aproximada a la lineal, el programa está detectando que ningún nodo del sistema está libre de cargas armónicas, entonces el programa da la opción de continuar con el análisis aunque no se haya encontrado un nodo pasivo. Si se determina de forma gráfica-visual que existe al menos un nodo con comportamiento casi lineal, entonces se ajusta el valor de restricción a un valor mayor (recomendado que no supere el 0.09), ya que puede verse en la Figura C. 4 que éste valor está programado para 0.02 y proporciona buenos resultados (como puede verse en el capítulo 3 en pruebas del método de variación monoparamétrica).

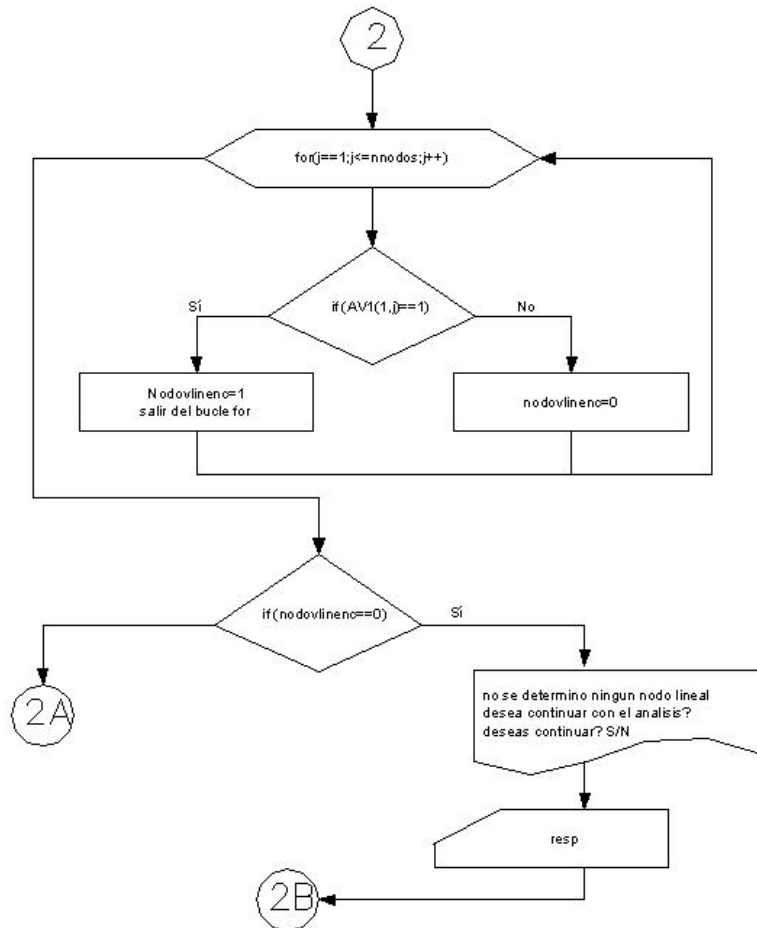


Figura C. 5 Diagrama de flujo del algoritmo de detección de nodos armónicos utilizando el método de variación monoparamétrica 3-7

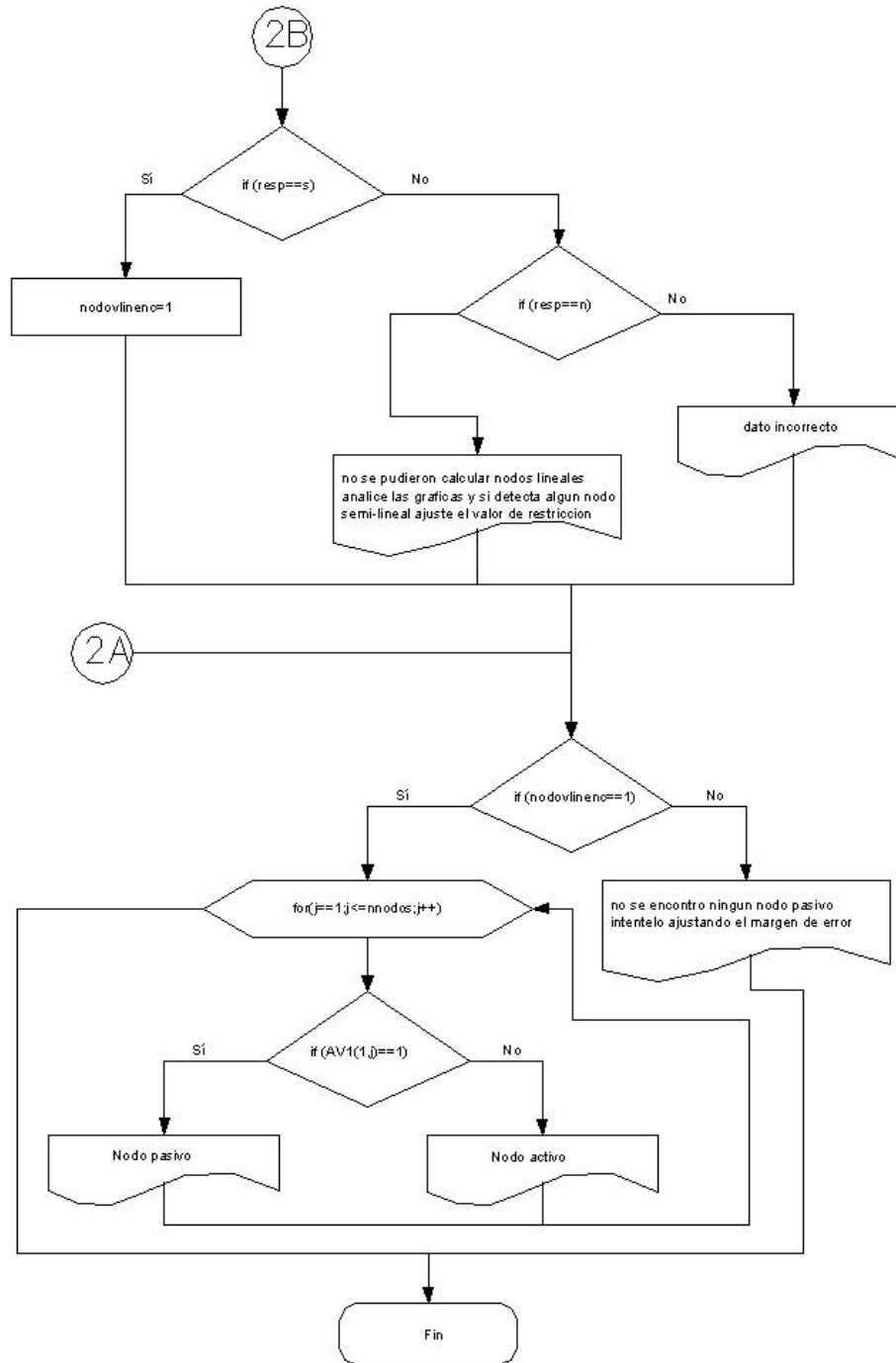


Figura C. 6 Diagrama de flujo del algoritmo de detección de nodos armónicos utilizando el método de variación monoparamétrica 4-7

Si no se encuentra ningún nodo cuyo comportamiento $V_5 - I_5$ sea aproximado a la linealidad (error 0.09), entonces se determina que en el sistema existe una sola fuente armónica representativa del disturbio. Entonces se realiza el análisis por



medio del error entre $I_5 - I_1$. Como el error inicial (programado) es muy grande, todas las comparaciones no cumplen ésta condición y éste error inicial se decrementa con pasos de 0.0001 mediante una función “while”, y como seguridad para no ciclarse la rutina, se inicia un contador de reloj. Si no se detecta ningún nodo activo en un tiempo estimado inicial de estudio de 10 segundos, aparece una petición de continuar o no con el estudio e introducir el tiempo adicional. La primera comparación (nodos del sistema eléctrico) que no cumpla con la condición de error (decremental), se la etiqueta como la carga no lineal, ya que por lo analizado en el capítulo 3, es la que presenta el mayor desplazamiento entre punto y punto del parámetro I_1 .

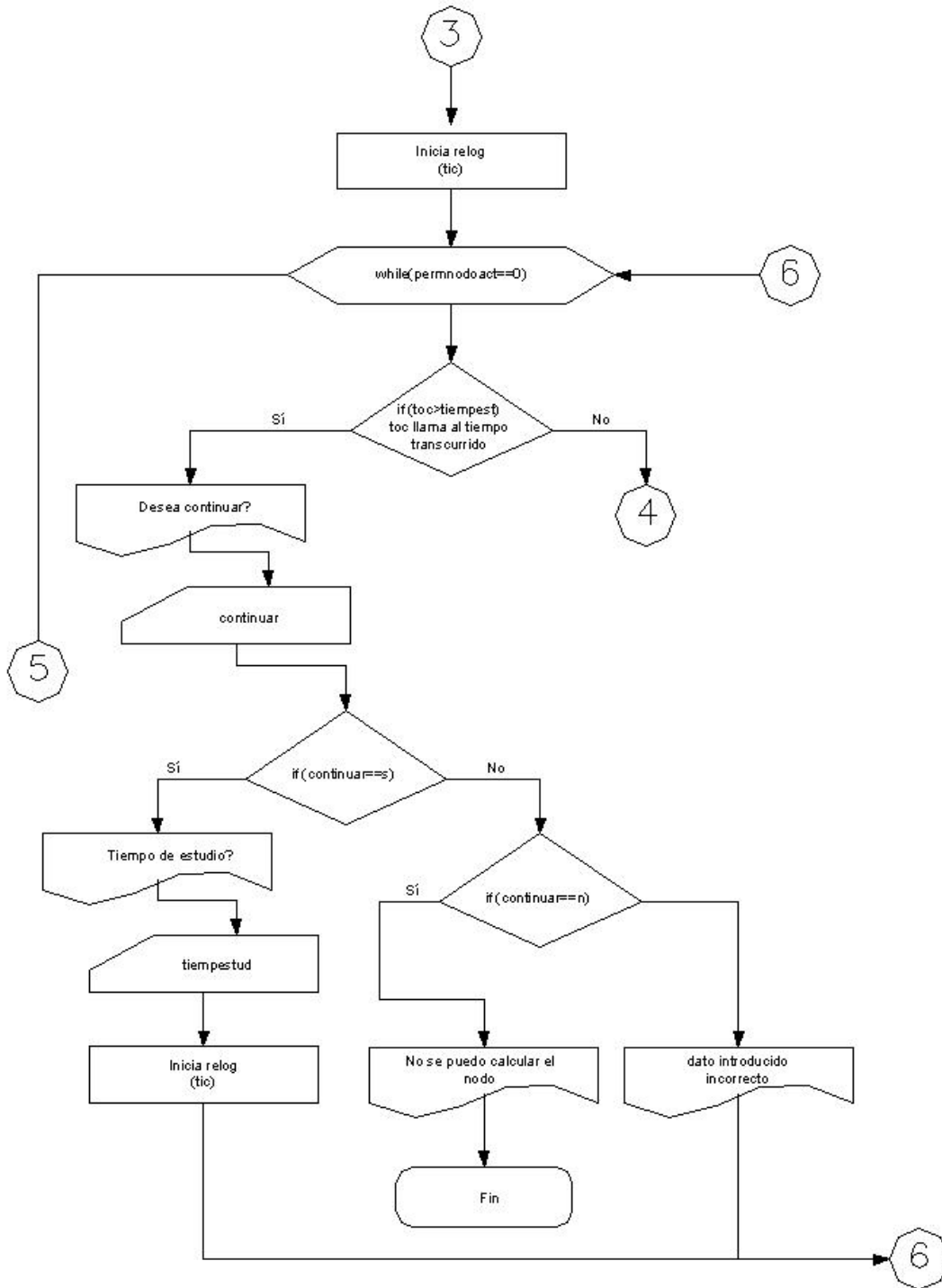


Figura C. 7 Diagrama de flujo del algoritmo de detección de nodos armónicos utilizando el método de variación monoparamétrica 5-7

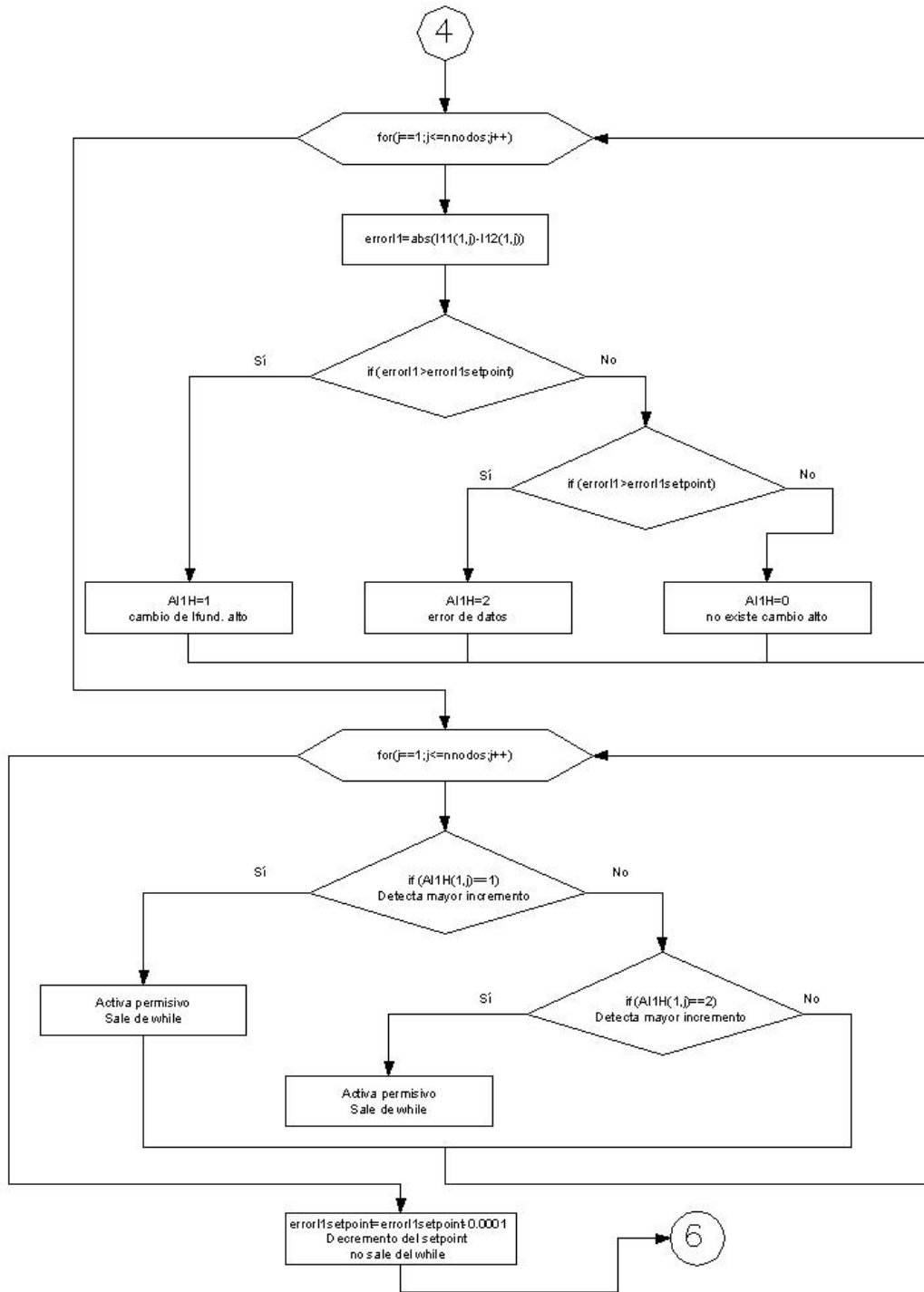


Figura C. 8 Diagrama de flujo del algoritmo de detección de nodos armónicos utilizando el método de variación monoparamétrica 6-7

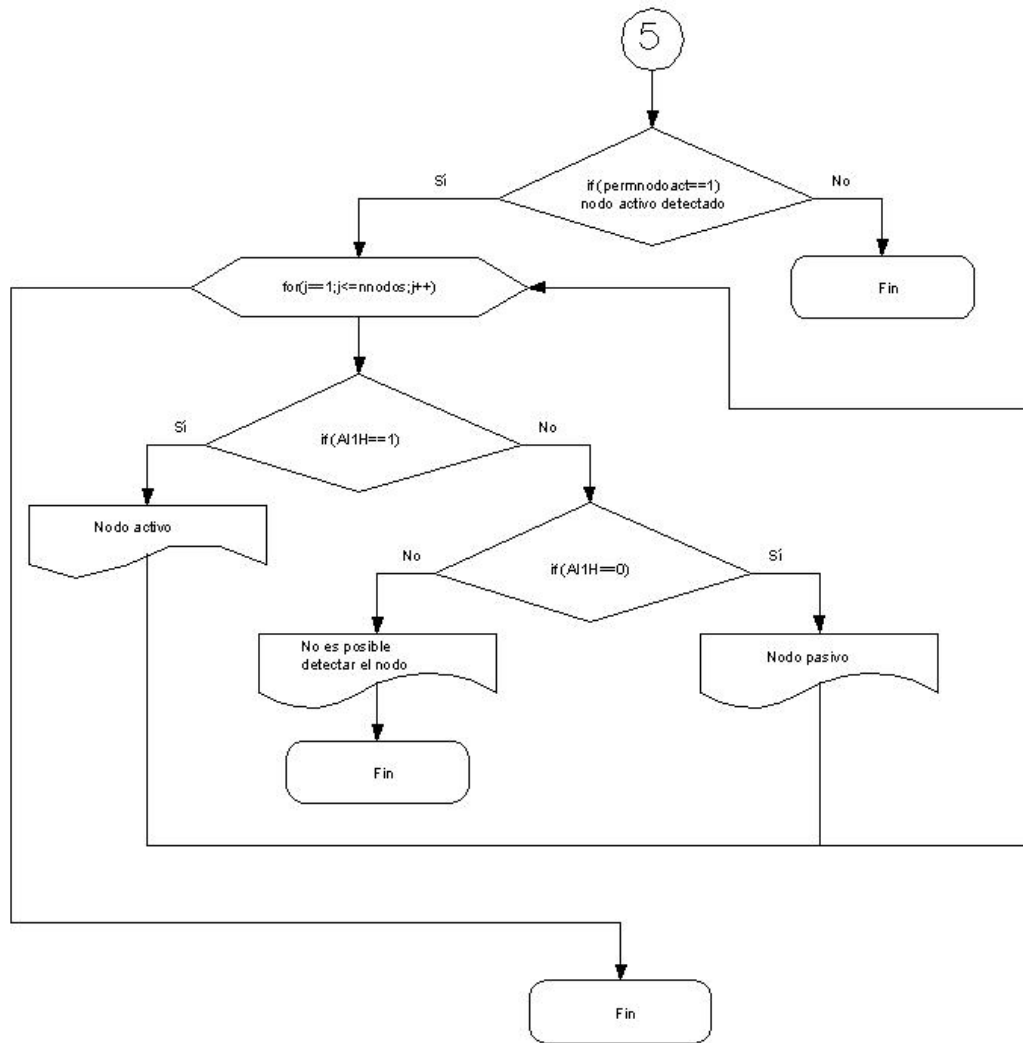


Figura C. 9 Diagrama de flujo del algoritmo de detección de nodos armónicos utilizando el método de variación monoparamétrica 7-7

C.5 Código del programa *discriminador2.m*

```
nfuentes= input(['introduce caso 1(1 fuente armonica)',...  
 'o 2(2 o mas fuentes armonicas)= '])  
nnodos= input('introduce el numero de nodos de analisis= ')  
nodoinic= input('introduce la numeracion inicial de nodos= ')  
nodofin=nodoinic+(nnodos-1);  
vecnodos=[3,4,5];  
tiempestud=10;  
error1setpoint=0.1; %set point inicial del error de la corriente fundamental  
permnodoact=0; %permisivo de encuentro de nodo armonico  
  
%Generacion de matriz de mediciones(para realizar la  
%deduccion de forma automatica
```



```
n=1;
if nfuentes==1
    for j=1:nnodos
        I11(1,j)=escIfun1f{1,n}(1,1);
        I12(1,j)=escIfun1f{1,n}(2,1);
        I51(1,j)=escIarmo1f{1,n}(1,1);
        I52(1,j)=escIarmo1f{1,n}(2,1);
        V51(1,j)=escVarmo1f{1,n}(1,1);
        V52(1,j)=escVarmo1f{1,n}(2,1);
        n=n+1;
    end
    disp('Valores medidos')
    medI1=medI11f
    medI5=medI51f
    medV5=medV51f
    disp('Valores escalados')
    medescI1=[I11;I12]
    medescI5=[I51;I52]
    medescV5=[V51;V52]

elseif nfuentes==2
    for j=1:nnodos
        I11(1,j)=escIfun2f{1,n}(1,1);
        I12(1,j)=escIfun2f{1,n}(2,1);
        I51(1,j)=escIarmo2f{1,n}(1,1);
        I52(1,j)=escIarmo2f{1,n}(2,1);
        V51(1,j)=escVarmo2f{1,n}(1,1);
        V52(1,j)=escVarmo2f{1,n}(2,1);
        n=n+1;
    end
    disp('Valores medidos')
    medI1=medI12f
    medI5=medI52f
    medV5=medV52f
    disp('Valores escalados')
    medescI1=[I11;I12]
    medescI5=[I51;I52]
    medescV5=[V51;V52]

else
    disp('el valor introducido es incorrecto a las opciones')
    break
end
```



```
numgraf=nnodos*2;

j=1;
for g=1:2:numgraf
    nodocadena=int2str(vecnodos(1,j));
    figure(g)
    stem_handles(:,1)=stem(I51(1,j),V51(1,j),'fill','r');
    hold on
    stem_handles(:,2)=stem(I52(1,j),V52(1,j),'fill','b');
    xlim([0.00 1.0]);
    ylim([0.00 1.0]);
    legend_handles = [stem_handles(1,1);stem_handles(1,2)];
    legend(legend_handles,'med. 1','med. 2',2)
    title(['Voltaje 5to. armonico Vs Corriente 5to. armonico Nodo ',nodocadena,'],'fontsize',15);
    ylabel('Volts en P.U','fontsize',14);
    xlabel('Amperes en P.U','fontsize',14);
    hold off
    clear stem_handles
    %I5 vs I1
    figure(g+1)
    stem_handles(:,1)=stem(I11(1,j),I51(1,j),'fill','r');
    hold on
    stem_handles(:,2)=stem(I12(1,j),I52(1,j),'fill','b');
    xlim([0.00 1.0]);
    ylim([0.00 1.0]);
    legend_handles = [stem_handles(1,1);stem_handles(1,2)];
    legend(legend_handles,'med. 1','med. 2',2)
    title(['Corriente 5to. armonico Vs Corriente fundamental Nodo ',nodocadena,'],'fontsize',15);
    ylabel('Amperes en P.U','fontsize',14);
    xlabel('Amperes en P.U','fontsize',14);
    hold off
    clear stem_handles
    j=j+1;
end

pregunta=input('Desea guardar las imagenes? S/N','s');
if pregunta=='S'|pregunta=='s'
    pause
else
    close (figure(1))
    close (figure(2))
    close (figure(3))
end
```



```
close (figure(4))
close (figure(5))
close (figure(6))
end

%Comprobacion de voltaje armonico Vs. Corriente armonica

for j=1:nodos
    errorV5a=abs(I51(1,j)-V51(1,j));
    errorV5b=abs(I52(1,j)-V52(1,j));
    if errorV5a<0.009 & errorV5b<0.009
        AV1(1,j)=1;
    elseif I51==V51 & I52==V52
        AV1(1,j)=2;

    else
        AV1(1,j)=0;

    end
end

dosomasfnolin=0;
permisivo=1;
unafnolin=0;

%permisivos para deduccion del problema unicamente con graficas
%de voltaje(2 o mas fuentes) o de corriente(1 fuente)
for j=1:nodos
    if AV1(1,j)==0
        dosomasfnolin=1;
    elseif AV1(1,j)==2
        permisivo=0;
    elseif AV1(1,j)==1;
        unafnolin=1;
    end
end

%Diagnostico de nodos utilizando los permisivos

if permisivo==0
    disp('No existe carga lineal o datos medidos incorrectos')
    break
else
    if dosomasfnolin==1
```



```
disp(' analisis mediante graficas V5 Vs. I5' )

for j=1:nnodos

    errorV5a=abs(I51(1,j)-V51(1,j));
    errorV5b=abs(I52(1,j)-V52(1,j));
    if errorV5a<0.02 & errorV5b<0.02
        AV1(1,j)=1;
    else
        AV1(1,j)=0;
    end

end

for j=1:nnodos
    if AV1(1,j)==1
        nodovlinenc=1;
        break
    else
        nodovlinenc=0;

    end
end
if nodovlinenc==1
    for j=1:nnodos
        cadenaj=int2str(vecnodos(1,j));
        if AV1(1,j)==1
            disp([cadenaj,' ' es un nodo pasivo ']);
        else
            disp([cadenaj,' ','es un nodo activo'])
        end
    end
else
    disp('no se encontro ningun nodo pasivo')
    disp('intentelo ajustando el margen de error')
end

else
disp(' analisis mediante graficas I5 Vs. I1')
clear AI1H
%Ejecuta el estudio mediante graficas de corrientes
tic

while permnodoact==0
```



```
t=toc;
if toc>tiempestud
    disp('no es posible establecer el nodo activo');
    disp('el valor actual del error es de= ');
    disp(errorI1);
    continuar=input('deseas continuar? S/N','s');

    if continuar=='S'|continuar=='s'
        tiempestud=input('tiempo de estudio (en segundos)= ');
        tic
    elseif continuar=='N'|continuar=='n'
        permnodoact==1
        disp('no se pudo calcular la carga armonica')
        break
    else
        disp('el dato introducido es incorrecto');
    end
else
    for j=1:nnodos
        %DECISION I5 Vs. I1 (HORIZONTAL)
        errorI1=abs(I11(1,j)-I12(1,j));

        %compara si el error excede de las condiciones para
        %diferenciar de las clases
        %Comprobacion horizontal
        if errorI1 >errorI1setpoint
            AI1H(1,j)=1;

            elseif I11(1,j)==I12(1,j)
                AI1H(1,j)=2;
            else
                AI1H(1,j)=0;
            end
        end
    end

    for j=1:nnodos
        if AI1H(1,j)==1
            permnodoact=1;
        elseif AI1H(1,j)==2
            permnodoact=1;
            break
        end
    end
end
errorI1setpoint=errorI1setpoint-0.0001;
```



```
    end

end

%diagnosticos
%I5 Vs.I1

if permnodoact==1
    disp('Deducción de I5 Vs. I1')
    for j=1:nodos
        cadenaj=int2str(vecnodos(1,j));

        if AI1H(1,j)==1
            disp(['cadenaj, '' es un nodo activo ']);

        elseif AI1H(1,j)==0
            disp(['cadenaj, '' es un nodo pasivo ']);
        else
            disp('no es posible deducir el nodo con carga armonica')
            break
        end
    end
end
end

end
end
```


Temas relacionados con el análisis de armónicas en los sistemas eléctricos

Los sistemas eléctricos de potencia convencionales son diseñados para operar con voltajes y corrientes senoidales. La generación eléctrica es normalmente producida a frecuencias constantes de 50 Hz o 60 Hz y la e.m.f de los generadores puede ser considerada prácticamente senoidal [3], sin embargo, cuando una fuente de voltaje senoidal es aplicada a una carga no lineal, se presenta una distorsión de la forma de onda del voltaje y corriente. En muchas ocasiones éste comportamiento puede asimilarse bastante bien a un funcionamiento en régimen permanente no senoidal del sistema completo [9].

El concepto de calidad de la energía es un índice en creciente importancia en los sistemas eléctricos, ya que la mayoría de los equipos conectados a la red están diseñados para trabajar con tensiones senoidales y los disturbios eléctricos pueden dar lugar a problemas de funcionamiento de estos equipos. Los disturbios eléctricos que afectan a la calidad de voltaje son los siguientes [12]:

Tabla An. 1 Categoría de disturbios eléctricos

Categoría	Duración	Magnitud
Transitorios		
Impulsos	<1ms	<8 p.u
oscilaciones	1ms-50ms	<8 p.u
Corta duración		
Depresiones (sags)	0.5-30 ciclos	0.1-0.9 p.u
Swell	0.5-30 ciclos	1.1-1.8 p.u
Larga duración		
Interupciones	>1 min	0.0 p.u
Voltajes bajos	>1 min	0.8-0.9 p.u
Sobre voltajes	>1 min	1.1-1.2 p.u
Estado estable		
Desbalances		0.5-2%
Armónicas	0-100 armónica	
Inter. armónicas	0-6 kHz	
Fluctuaciones	<25 Hz	

Los armónicos se definen usualmente como distorsiones de la onda de voltaje y/o corriente en estado estable periódico en sistemas de potencia [10], y la definición teórica de armónico, es el que es una oscilación senoidal cuya frecuencia es un número múltiplo de la frecuencia fundamental [11]. En la Figura An. 1 se muestra un

ejemplo gráfico de la influencia de los armónicos en la distorsión de la forma de onda de una señal en el dominio del tiempo.

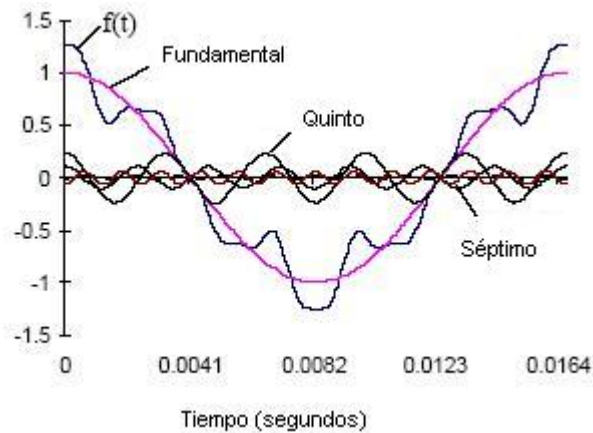


Figura An. 1 Síntesis de una forma de onda por armónicos

An.1 Análisis armónico

Para el estudio del fenómeno armónico, se parte de la descomposición de una forma de onda periódica distorsionada, usando diferentes frecuencias armónicas con diferentes amplitudes., éste proceso de descomposición es llamado análisis de Fourier. La teoría de Fourier prueba que cualquiera función periódica en un intervalo de tiempo puede ser representada por la suma de una fundamental y series de componentes armónicos de alto orden, cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la componente fundamental.

An.1.1 Series de Fourier

Sea la función $f(t)$ una función periódica de periodo T , la cual se puede representar por la serie trigonométrica [13,14]:

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + a_1 \cos \omega_0 t + a_2 \cos 2\omega_0 t + \dots + b_1 \text{sen} \omega_0 t + b_2 \text{sen} 2\omega_0 t + \dots \quad (\text{A. 1})$$

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_0 t + b_n \text{sen} \omega_0 t) \quad (\text{A. 2})$$

Donde:

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$$

Una serie como la presentada en la (A. 2) se llama serie trigonométrica de Fourier. Esta serie también puede presentarse así:

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \cos(n\omega_0 t - \theta_n) \quad (\text{A. 3})$$

$$\text{Donde: } C_0 = \frac{1}{2}a_0, \quad C_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \text{ y } \theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{b_n}{a_n}\right)$$

Observando la ecuación (A. 3) es obvio que la representación en series de Fourier de una función periódica, representa la función periódica como la suma de componentes senoidales que tienen diferentes frecuencias. La componente senoidal de frecuencia $\omega_n = n\omega_0$ se denomina la *enésima armónica* de la función periódica. La primera armónica comúnmente se conoce como la *componente fundamental* porque tiene el mismo periodo de la función y $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{2\pi}{T}$ se conoce como la *frecuencia angular fundamental*. Los coeficientes C_n y los ángulos θ_n se conocen como *amplitudes armónicas* y *ángulos de fase* respectivamente.

En muchas aplicaciones de las series de Fourier, es conveniente expresar éstas series en términos de los exponenciales complejos $e^{\pm jn\omega_0 t}$. Considerando (A. 2), donde $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$, y expresando el seno y el coseno en términos de los exponenciales como:

$$\cos n\omega_0 t = \frac{1}{2}(e^{jn\omega_0 t} + e^{-jn\omega_0 t}) \quad (\text{A. 4})$$

$$\text{sen}\omega_0 t = \frac{1}{2j}(e^{jn\omega_0 t} - e^{-jn\omega_0 t}) \quad (\text{A. 5})$$

Al sustituir (A. 4) y (A. 5) en (A. 2), se obtiene la forma compleja de la serie de Fourier de $f(t)$, o *serie compleja de Fourier*, como se muestra a continuación:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_0 t} \quad (\text{A. 6})$$

Donde:

$$C_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\omega_0 t} dt, \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (\text{A. 7})$$

**An.1.2 Funciones ortogonales**

Un conjunto de funciones $\phi_k(t)$ es ortogonal en un intervalo $a < t < b$ si para dos funciones cualesquiera $\phi_m(t)$ y $\phi_n(t)$ pertenecientes al conjunto $\phi_k(t)$, cumple:

$$\int_a^b \phi_m(t)\phi_n(t) dt = \begin{cases} 0 & \text{para } m \neq n \\ r_n & \text{para } m = n \end{cases} \quad (\text{A. 8})$$

Considérese, por ejemplo, un conjunto de funciones senoidales; mediante el cálculo elemental se puede demostrar que:

$$\int_{-T/2}^{T/2} \cos(m\omega_0 t) dt = 0 \quad \text{para } m \neq 0 \quad (\text{A. 9})$$

$$\int_{-T/2}^{T/2} \text{sen}(m\omega_0 t) dt = 0 \quad \text{para todo valor de } m \quad (\text{A. 10})$$

$$\int_{-T/2}^{T/2} \cos(m\omega_0 t)\cos(n\omega_0 t) dt = \begin{cases} 0, & m \neq n \\ T/2, & m = n \neq 0 \end{cases} \quad (\text{A. 11})$$

$$\int_{-T/2}^{T/2} \text{sen}(m\omega_0 t)\text{sen}(n\omega_0 t) dt = \begin{cases} 0, & m \neq n \\ T/2, & m = n \neq 0 \end{cases} \quad (\text{A. 12})$$

$$\int_{-T/2}^{T/2} \text{sen}(m\omega_0 t)\cos(n\omega_0 t) dt = 0 \quad \text{para todo valor de } m \text{ y } n \quad (\text{A. 13})$$

Donde: $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$

Estas relaciones demuestran que las funciones $\{1, \cos \omega_0 t, \cos 2\omega_0 t, \dots, \cos n\omega_0 t, \dots, \text{sen} \omega_0 t, \text{sen} 2\omega_0 t, \dots, \text{sen} n\omega_0 t, \dots\}$ forman un conjunto de funciones ortogonales en el intervalo $-T/2 < t < T/2$.

Utilizando las relaciones de ortogonalidad ((A. 9)-(A. 13)), se pueden evaluar los coeficientes a_0 , a_n y b_n de la serie de Fourier ((A. 2)). Estos son:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (\text{A. 14})$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt, \quad n = 0, 1, 2, \dots, \quad (\text{A. 15})$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (\text{A. 16})$$

An.1.3 Simetría de la forma de onda

El uso de las propiedades de simetría simplifica el cálculo de los coeficientes de Fourier. Estas propiedades se presentan a continuación:

Tabla An. 2 Simetría de formas de onda

$f(t)$	Condición	Ejemplo
par	$f(-t) = f(t)$	
impar	$f(-t) = -f(t)$	
simetría de media onda	$f(t) = -f\left(t + \frac{1}{2}T\right)$	

$f(t)$	Condición	Ejemplo
Cuarto de onda	Si $f(t)$ tiene simetría de media onda, y además es una función par o impar, entonces se dice que $f(t)$ tiene una <i>simetría de cuarto de onda par (a) o impar (b)</i> .	<p>(a)</p>
		<p>(b)</p>

Las simplificaciones en el cálculo de los coeficientes de Fourier mediante las propiedades descritas anteriormente se presentan en la Tabla An. 3:

Tabla An. 3 Simplificaciones en los cálculos de los coeficientes de Fourier

$f(t)$	Reducción	Definición
par	$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_0 t$ donde: $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ $a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt$	La función consta de una constante y de términos del coseno
impar	$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \text{senn}\omega_0 t$ donde: $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ $a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt$	La función consta de términos del seno solamente



$f(t)$	Reducción	Definición
simetría de media onda	$a_n = \begin{cases} 0 & \text{para } n \text{ par} \\ \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \cos(n\omega_0 t) dt & \text{para } n \text{ impar} \end{cases}$ $b_n = \begin{cases} 0 & \text{para } n \text{ par} \\ \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt & \text{para } n \text{ impar} \end{cases}$	La función consta de armónicas impares solamente
Cuarto de onda	$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_{2n-1} \cos[(2n-1)n\omega_0 t],$ <p>donde:</p> $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ $a_{2n-1} = \frac{8}{T} \int_0^{T/4} f(t) \cos[(2n-1)n\omega_0 t] dt$	La función consta de armónicos impares de términos del coseno solamente.
	$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_{2n-1} \text{sen}[(2n-1)n\omega_0 t],$ <p>donde:</p> $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$ $b_{2n-1} = \frac{8}{T} \int_0^{T/4} f(t) \text{sen}[(2n-1)n\omega_0 t] dt$	La función consta de armónicos impares de términos del seno solamente.

An.1.4 Transformada de Fourier

La transformada de Fourier de una función $x(t)$ se define como:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi fT} dt \quad (\text{A. 17})$$

O

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (\text{A. 18})$$

Y $x(t)$ es llamada la transformada inversa de Fourier de $X(f)$, la cuál está definida como:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi fT} df \quad (\text{A. 19})$$

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (\text{A. 20})$$

Donde: f =frecuencia

Las ecuaciones (A. 17)-(A. 22) son comúnmente llamadas el par de transformadas de Fourier, y son usadas para mapear cualquier función en el intervalo $(-\infty, \infty)$ en el dominio del tiempo o de la frecuencia a una función continua en el dominio inverso. La propiedad principal de la transformada de Fourier es la habilidad de examinar una función o forma de onda desde la perspectiva, ya sea en el dominio del tiempo o de frecuencia.

An.1.5 Transformada discreta de Fourier

Cuando el espectro en el dominio de la frecuencia y la función en el dominio del tiempo son ambas funciones periódicas muestreadas con N muestreos por periodo, (A. 17) y (A. 19) pueden ser representadas por el llamado par de transformadas discretas de Fourier (DFT) [15]:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-j2\pi kn/N}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (\text{A. 21})$$

Y la transformada inversa discreta de Fourier es:

$$x_n = 1/N \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi nk/N}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (\text{A. 22})$$

An.2 Efectos de la distorsión armónica

La mayoría de los equipos eléctricos son diseñados para operar con frecuencias de 50 o 60 Hz con una onda senoidal de voltaje – corriente sin distorsión. Cuando existen cargas no lineales conectadas en el sistema eléctrico que distorsionan la onda de voltaje, los dispositivos eléctricos presentan características de funcionamiento no deseables, que pueden repercutir en un mal funcionamiento, reducir el tiempo de vida útil o el daño permanente en los equipos. Con el propósito de ofrecer un panorama general de la problemática que puede presentarse con la existencia de distorsiones en la onda de voltaje en un sistema eléctrico, se presenta a continuación un compendio de los efectos que genera éste problema en los componentes eléctricos utilizados de forma más común.

An.2.1 Motores y generadores

Los efectos provocados por el fenómeno armónico en motores y generadores son los siguientes.

An.2.1.1 Sobrecalentamiento

Es el mayor efecto de voltajes y corrientes armónicas que se presenta en las máquinas rotatorias (inducción y síncrona), ya que existe un incremento en la temperatura debido a las pérdidas de acero y cobre a las frecuencias armónicas. Estos componentes armónicos afectan a la eficiencia, y también pueden afectar al torque desarrollado.

Para frecuencias mayores que la fundamental, los motores de inducción trifásicos pueden ser aproximados por impedancias derivación positiva/negativa [16]

$$Z_k = R_{devanado} + jkX'' \quad (\text{A. 23})$$

Donde $R_{devanado}$ es la resistencia del devanado del motor, y X'' es la reactancia subtransitoria a la frecuencia fundamental (típicamente 0.20 p.u sobre la base del motor). Ya que la mayoría de los motores están conectados en delta o Y sin aterrizar, los motores aparecen como circuitos abiertos a los armónicos de secuencia cero.

Asumiendo $X''=0.20$, una $R_{devanado}$ relativamente pequeña en comparación con kX'' , y el voltaje del 5to. armónico del 10%, la corriente del 5to. armónico inducido será de:

$$I_{5,rms} = \left| \frac{0.10}{5 \times 0.20} \right| = 0.10 \text{ p.u sobre la base del motor}$$

Así, los voltajes armónicos pueden crear corrientes adicionales en el rotor e incrementar las pérdidas $I^2 R_{devanado}$ en los motores trifásicos en un alto porcentaje. Usando la superposición, las pérdidas totales pueden ser expresadas como una suma de pérdidas armónicas individuales [17].

$$I^2 R = I_{60\text{Hz}}^2 R_{60\text{Hz}} + I_{300\text{Hz}}^2 R_{300\text{Hz}} + I_{420\text{Hz}}^2 R_{420\text{Hz}} + \dots \quad (\text{A. 24})$$

An.2.1.2 Incremento del ruido audible

Las corrientes armónicas en un motor pueden dar un incremento a la emisión de un mayor ruido audible comparado a las generadas por una excitación senoidal.

An.2.1.3 Oscilaciones mecánicas

Los armónicos pares, tales como el quinto y el séptimo, tienen el potencial de crear oscilaciones mecánicas en un sistema combinado turbina-generador o en motor-carga. Las oscilaciones mecánicas se presentan cuando torques oscilatorios, causados por la interacción entre las corrientes armónicas y el campo magnético a la frecuencia fundamental, excitan una frecuencia de resonancia mecánica. Por ejemplo, el quinto y séptimo armónico pueden combinarse para producir un estímulo torsional en el rotor del generador a la sexta frecuencia armónica. Si la frecuencia de resonancia mecánica se encuentra cerca de la frecuencia del estímulo eléctrico, fuerzas mecánicas estresantes pueden ser desarrolladas.

La Tabla An. 4 define los armónicos característicos derivados de un convertidor de seis pulsos e implica el efecto cuando es aplicado a las terminales de una máquina rotatoria. Cada voltaje armónico, el 5, 7, 11, etc., alimentará una correspondiente corriente armónica en el estator de la máquina. Cada una de éstos armónicos es una componente simétrica de secuencia positiva o negativa de la corriente total. Estas corrientes inducirán calor adicional en los devanados del estator, así sumándose al incremento de temperatura causado por la corriente fundamental.

Tabla An. 4 Armónicos de un convertidor de seis pulsos

Orden armónico	Frecuencia Hz	Secuencia de la red	Armónico del estator	Rotación Armónica	Armónico del rotor
1	60	+	1	Hacia adelante	-
5	300	-	5	Hacia atrás	6
7	420	+	7	Hacia adelante	6
11	660	-	11	Hacia atrás	12
13	780	+	13	Hacia adelante	12
17	1020	-	17	Hacia atrás	18
19	1140	+	19	Hacia adelante	18
23	1380	-	23	Hacia atrás	24
25	1500	+	25	Hacia adelante	24

An.2.1.4 Flujo de corrientes armónicas en el rotor

El flujo de cada corriente en el estator producirá una fuerza magnetomotriz en el entrehierro que inducirá flujo de corriente en el rotor de la máquina. Como cada armónico característico puede ser definido de secuencia positiva o negativa la

rotación de éste armónico será hacia delante o hacia atrás con respecto a la rotación del rotor. El quinto armónico rotará en una dirección hacia atrás, así, la corriente armónica será inducida en el rotor con una frecuencia correspondiente a la diferencia rotacional neta entre la frecuencia fundamental del entrehierro y el quinto armónico, por ejemplo el quinto más uno, o el sexto armónico. El séptimo armónico rotará en dirección hacia delante, una corriente armónica será inducida en el rotor con una frecuencia correspondiente a la diferencia rotacional neta entre el séptimo armónico y el entrehierro a la frecuencia fundamental, por ejemplo, el séptimo menos uno, o el sexto armónico. Así, desde el rotor, el quinto y el séptimo armónico en el estator se combinan para producir una corriente con un componente de sexto armónico en el rotor. Los mayores problemas causados por éste fenómeno son:

- Calentamiento del rotor
- Torques reducidos o pulsantes

El incremento de temperatura que puede ser tolerado, depende el tipo de motor utilizado. Los motores de rotor devanado son los más seriamente afectados, que los de rotor tipo jaula de ardilla. Los de rotor tipo jaula de ardilla con barras profundas son más afectados que los convencionales.

An.2.1.5 Otros efectos

Los armónicos pueden producir una distribución de flujo resultante en el entrehierro, que pueden causar o incrementar el fenómeno llamado cogging (negación a un arranque suave), y el efecto llamado crawling (un alto deslizamiento).

An.2.2 Transformadores

El efecto primario, de los armónicos en un sistema de potencia sobre los transformadores es el calor adicional generado por las pérdidas, causado por el contenido armónico de la corriente de carga. Otros problemas incluyen las posibles resonancias entre la inductancia del transformador y la capacitancia del sistema, estrés mecánico sobre el aislamiento (devanado y laminado), posibles vibraciones pequeñas en el núcleo y un incremento de ruido audible.

El efecto de los armónicos en los transformadores es doble: Las corrientes armónicas causan un incremento en las pérdidas del cobre y pérdidas por flujo parásito, y los voltajes armónicos causan un incremento en las pérdidas del acero. El efecto total es un incremento en el calentamiento del transformador, si se compara con una operación senoidal pura (frecuencia fundamental).

La presencia de voltajes armónicos incrementa las pérdidas por efecto histéresis y Eddy en las laminaciones y estresa el aislamiento. El incremento en las pérdidas del núcleo debido a los armónicos depende sobre el efecto que los armónicos tienen en el suministro del voltaje y en el diseño del núcleo del transformador.

El flujo de corrientes armónicas incrementa las pérdidas en el cobre; éste efecto es más importante en el caso de transformadores convertidores porque ellos no obtienen ningún beneficio con la presencia de filtros, los cuales son normalmente conectados en el de a.c del sistema eléctrico. Aparte de los niveles de potencia extra requeridos, los transformadores convertidores a menudo presentan puntos calientes inesperados en el tanque.

Debe considerarse que las pérdidas en el transformador, debido tanto voltajes como corrientes armónicas son dependientes de la frecuencia. Las pérdidas se incrementan cuando la frecuencia aumenta y así, componentes armónicos de frecuencia alta pueden ser más importantes que los componentes a baja frecuencia en el incremento del calentamiento del transformador.

Las pérdidas parásitas son las pérdidas por corrientes de Eddy, debido al flujo parásito electromagnético en los devanados, núcleo, abrazaderas del núcleo, campos magnéticos, paredes del tanque, y otras partes estructurales del transformador.

An.2.2.1 Factor K del transformador

El factor K del transformador, es un índice usado para calcular la reducción de la capacidad nominal (derating) de los transformadores estándar cuando corrientes armónicas están presentes [10]. La gran mayoría de los casos cuando un transformador alimenta cargas no lineales, éste sufre un sobrecalentamiento aún cuando no ha alcanzado su potencia nominal El factor K está definido como:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} h^2 (I_h/I_1)^2}{\sum_{h=1}^{\infty} (I_h/I_1)^2} \quad (\text{A. 25})$$

Donde h es el orden del armónico e I_h/I_1 es la correspondiente distorsión de corriente armónica individual. (A. 25) es calculado, basado en la suposición de que las pérdidas por corriente de Eddy en los devanados del transformador, producido por cada componente armónico de corriente es proporcional al cuadrado del orden del armónico y el cuadrado de la magnitud del componente armónico.

El transformador clasificado de tipo K, es construido para soportar más distorsión de voltaje que los transformadores estándar. El factor K de hecho se relaciona al calor excesivo que debe ser disipado por el transformador. Es considerado en la etapa de diseño e instalación para las cargas no lineales, y es usado como una especificación para equipo de suministro de potencia nuevo o de reemplazo. La Tabla An. 5 muestra transformadores de categoría K típicos disponibles comercialmente.

Tabla An. 5. Transformadores comercialmente disponibles con clasificación K



Categoría
K-4
K-9
K-13
K-20
K-30
K-40

An.2.3 Cables de potencia

Los cables involucrados en un sistema resonante, pueden estar sujetos a un estrés de voltaje y efecto corona, lo cual puede repercutir en una falla dieléctrica (aislamiento). Los cables que están sometidos a niveles ordinarios de corriente armónica son propensos al calentamiento.

El flujo de una corriente no senoidal en un conductor causará un calentamiento adicional arriba del esperado por el valor rms de la forma de onda. Esto es debido al fenómeno llamado “efecto piel” y el “efecto de proximidad”, los cuales varían en función de la frecuencia, como también del tamaño del conductor y el espaciamiento. Como un resultado de éstos dos efectos, la resistencia efectiva a.c (R_{AC}), es incrementada por arriba de la resistencia de c.d (R_{CD}), especialmente para conductores largos. Cuando una forma de onda de corriente que posee mucho contenido armónico de alta frecuencia circula a través de un cable, el R_{AC} equivalente para el cable se incrementa mucho más, amplificando las pérdidas $I^2 = R_{AC}$.

An.2.4 Sobre carga en el conductor del neutro en edificios comerciales

En un sistema trifásico, un sistema de cuatro hilos, la suma de las tres corrientes de fase retornan a través del conductor del neutro. Componentes de secuencia negativos y positivos se suman al de la secuencia cero en el punto neutral, pero los componentes de secuencia cero son aditivos en el neutro.

Los ingenieros en sistemas de potencia están acostumbrados a la regla tradicional que “un sistema trifásico balanceado no tiene corrientes por el neutro”, sin embargo, esta regla no aplica cuando están presentes armónicos de componente cero (principalmente el 3er. armónico). En edificios comerciales con un número grande de computadoras conectadas, la corriente r.m.s en el neutro puede exceder las corrientes r.m.s de fase.

An.2.5 Capacitores

El principal problema que emerge al usar capacitores en un sistema de potencia es el de la posible generación de resonancias en el sistema. Este efecto

impone voltajes y corrientes que son considerablemente altas que en el caso de un sistema sin resonancia.

La reactancia del banco de capacitores decrementa con la frecuencia, y el banco, así, actúa como una fuente de altas corrientes armónicas. Este efecto incrementa el calentamiento y el estrés dieléctrico. La apertura y cierre frecuente de componentes magnéticos no lineales (núcleo de acero), tales como los transformadores y reactores, pueden producir corrientes armónicas que se sumarán a la carga de los capacitores.

La aplicación de capacitores en un sistema de potencia con la presencia de equipo de generación de armónicos produce una condición de resonancia armónica. La reactancia capacitiva disminuye directamente con la frecuencia y la reactancia inductiva incrementa directamente con la frecuencia. A la frecuencia de resonancia de un circuito inductivo-capacitivo (LC), la reactancia inductiva igualará a la reactancia capacitiva. En sistemas eléctricos actuales el uso de capacitores para la corrección del factor de potencia, la resonancia serie, paralelo o una combinación de las mismas puede ocurrir. En el caso de un circuito serie, la impedancia total a la frecuencia de resonancia se reduce únicamente al componente resistivo del sistema. Si éste componente es pequeño, magnitudes elevadas de corriente resultarán a la frecuencia de excitación. En el caso de un circuito paralelo, la impedancia total a la frecuencia de resonancia es muy elevada, así, cuando se excita aún con una pequeña fuente a la frecuencia de resonancia, una corriente elevada circulará entre la conexión en paralelo del inductor y capacitor. El voltaje a través del circuito en paralelo podría ser un poco elevado. En consecuencia, si el punto de resonancia de uno o ambos tipos de estos circuitos se acerca a una de las frecuencias generadas por las fuentes armónicas del sistema, el resultado puede ser un flujo excesivo de corrientes armónicas y/o la aparición de voltajes armónicos excesivos. Estos efectos pueden repercutir en fallas en los bancos de capacitores, operación excesiva de los fusibles de protección del capacitor, y fallas dieléctricas de cables aislados.

La presencia de un voltaje distorsionado incrementa la pérdida dieléctrica en capacitores. La pérdida total puede ser expresada como:

$$\sum_{n=1}^{\infty} C(\tan \delta) \omega_n V_n^2 \quad (\text{A. 26})$$

Donde $\delta = R/(1/\omega C)$ es el factor de pérdida, $\omega_n = 2\pi f_n$ y V_n es el voltaje r.m.s del n th armónico.

El estrés térmico adicional de los capacitores directamente conectados al sistema (por ejemplo, sin inductancia serie) es evaluado aproximadamente con la ayuda de factor capacitivo pesado especial THD definido como:

$$\text{THD}_c = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^N (n \cdot V_n^2)}}{V_1} \quad (\text{A. 27})$$

An.2.6 Equipo electrónico

El equipo de potencia electrónica es susceptible al mal funcionamiento, causado por la distorsión armónica, Este tipo de equipo es comúnmente dependiente sobre la determinación precisa de los cruces por cero de voltaje u otros aspectos de la forma de la onda de voltaje. La distorsión armónica puede causar un cambio de fase sobre el cruce por cero o el punto al cual un voltaje de fase a fase llega ser mayor que otro voltaje de fase a fase. Estos efectos son puntos críticos para muchos tipos de circuitos electrónicos de control, y una incorrecta operación puede resultar de estos desplazamientos de fase.

Otros tipos de equipos electrónicos pueden ser afectados por la transmisión de armónicos en la fuente de c.a, a través de la fuente de potencia de los equipos mismos, o por el acoplamiento magnético de armónicos dentro de los componentes del equipo. Computadoras así como equipo similar como son los controladores programables (PLC's) frecuentemente requieren fuentes de alimentación de c.a que no tengan un factor de distorsión de voltaje armónico mayor de 5%, y con un componente individual armónico no mayor del 3% sobre la componente fundamental de voltaje. Los equipos de instrumentación pueden ser afectados de forma similar, ocasionando en una entrega errónea de datos y en otras ocasiones funcionando de forma impredecible. Otros equipos electrónicos susceptibles a la distorsión de voltaje son: radio, televisión, grabadoras de video, como también sistemas de reproducción de audio.

An.2.7 Interferencia telefónica

La presencia de corrientes o voltajes armónicos en la circuitería asociada a aparatos utilizados para la conversión de potencia, pueden producir campos eléctricos y magnéticos que perjudicarán el desempeño satisfactorio en los sistemas de comunicación que, debido a su proximidad y susceptibilidad pueden ser perturbados. Para un arreglo físico dado, es aparente que el disturbio está en función de la amplitud y la frecuencia en el aparato de conversión de potencia.

An.2.8 Convertidores estáticos de potencia

Los dispositivos convertidores de potencia estáticos generalmente son generadores de armónicos como un compromiso necesario para su funcionamiento. En algunas ocasiones, los mismos convertidores pueden ser afectados por armónicos, ya sea por sus propios armónicos generados (caso más común) o por la presencia de otra fuente armónica. a menudo la otra fuente armónica es un



convertidor idéntico o similar, que está conecta en forma paralela en el suministro de CA.

Existen un número de convertidores de acuerdo a su forma funcional o topológica. Algunas de estas formas son relativamente insensibles a los armónicos. El rectificador a base de diodos normalmente no es afectado. Sin embargo, si usa capacitores en una red de voltaje compartido (por ejemplo, diodos en serie con un rectificador de alto voltaje), estos capacitores pueden estar sometidos a estrés térmico más allá de su capacidad calculada en el diseño, por las altas corrientes armónicas impresas sobre ellos por los armónicos en el suministro de a.c. Estos armónicos también pasarán al lado de la carga del rectificador, lo cual puede daños o perturbar el lado de CD en el equipo de proceso.

La mayoría de los convertidores recaen en las características del suministro de voltaje de a.c para su control. Si la alimentación a.c de entrada está severamente distorsionada por armónicos, los convertidores pueden no dispararse, fallar en la conmutación, o generar armónicos no característicos. El control del convertidor frecuentemente posee dispositivos como slip-flops, los cuales son sensibles al fenómeno armónico de altas frecuencias. Así, los controles reciben una falsa estimulación, de tal modo causando una falla en el funcionamiento o en algunos casos la destrucción del dispositivo.

An.3 Estándares y límites armónicos

Existen dos formas distintas de razonamiento que pueden ser aplicadas para limitar el incremento de armónicos que están presentes en sistemas de potencia [18]. El primero, favorecido por la Comisión electrotécnica internacional (IEC), es una serie de límites que es apropiada para aplicarla en las terminales de cualquier carga no lineal. El segundo favorecido por el IEEE y la base para el estándar IEEE 519-1992, es una serie de límites que son apropiados para aplicarlas en un punto central para múltiples cargas no lineales. La filosofía de los límites IEC están basados en la presunción de que la limitación de la producción armónica de cada equipo, efectivamente limitará efectos combinados. Mientras conceptualmente efectiva, las suposiciones hechas en el desarrollo de los límites actuales tienen diferencias con los del IEEE-519-1992 y se ha mostrado que los límites de alguna manera son más restrictivos debido al uso de límites armónicos tanto para corrientes como voltajes.

La IEC ha definido una serie de estándares llamados EMC (Electromagnetic compatibility), para tratar con problemas de calidad de la energía. La serie IEC 61000 incluye a los armónicos como inter armónicos como un fenómeno electromagnético de baja frecuencia.

Para la comisión europea para la estandarización electrotécnica (CENELEC), los estándares producidos para el EMC están basados sobre una jerarquía de estándares básicos, estándares genéricos y estándares producto, como se menciona a continuación:

Estándares básicos:

Estos describen los fenómenos relaciones con la medición y métodos de prueba para la verificación del EMC. Especificaciones para equipos de medición y ajustes de prueba, tales como recomendaciones de las pruebas de niveles de inmunidad a la interferencia, también son contenidas, pero son únicamente incorporadas como obligatorias como límites obligatorios en estándares genéricos o estándares producto.

Estándares genéricos:

Éstos contienen límites generales importantes para la valoración de productos para los cuales no existen estándares de producto específicos. En el ambiente EMC existen diferencias entre el campo industrial (Los estándares EN contienen la extensión -2), y en el ambiente ligeramente industrial, comercial y negocios, y áreas residenciales (Los estándares EN contienen la extensión -1). Donde para cambiar la numeración cuando se convierten documentos de estándares a estándares europeos, se debe de seguir cierta regla de conversión, por ejemplo: CENELEC nn → EN 50000+nn.

Estándares de producto y de familia de productos:

Estos describen las condiciones ambientales específicas y son precedentes sobre los estándares genéricos. Los límites son estipulados en los estándares genéricos con métodos de prueba y los procedimientos siendo principalmente especificados por familia de productos. En adición a los estándares, existen varias recomendaciones, tales como la de la Asociación de Electricidad Germana (VDEW), la cual debería ser vista como soluciones transitorias para las áreas en las cuales no existen estándares de producto. Los siguientes ejemplos de las recomendaciones del VDEW deberán ser mencionadas en el contexto de perturbación del sistema.

- Principios básicos para la evaluación de perturbaciones de sistema.
- Recomendación para la estación digital de control
- Recomendaciones para evitar las perturbaciones no permitidas en telecontrol audio-frecuencia

Los consumidores alemanes pueden requerir un desempeño adicional o marcas de calidad, las cuales no son necesariamente requeridas legalmente. Tanto los requerimientos en EU como los estándares para la calidad alemana o marcas de desempeño requerirán en muchos casos que un producto sea modificado. Aún si el producto no requiere modificación, se requerirán del mismo, pruebas y certificación antes de ser marcado. La marca “Verband Deutscher Elektrotechniker” (VDE) es una marca para los componentes eléctricos. La composición de los estándares VDE (en éste caso dando la clasificación numérica VDE) para el suministro de potencia eléctrica es como se muestra en Tabla An. 6:

Tabla An. 6 Descripción general de los estándares propuestos por la VDE

VDE 0838		Perturbaciones en sistemas de suministro de potencia
	Parte 1	General, definiciones
	Parte 2	Armónicos
	Parte 3	Fluctuaciones de voltaje
VDE 0839		Compatibilidad electromagnética
	Parte 2-2	Niveles de compatibilidad en sistemas públicos de bajo voltaje
	Parte 2-4	Niveles de compatibilidad en sistemas industriales
	Parte 6-2	Inmunidad a la interferencia, áreas industriales
	Parte 10	Evaluación de la inmunidad a la interferencia
	Parte 81-1	Interferencia emitida; áreas residenciales, iluminación industrial
	Parte 81-2	Interferencia emitida; áreas industriales
	Parte 82-1	Inmunidad a la interferencia; áreas residenciales, iluminación industrial
	Parte 88	Niveles de compatibilidad en sistemas públicos de voltaje medio
	Parte 160	Características de voltaje en sistemas públicos
	Parte 217	Medición de la interferencia emitida en el sitio de la instalación
VDE 0843		Compatibilidad electromagnética de equipo de medición y control en metrología industrial
	Parte 2	Inmunidad a la interferencia de la descarga de electricidad estática
	Parte 3	Inmunidad a la interferencia de campos electromagnéticos
	Parte 5	Inmunidad a la interferencia de voltaje de impulso
	Parte 20	Requerimientos EMC de equipos eléctricos para instrumentación y control utilizados en laboratorios
	Parte 23	
VDE 0845		Protección de sistemas de telecomunicación de descargas atmosféricas, cargas estáticas y sobre voltajes de sistemas de potencia
VDE 0846		Dispositivos de medición para la evaluación del EMC
	Parte 0	Medidores para flicker, evaluación del flicker
	Parte 1	Armónicos hasta 2500 Hz
	Parte 2	Medidores para flicker, descripción funcional
	Parte 11	Generadores de prueba

Parte 12	Dispositivos de acople
Parte 13	Ayudas de medición
Parte 14	Amplificadores de potencia
VDE0847	Métodos de medición para la evaluación del EMC
Parte 1	Medición de disturbios conducidos
Parte 2	Inmunidad a la interferencia de disturbios conducidos
Partes 4-7	Métodos y medición de armónicos e inter armónicos
Partes 4-8	Pruebas de inmunidad a la interferencia
a	
Parte 136	

Con el objetivo de mostrar el contenido de las normas IEC, se presenta en la Tabla An. 7 un panorama general de éstas normas:

Tabla An. 7 Descripción general de los estándares propuestos por la IEC

IEC 61000-1	Panorama de las series de estándares, definiciones
IEC 61000-2	Niveles de compatibilidad, descripción del ambiente
-1	Descripción del fenómeno
-2	Niveles de compatibilidad para sistemas públicos de bajo voltaje
-4	Niveles de compatibilidad para sistemas industriales
-5	Clasificación del ambiente EMC
-6	Recomendaciones para la interferencia emitida de baja frecuencia in sistemas industriales
-7	Campos magnéticos de baja frecuencia
-12	Niveles de compatibilidad para sistemas públicos de voltaje medio
IEC 61000-3	Límites de interferencia emitida por fluctuaciones de voltaje, armónicos y flicker
-1	Panorama general
-2	Límites de las corrientes armónicas $I_1 \leq 16$ A
-3	Límites para fluctuaciones de voltaje y flicker $I_1 \leq 16$ A
-4	Límites para corrientes armónicas $I_1 \geq 16$ A
-5	Límites para fluctuaciones de voltaje y flicker $I_1 \geq 16$ A
-6	Límites para corrientes armónicas en los rangos de voltaje medio y alto
-7	Límites para las fluctuaciones de voltajes y flicker en los rangos de voltaje medio y alto
IEC 61000-4	Métodos de prueba para la interferencia emitida y la inmunidad a la interferencia
-1	Panorama general



- 7 Recomendaciones para la medición de armónicos
- 11 Inmunidad a la interferencia por Sags de voltaje e interrupciones
- 13 Inmunidad a la interferencia de armónicos e inter armónicos
- 14 Inmunidad a la interferencia de fluctuaciones de voltaje, desviaciones de asimetría y frecuencia
- 15 Descripción del funcionamiento del medidor de flicker
- 16 Disturbios conducidos continuos ($f = 0, \dots, 150 \text{ kHz}$)

IEC 61000-5	Descripción de medidas de mejoras
IEC 61000-6	Requerimientos de inmunidad a la interferencia, límites de interferencia emitida
IEC 61000-9	Varios

Los puntos tratados en el documento IEEE 519-1992 son:

- Fuentes armónicas.
- Ilustraciones de las formas de onda distorsionadas típicas, orden de los armónicos y niveles de cada componente armónico.
- Respuestas de sistemas de distribución de bajo voltaje, sistemas industriales y sistemas de transmisión con presencia de armónicos.
- Efectos de la distorsión armónica en la operación de componentes.
- Métodos de análisis
- Requerimientos para la medición de la evaluación de los niveles de distorsión armónica.
- Métodos en el diseño de compensación reactiva.
- Técnicas para reducir el aumento de corriente armónica que penetra en sistemas de CA.
- Prácticas recomendadas tanto a consumidores individuales como instalaciones, para el control de la distorsión armónica a niveles tolerables.

Los límites de distorsión tratados en el estándar IEEE 519-1992 son:

Tabla An. 8 Límites de distorsión de corriente para sistemas generales de distribución (120V a 69 000V)

Distorsión máxima de corriente armónica en porcentaje de I_L



Orden individual armónico (armónicos impares)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	4.0	2.0	1.5	6.0	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Los armónicos pares están limitados al 25% de los límites de armónicos impares presentados arriba

Las distorsiones de corriente que resultan de una compensación d.c, por ejemplo los convertidores de media onda, no son permitidos

*Todo el quipo de generación de potencia está limitado a estos valores de distorsión de corriente, a pesar de su actual I_{sc}/I_L

donde:

I_{sc} = corriente máxima de corto circuito en el PCC.

I_L = máxima corriente demandada de carga (componente a la frecuencia fundamental) en el punto PCC.

Tabla An. 9 Límites de distorsión de corriente para sistemas generales de subtransmisión (69 001V a 161 000V)

Distorsión máxima de corriente armónica en porcentaje de I_L						
Orden individual armónico (armónicos impares)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20*	2.0	1.0	0.3	0.15	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	0.5	0.25	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	0.75	0.35	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	1.0	0.5	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	1.25	0.7	0.7	10.0

Los armónicos pares están limitados al 25% de los límites de armónicos impares presentados arriba

Las distorsiones de corriente que resultan de una compensación d.c, por ejemplo los convertidores de media onda, no son permitidos

*Todo el quipo de generación de potencia está limitado a estos valores de distorsión de corriente, a pesar de su actual I_{sc}/I_L

donde:

I_{sc} = corriente máxima de corto circuito en el PCC.

I_L = máxima corriente demandada de carga (componente a la frecuencia fundamental) en el punto PCC.

Tabla An. 10 Límites de distorsión de corriente para sistemas generales de transmisión (>161 000V), generación dispersa y cogeneración

Distorsión máxima de corriente armónica en porcentaje de I_L

Orden individual armónico (armónicos impares)						
I_{sc}/I_L	<11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<50		2.0	1.0	0.75	0.15	2.5
≥ 50		3.0	1.5	1.15	0.22	3.75

Los armónicos pares están limitados al 25% de los límites de armónicos impares presentados arriba

Las distorsiones de corriente que resultan de una compensación d.c, por ejemplo los convertidores de media onda, no son permitidos

*Todo el quipo de generación de potencia está limitado a estos valores de distorsión de corriente, a pesar de su actual I_{sc}/I_L

donde:

I_{sc} = corriente máxima de corto circuito en el PCC.

I_L = máxima corriente demandada de carga (componente a la frecuencia fundamental) en el punto PCC.

Tabla An. 11 Límites de distorsión de voltaje

Voltaje en la barra en el PCC	Distorsión individual de voltaje (%)	Distorsión de voltaje total THD (%)
69 kV y abajo	3.0	5.0
69.001kV a 161kV	1.5	2.5
161.001kV y arriba	1.0	1.5

Nota: Sistemas de alto voltaje pueden tener hasta un 2% de THD, donde la causa es un HVDC terminal que atenuará al momento que es ajustado

En el análisis armónico existen índices importantes, usados para describir los efectos de los armónicos en los componentes del sistema de potencia y sistemas de comunicación. En la Tabla An. 12 se describen las definiciones de éstos índices por uso común de acuerdo al estándar IEEE 519-1992:

Tabla An. 12 Índices establecidos para la determinación de distorsión armónica por el estándar IEEE 519-1992

Índice	Definición	Significado
Factor total de distorsión de voltaje	$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1}$	Índice de desviación de una forma onda periódica de voltaje conteniendo armónicos de una forma onda periódica senoidal perfecta
Factor total de distorsión de corriente	$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$	Índice de desviación de una forma onda periódica de corriente conteniendo armónicos de una forma onda periódica senoidal perfecta



Distorsión total demandada	$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L}$	Distorsión de la corriente armónica total, en porcentaje de la demanda de corriente de carga máxima (15 o 30 minutos de demanda)
Factor de influencia telefónica de una onda de voltaje	$TIF_V = \frac{\sqrt{(V_h W_h)^2}}{V_{rms}}$	Medida para describir el ruido telefónico originado por voltajes armónicos en un sistema de potencia.
Factor de influencia telefónica de una onda de corriente	$TIF_I = \frac{\sqrt{(I_h W_h)^2}}{I_{rms}}$	Medida para describir el ruido telefónico originado por corrientes armónicas en un sistema de potencia.
<p>donde:</p> <p>W_h es la ponderación de TIF a una frecuencia en el armónico h</p> <p>$W_h = C_n 5nf_0$</p> <p>C_n es el factor ponderado de mensaje-C</p> <p>En la Tabla An. 13 se presentan los coeficientes de éstos factores</p>		
Producto V.T	$V \cdot T = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (W_h V_h)^2}$	Medida de la interferencia armónica en circuitos de audio para una onda de voltaje
Producto I.T	$I \cdot T = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (W_h I_h)^2}$	Medida de la interferencia armónica en circuitos de audio para una onda de corriente
Nota: Si productos $kV.T$ o $kI.T$ son usados, entonces el índice deberá ser multiplicado por un factor de 1000.		

Tabla An. 13 Coeficientes TIF y mensaje-C

Frecuencia (Hz)		Armónico	Mensaje-C C	TIF W	
60	50	1	0.0017	0.5	0.71
120	100	2	0.0167	10.0	8.91
180	150	3	0.033	30.0	35.5
240	200	4	0.0875	105	89.1
300	250	5	0.1500	225	178
360	300	6	0.222	400	295
420	350	7	0.10	650	376
480	400	8	0.396	950	484
540	450	9	0.489	1320	582
600	500	10	0.597	1790	661
660	550	11	0.685	2260	733
720	600	12	0.767	2760	794
780	650	13	0.862	3360	851
840	700	14	0.912	3830	902
900	750	15	0.967	4350	955
960	800	16	0.977	4690	1000

Frecuencia (Hz)		Armónico	Mensaje-C C	TIF W	
1020	850	17	1.000	5100	1035
1080	900	18	1.000	5400	1072
1140	950	19	0.988	5630	1109
1200	1000	20	0.977	5860	1122
1260	1050	21	0.960	6050	1109
1320	1100	22	0.944	6230	1072
1380	1150	23	0.923	6370	1035
1440	1200	24	0.924	6650	1000
1500	1250	25	0.891	6680	977

An.4 Métodos de análisis

Existen diversas técnicas para el análisis de armónicos en los sistemas eléctricos, los análisis comunes que se realizan en un estudio de armónicos son los de la obtención de la respuesta del sistema a distintas frecuencias y las magnitudes de parámetros eléctricos armónicos. Las técnicas de análisis de armónicos se dividen en dos grupos los cuales son:

1. Simulaciones en el dominio del tiempo [19]:

- Ecuaciones diferenciales representando el comportamiento dinámico de los componentes interconectados al sistema de potencia (variables de estado).
- Análisis nodal, el cuál utiliza equivalentes de Norton para representar los componentes dinámicos.

2. Simulaciones en el dominio de la frecuencia [20]:

Existen un gran número de métodos de análisis en el tiempo. Los más populares son: Barridos de frecuencia, penetración de armónicos, y flujos de potencia armónica. Cada uno de éstos métodos pueden ser aplicados a una fase (secuencia positiva o cero) o multi fases, y en cada técnica se utiliza el modelo de la matriz de admitancia, desarrollada de acuerdo a la topología de la red.

An.4.1 Barrido de frecuencia

La técnica de Barrido de frecuencia es el método más simple y comúnmente usado para el análisis de armónicos [21]. La característica de éste método, es la de calcular la respuesta a la frecuencia de una red, vista desde un nodo en particular. Normalmente, una corriente (o voltaje) senoidal de 1 p.u., se inyecta en el nodo de interés, y la respuesta de voltaje (o corriente) es calculada. Éste cálculo es repetido usando pasos discretos de frecuencia a través de un rango de interés.

Matemáticamente, el proceso es resolver la siguiente ecuación de la red a la frecuencia nf_0 :

$$[Y_n][V_n] = I_n \quad (\text{A. 28})$$

Donde I_n es el vector de corriente conocido (para el barrido de inyección de corriente), V_n es el vector de voltajes nodales a ser calculado y f_0 es la frecuencia fundamental. En un estudio convencional de barrido de frecuencias, únicamente un renglón del vector $[I_n]$ es diferente cero. El método de barrido de frecuencias es la herramienta más efectiva para detectar las condiciones de resonancia armónica en un sistema. También es ampliamente aplicado en el diseño de filtros. La respuesta obtenida en este estudio es una gráfica de la impedancia de punto local (Thevenin) contra la frecuencia. Los voltajes calculados al emplear (A. 28) para una inyección de corriente de 1 p.u., a la frecuencia de análisis son iguales a las impedancias de punto local (driving point) e impedancias de transferencia [22].

An.4.2 Método de inyección de corrientes

Éste método utiliza el modelo de la matriz de admitancia. El procedimiento de análisis es similar al análisis de barrido de frecuencia, pero las inyecciones de corriente de las cargas no lineales están representadas por su espectro de corriente armónica de magnitud y fase conocida. El procedimiento para realizar éste estudio es el siguiente:

1. Formular el modelo de la matriz de admitancias del sistema de suministro de potencia, incluyendo las contribuciones de todas las fuentes y cargas lineales. La frecuencia deberá coincidir con las series de Fourier para los vectores de corriente de las cargas no lineales.
2. Construir el vector de inyección de corriente, por la extracción del término a la frecuencia apropiada (el cuál debe coincidir con la frecuencia usada en la construcción del modelo de la matriz de admitancias) de cada vector de corriente armónica de la carga no lineal.
3. obtener la solución de (A. 28), para determinar los voltajes en los nodos de la red. La frecuencia asociada con los voltajes obtenidos es la misma que la usada para la construcción del modelo de la matriz de admitancias.

Una de las limitaciones del método de inyección de corrientes es la validez de la representación del vector de corriente armónica para las cargas no lineales [20]. La mayoría de las cargas armónicas pueden ser representadas como fuentes ideales de corriente para propósitos de análisis. La suposición que permite ésta representación, es la que el voltaje no está distorsionado. Para la mayoría de los dispositivos no lineales, la representación es algo precisa para niveles de distorsión de voltaje armónico inferiores al 10% [1].

An.4.3 Flujos de potencia armónica

An.4.3.1 Primera versión de flujo de potencia armónica

El principal problema del método de inyección de corrientes, es la falta de información del flujo de cargas a la frecuencia fundamental. Como resultado, las magnitudes y ángulos de fase de las fuentes de corriente no pueden ser determinadas adecuadamente [23]. Para la mejora de éste análisis, primeramente se realiza un estudio de flujo de potencia. Así, las corrientes inyectadas son determinadas usando voltajes calculados en el estudio de flujos de potencia y el espectro armónico característico de la carga.

An.4.3.2 Segunda Versión de flujos de potencia armónica

Éste análisis es una técnica extremadamente compleja y poderosa. El modelo del sistema es formado como se describió en el método de inyección de corriente, pero las cargas pueden ser modeladas de forma arbitraria en complejidad, dependiendo de las necesidades de detalle requerido, para obtener los niveles de precisión deseados. Cuando una solución de corrientes armónicas de una carga no lineal puede ser obtenida, en función del voltaje (incluyendo voltajes armónicos) y con parámetros de control, es posible representar las cargas armónicas directamente en el dominio de la frecuencia como se muestra en (A. 29). En muchos casos, esta solución no puede ser obtenida y una técnica combinada en el dominio del tiempo-frecuencia puede ser aplicado.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\bar{V}_1, \dots, V_N, C_1, \dots, C_N) \\ f_N(\bar{V}_1, \dots, V_N, C_1, \dots, C_N) \end{bmatrix} \quad (\text{A. 29})$$

Donde C_1, \dots, C_N representan a las M variables de control, que son usadas para controlar varios parámetros de carga (tal como la velocidad en el eje en un controlador de motor). Y V_1, \dots, V_N representan los fasores de voltaje armónico en las terminales de la carga.

An.4.3.3 Flujos de potencia híbridos

En éste método se utiliza un modelo del sistema, como en el método de inyección de corrientes para formar la matriz de admitancias para cada frecuencia de interés, pero la representación de las cargas no lineales, son a base de ecuaciones diferenciales en el dominio del tiempo. Dado un voltaje inicial estimado de los voltajes de la red, los modelos de carga son simulados (pueden ser desacoplados si es

necesario) hasta que se alcance el estado estable. Un nuevo vector de corrientes armónica se crea, de la corriente en estado estable de la carga no lineal. Estas inyecciones de corriente luego son usadas como se describió en el método de inyección de corriente, para obtener un voltaje actualizado (incluyendo armónicos). El procedimiento se repite hasta que el modelo de la red en el dominio de la frecuencia, converge con los modelos de las cargas no lineales en estado estable.

An.5 Generación de armónicas

El tipo de carga no lineal utilizadas con mayor frecuencia, así como las características de contaminación armónica se describen en ésta sección.

An.5.1 Horno de arco eléctrico

El horno de arco eléctrico es una carga no lineal con variación en el tiempo, que tiene la habilidad de generar perturbaciones aleatorias en el punto de acoplamiento común (PCC) con la red de la compañía de suministro de eléctrico. Los hornos de arco eléctrico son utilizados para la producción de acero. La corriente del arco no es periódica, y los análisis revelan un espectro continuo de frecuencias armónicas tanto de orden entero y no entero. Sin embargo, las mediciones armónicas han mostrado que las frecuencias armónicas de que son enteros, particularmente de orden bajo e iniciando con el segundo y terminando con el séptimo armónico, predominan sobre los no enteros. También se ha mostrado que la amplitud disminuye con el aumento en el orden. Mientras que el nivel de metal fundido crece, el arco se comporta de forma más estable, resultando en corrientes mucho más estables, con mucho menos distorsión y menos actividad armónica. La corriente llega a ser simétrica alrededor del eje 0, así eliminándose los armónicos pares y no enteros.

La energía consumida en cada proceso del ciclo de fundido, puede estar dividido en tres pasos, los cuales son:

1. **Periodo de taladrado (Drilling period):** Este periodo es caracterizado por el uso de voltajes y potencias reducidos. Es de corta duración, durando entre 3 y 4 minutos. El material a ser reducido es altamente heterogéneo, causando variaciones muy irregulares en el arco eléctrico.
2. **Periodo de fusión (Melting period):** En este periodo, el arco eléctrico es rodeado por los residuos fusionados, los cuales en ésta etapa forman un material más homogéneo que en el periodo de taladrado. Voltaje y potencia total es usado en éste proceso, durando entre 21 y 23 minutos. Valores comunes para los hornos de arco eléctrico de mediana potencia son: 610 V, 42 kA, 37 Mw y F.P=0.83.
3. **Fin del periodo de fusión y recalentamiento:** En este periodo se utilizan voltajes más bajos y corrientes más altas que en el periodo de fusión. Se

presentan arcos cortos de duración aproximada de 5 minutos. Los valores en comunes en éste proceso son: 560V, 45 kA, 34 MW y un F.P= 0.78.

La Tabla An. 14 ilustra el contenido armónico común de la corriente en un horno de arco, en dos etapas del ciclo de fusión para un horno de arco comúnmente utilizado en la producción de acero. Debe enfatizarse que, otros hornos producirán de alguna manera diferentes patrones de corriente armónica; pero estos valores pueden ser de utilidad en estudios armónicos, si datos para un horno en particular no están disponibles.

Tabla An. 14. Contenido armónico de la corriente de un horno de arco eléctrico en dos etapas del ciclo de fusión

	Corriente armónica en % de la fundamental				
	Orden del armónico				
Condición del horno	2	3	4	5	7
Fundido inicial (arco activo)	7.7	5.8	2.5	4.2	3.1
refinamiento (arco estable)	0.0	2.0	0.0	2.1	0.0

An.5.2 Convertidores

La introducción de convertidores de conmutación de línea, económicos y confiables ha causado un incremento significativo en cargas con generación de armónicos. En la mayoría de los casos, los convertidores de conmutación de línea son la casa de problemas armónicos en los sistemas de distribución [24]. La aplicación común de los convertidores de potencia estáticos es la de controladores de velocidad en el control de motores. Otra aplicación es en terminales HVDC. El dispositivo puede ser operado como un convertidor de seis pulsos, como se muestra en la Figura An. 2.

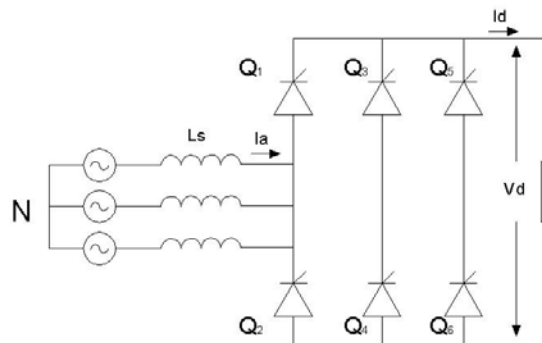


Figura An. 2 Convertidor por conmutación de línea de seis pulsos

En la Figura An. 2, cada par de tiristores es disparado (ángulo de disparo) y conducen hasta que ellos son polarizados inversamente. Si un tiristor es disparado con ángulo de disparo igual a cero, actúa exactamente igual a un diodo. El término convertidor por conmutación de línea se refiere al hecho de que la carga apaga deshabilita al tiristor, en lugar de apagarlo por circuitos externos de control. La forma de onda de la corriente de a.c., para un convertidor de seis pulsos es en conducción de 120° y los 60° restantes en estado de apagado. Durante el periodo de conducción, la corriente d.c. de la carga se supone constante en el caso ideal, debido a la supuesta existencia de un inductor en serie. Suponiendo que no existe traslapes en la conmutación, y existe un balance trifásico de operación, los armónicos que se presentan son $h = 1, 5, 7, 13, \dots$. Los armónicos generados por un convertidor de seis pulsos incluyen a todos los armónicos impares, con excepción a los triples. Los armónicos para éstos dispositivos, para cualquier número de pulsos puede ser expresados por $h = pn \pm 1$, donde n es cualquier número entero y p es el número de pulsos del convertidor. Para el caso ideal, las magnitudes de las corrientes armónicas disminuyen de acuerdo a la regla $1/h$, y corrientes armónicas comunes (en por unidad de la componente fundamental) para convertidores de seis pulsos.

Tabla An. 15 Corrientes armónicas teóricas y comunes para convertidores de seis pulsos

h	5	7	11	13	17	19	23	25
regla $1/h$	0.200	0.143	0.091	0.077	0.059	0.053	0.043	0.040
Común	0.175	0.111	0.045	0.029	0.015	0.010	0.009	0.008

An.5.3 Compensadores estáticos de VAR's

Los reactores controlados a base de tiristores (TCR), han sido extensamente usados como compensadores en derivación para los hornos de arco eléctrico en sistemas de distribución, y en otras aplicaciones para mantener los niveles de voltaje, reducir el voltaje de parpadeo (flicker), mejorar el factor de potencia, corregir desbalances de fase, y mejorar la estabilidad en los sistemas de potencia las configuraciones de éstos dispositivos se muestra en la Figura An. 3 y Figura An. 4

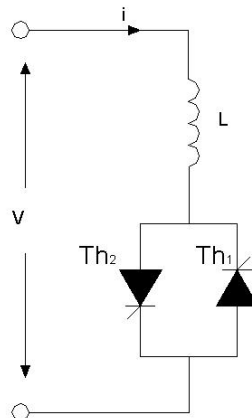


Figura An. 3 Reactor controlado a base de tiristores

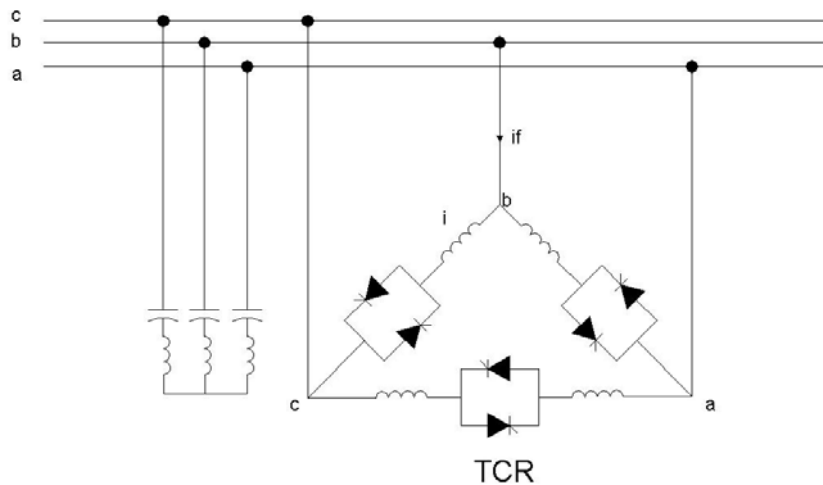


Figura An. 4. Configuración de un TCR trifásico en paralelo con un banco de capacitores en derivación

La Tabla An. 16 proporciona las amplitudes máximas para los armónicos hasta del orden 25. Suponiendo condiciones balanceadas, los valores, los cuales son expresados en porcentaje de la amplitud de la fundamental en conducción total, son los mismos tanto para corrientes de línea y fase. Los valores dentro de paréntesis son armónicos triples, que se presentarán en las corrientes de fase, pero no estarán en las corrientes de línea si las condiciones son balanceadas. Sin embargo, en una aplicación común de hornos de arco eléctrico, en la cuál, condiciones desbalanceadas prevalecen durante periodos de arco inestable, algunos armónicos triples aparecerán en las corrientes de línea.

Tabla An. 16 Amplitudes máximas de las corrientes armónicas en TCR

Orden del armónico		Orden del armónico	
1	1.00	3	(13.78)
5	5.05	7	2.59
9	(1.57)	11	1.05
13	0.75	15	(0.57)
17	0.44	19	0.35
21	(0.29)	23	0.24
25	0.20		

Nota: los armónicos en paréntesis son triples

An.5.4 Ciclo convertidor

El ciclo convertidor es un dispositivo que convierte la energía de CA a una frecuencia en una potencia de a.c. a una frecuencia menor. Los ciclo convertidores son usados comúnmente en aplicaciones en que se requiere baja velocidad y



magnitudes elevadas de caballos de potencia. Las frecuencias armónicas generadas por un ciclo convertidor dependen de la frecuencia de salida, la cuál es variada en la operación del control de la velocidad del motor. La frecuencia de salida puede ser controlada por temporizando de forma precisa los pulsos de disparo en las compuertas de los tiristores, a través una computadora de control. Las expresiones para las corrientes armónicas de un ciclo convertidor son extremadamente complejas, ya que éstas varían en función de la relación de frecuencia. La ecuación (A. 30) muestra las frecuencias que están presentes. El primer término en la ecuación representa los componentes del convertidor de seis pulsos, y el segundo término señala el ancho de banda de las frecuencias características.

$$f_h = f_1(kq \pm 1) \pm 6nf_0 \quad (\text{A. 30})$$

Donde

f_h Es la frecuencia armónica impuesta en el sistema de CA.

k, n Son enteros

f_0 Es la frecuencia de salida del ciclo convertidor