



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA
MECÁNICA Y ELÉCTRICA**

SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”

**IDENTIFICACIÓN DE FUENTES ARMÓNICAS POR
MÉTODOS DE ESTIMACIÓN EN SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

P R E S E N T A

LUIS ALBERTO HERNÁNDEZ ARMENTA

MÉXICO, D.F. 2012





**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 14:00 horas del día 31 del mes de Octubre del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de ESIME-Zacatenco para examinar la tesis titulada:

**“IDENTIFICACIÓN DE FUENTES ARMÓNICAS POR MÉTODOS DE ESTIMACIÓN
EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA ”**

Presentada por el alumno:

HERNÁNDEZ
Apellido paterno

ARMENTA
Apellido materno

LUIS ALBERTO
Nombre(s)

Con registro:

B	1	0	2	1	6	2
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

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

LA COMISIÓN REVISORA

Los Directores(a) de tesis

DR. DAVID ROMERO ROMERO

Presidente

DR. JAIME ROBLES GARCÍA

Segundo Vocal

DR. DANIEL OLGUÍN SALINAS

Tercer Vocal

DR. JAIME ROBLES GARCÍA

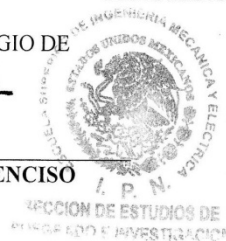
Secretario

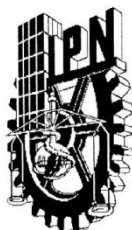
DR. DANIEL RUIZ VEGA

**DR. RICARDO OCTAVIO MOTA
PALOMINO**

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE
PROFESORES

**DR. MAURO ALBERTO ENCISO
AGUILAR**





INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día **31 del mes de Octubre del año 2012**, el que suscribe **Luis Alberto Hernández Armenta**, alumno del Programa de Maestría en **Ciencias en Ingeniería Eléctrica** con número de registro **B102162**, adscrito a la **Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco del IPN**, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del **Dr. David Romero Romero** y el **Dr. Jaime Robles García** y cede los derechos del trabajo intitulado **“Identificación de Fuentes Armónicas por Métodos de Estimación en Sistemas Eléctricos de Potencia”**, 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 directores del trabajo, este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones, gorson1@hotmail.com, dromero@ieee.org y/o jarobles@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar las fuentes del mismo.

Ing. Luis Alberto Hernández Armenta

AGRADECIMIENTOS

A mis padres que brindaron el apoyo incondicional y sabios consejos en todo momento.

A mi esposa Anabelle y mi hija Michelle que formaron parte de este camino, fueron mi apoyo y la fuerza para no darme por vencido.

A los Doctores David Romero Romero y Jaime Robles García por ser los guías en este proceso, por su tiempo y los conocimientos transmitidos.

A los Doctores Daniel Olguín Salinas, Ricardo Mota Palomino, Daniel Ruiz Vega y Jesús Reyes por los comentarios hechos hacia este trabajo.

Al M. en C. Sergio Baruch quien además de un gran profesor es un excelente amigo, y del cual siempre obtuve el tiempo para un consejo o su orientación.

A mis compañeros con los que juntos compartimos este viaje de mas de dos años.

Al Instituto Politécnico Nacional y al Conacyt por el apoyo económico dado durante el desarrollo de este trabajo.

RESUMEN

El análisis de armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia es importante debido al incremento de cargas no lineales y dispositivos controlados por electrónica de potencia en la red. Las fuentes armónicas pueden generar problemas en la red, como resonancias disparos intempestivos en cargas sensibles, degradación de la capacitancia interna, calentamiento excesivo en los transformadores, etc.

Las compañías suministradoras de energía eléctrica a menudo desconocen la ubicación de las fuentes armónicas en la red, mismas que pueden no cumplir los estándares de calidad. Por ello se han desarrollado técnicas para estimar la ubicación de estas fuentes, y en caso de sobrepasar los niveles especificados en las normas, aplicar penalizaciones.

El objetivo principal de este trabajo es identificar la ubicación de fuentes armónicas en sistemas eléctricos de potencia empleando métodos de estimación de estado basados en cuadrados mínimos. (Investigación de los métodos Heydt y Nguyen).

Se usaron dos sistemas de prueba de la literatura; uno de 5 nodos y el otro de 14. Para comprobar los resultados se utilizaron soluciones dadas en la literatura. De los resultados de los sistemas de prueba se observa que el método de Heydt no identificó la fuente de armónicas para el sistema de 5 nodos, mientras que el método de Nguyen encontró en todos los sistemas la localización de las fuentes de armónicas. El método de Heydt tuvo resultados exactos en los sistemas de 14 nodos. El método de Nguyen se probó también con error en las mediciones sin buenos resultados.

Se desarrollaron programas con los dos métodos de estimación de estado y un programa de flujos armónicos elaborados en FORTRAN.

ABSTRACT

The harmonic analysis of Electric Power Systems is important due to the increase in nonlinear loads and electronically controlled devices in the network power. Harmonic sources can lead to problems in the network, such as tripping resonances in sensitive loads, internal capacitance degradation, overheating in transformers, etc..

The electricity supply companies are often unaware of the location of harmonic sources in the network, which may not comply the same quality standards. Therefore we have developed techniques for estimating the location of these sources, and in case of exceeding the levels specified in the rules, apply penalties.

The main objective of this paper is to identify the location of harmonic sources in power systems using state estimation methods based on least squares. (Research methods Heydt and Nguyen).

There were two test systems from literature; a system of 5 nodes and the other of 14. To test the results were used solutions given in the literature. From the results of test systems it is noted that the Heydt method doesn't identify the harmonic source for the 5 nodes system, whereas the Nguyen's method found in the location of sources of harmonics of all systems. The Heydt's method was very accurate results in 14 nodes systems. The method was also tested with Nguyen measurement error without accurate outcomes.

Programs were developed with the two methods of state estimation and a harmonic flow program elaborated in FORTRAN.

CONTENIDO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS	II
CARTA CESIÓN DE DERECHOS	III
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
CONTENIDO	VII
LISTA DE FIGURAS	XII
LISTA DE TABLAS	XIV
SIGLAS Y SIMBOLOGÍA	XIX

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Introducción	1
1.2 Estado del Arte	2
1.3 Objetivo	4
1.4 Justificación	4
1.5 Aportaciones	5
1.6 Alcances	5
1.7 Estructura de la tesis	6

CAPÍTULO 2

ESTUDIOS DE FLUJOS ARMÓNICOS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA PARA SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

2.1 Introducción	8
------------------	---

2.2 Método de Inyecciones de Corriente	8
2.3 Análisis Armónico Iterativo (Método de Gauss)	10
2.4 Estudio de Flujos de Potencia Armónico por el Método de Newton – Raphson	13

CAPÍTULO 3

IDENTIFICACIÓN DE FUENTES ARMÓNICAS USANDO ESTIMACIÓN DE ESTADO

3.1 Introducción	23
3.2 Método de Cuadrados Mínimos	24
3.3 Método de Cuadrados Mínimos para la Identificación de Fuentes Armónicas	26
3.3.1 Estimador de Estado Propuesto por Heydt en [15]	27
3.3.2 Estimador de Estado Propuesto por Nguyen en [19]	31

CAPÍTULO 4

RESULTADO DE APLICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS

4.1 Introducción	35
4.2 Estimación de un Sistema de 5 Nodos con una Fuente de Armónicas	35
4.2.1 Estimación de un Sistema de 5 Nodos con una Fuente de Armónicas sin Error en las Mediciones por el Método de Heydt [15].	37
4.2.2 Estimación de un Sistema de 5 Nodos con una Fuente de Armónicas sin Error en las Mediciones por el Método de Nguyen [19].	40
4.2.3 Estimación de un Sistema de 5 Nodos con una Fuente de Armónicas con Error en las Mediciones por el Método de Nguyen [19].	42
4.3 Estimación de un Sistema de 14 Nodos con una Fuente de	

Armónicas	47
4.3.1 Estimación de un Sistema de 14 Nodos con una Fuente de Armónicas sin Error en las Mediciones por el Método de Heydt [15].	49
4.3.2 Estimación de un Sistema de 14 Nodos con una Fuente de Armónicas sin Error en las Mediciones por el Método de Nguyen [19].	55
4.3.3 Estimación de un Sistema de 14 Nodos con una Fuente de Armónicas con Error en las Mediciones por el Método de Nguyen [19].	62
4.4 Estimación de un Sistema de 14 Nodos con dos Fuentes de Armónicas	68
4.4.1 Estimación de un Sistema de 14 Nodos con dos Fuentes de Armónicas sin Error en las Mediciones por el Método de Heydt [15].	69
4.4.2 Estimación de un Sistema de 14 Nodos con dos Fuentes de Armónicas sin Error en las Mediciones por el Método de Nguyen [19].	78
4.4.3 Estimación de un Sistema de 14 Nodos con dos Fuentes de Armónicas con Error en las Mediciones por el Método de Nguyen [19].	86
CAPÍTULO 5	
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS	
5.1 Conclusiones	95
5.2 Recomendaciones para Trabajos Futuros	96
REFERENCIAS	97

APÉNDICE A

INFORMACIÓN CARACTERÍSTICA DE LOS SISTEMAS DE PRUEBA

A.1 Sistema de 5 Nodos	102
A.2 Sistema de 14 Nodos	103

APÉNDICE B

TEORÍA DE ARMÓNICAS

B.1 Series de Fourier	105
B.2 Coeficientes de Fourier	106
B.3 Distorsión Armónica Total (THD)	107
B.4 Distorsión Total de la Demanda (TDD)	107
B.5 Cantidades de Potencia Bajo Situaciones no Sinusoidales	108
B.5.1 Valor Instantáneo	108
B.5.2 Potencia Instantánea	108
B.5.3 Valor RMS	108

APÉNDICE C

PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE FLUJOS ARMÓNICOS POR EL MÉTODO DE INYECCIONES DE CORRIENTE

C.1 Rutina Principal HARM_INJ	109
C.2 Subrutina LEEDATOS	110
C.3 Subrutina LEEDATOSARM	115
C.4 Subrutina CDATOS	117
C.5 Subrutina CYBUS	119
C.6 Subrutina SOLFLUJ	121
C.7 Subrutina THD	122
C.8 Subrutina THDTOT	123
C.9 Archivo de Entrada	125
C.10 Archivo de Salida	127

APÉNDICE D

PROGRAMAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE FUENTES ARMÓNICAS

D.1 Método de Heydt	130
D.1.1 Rutina Principal HARM_EST	130
D.1.2 Subrutina LEEDATOS	131
D.1.3 Subrutina MATR	137
D.1.4 Subrutina ESTIM	139
D.1.5 Subrutina THD	141
D.2 Archivo de Entrada	144
D.3 Archivo de Salida	146
D.4 Método de Nguyen	148
D.4.1 Rutina Principal HARM_EST	148
D.4.2 Subrutina LEEDATOS	149
D.4.3 Subrutina VECTORZ	156
D.4.4 Subrutina VECTORH	156
D.4.5 Subrutina ESTIM	159
D.4.6 Subrutina VOLTHARM	160
D.4.7 Subrutina THD	162
D.5 Archivo de Entrada	163
D.6 Archivo de Salida	165

LISTA DE FIGURAS

FIG. 2.1	Diagrama de flujo del método de inyecciones de corriente	9
FIG. 2.2	Carga rectificadora en el bus k	10
FIG. 2.3	Conducción en las fases a y b de un puente de Graetz	11
FIG. 2.4	Puente de Graetz durante la conmutación	12
FIG. 2.5	Método de Gauss-Seidel para el análisis armónico en un sistema eléctrico de potencia	14
FIG. 2.6	Diagrama de flujo del estudio de flujos de potencia armónico por el método de Newton-Raphson	21
FIG 3.1	El método de cuadrados mínimos consiste en encontrar A tal que AB es un mínimo	26
FIG 3.1	Sistema de 4 nodos	27
FIG 3.2	Diagrama de flujo del estimador armónico propuesto por Heydt	30
FIG 3.3	Diagrama de flujo del estimador armónico propuesto por Nguyen	32
FIG 4.1	Sistema de prueba de 5 nodos	36
FIG 4.2	Sistema de prueba de 14 nodos	49
FIG C.1	Primer archivo de entrada con los datos de la red	126
FIG C.2	Segundo archivo de entrada con los datos de la fuente Armónica	127
FIG C.3	Primer Sección del archivo de salida	128
FIG C.4	Segunda Sección del archivo de salida	128
FIG C.5	Tercera Sección del archivo de salida	129
FIG D.1	Primera Sección del archivo de entrada por el método de Heydt	145
FIG D.2	Segunda Sección del archivo de entrada por el método de Heydt	145
FIG D.3	Primer Sección del archivo de salida por el método de Heydt	146
FIG D.4	Segunda Sección del archivo de salida por el método de Heydt	147
FIG D.5	Tercera Sección del archivo de salida por el método de Heydt	148
FIG D.6	Primera Sección del archivo de entrada para el método de Nguyen	164

FIG D.7	Segunda Sección del archivo de entrada por el método de Nguyen	165
FIG D.8	Primer Sección del archivo de salida por el método de Nguyen	166
FIG D.9	Segunda Sección del archivo de salida por el método de Nguyen	166
FIG D.10	Tercera Sección del archivo de salida por el método de Nguyen	167

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1	Número y tipo de ecuaciones en un estudio de flujos de potencia armónico por el método de Newton-Raphson	18
Tabla 2.2	Número de estados para el problema de flujos de potencia armónico por el Método de Newton-Raphson	19
Tabla 2.3	Sub-matrices del Jacobiano	20
Tabla 4.1	Voltajes armónicos del sistema de 5 nodos	36
Tabla 4.2	Corriente Armónica de la Fuente de Armónicas (Compensador Estático de Vars)	36
Tabla 4.3	Mediciones para la estimación por el método de Heydt [15], sin error en las mediciones para el sistema de 5 nodos	37
Tabla 4.4	Corrientes armónicas estimadas, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 5 nodos	38
Tabla 4.5	Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 5 nodos	38
Tabla 4.6	Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 14 nodos	39
Tabla 4.7	THD de los voltajes, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 5 nodos	40
Tabla 4.8	Mediciones para la estimación por el método de Nguyen [19], sin error en las mediciones para el sistema de 5 nodos	40
Tabla 4.9	Corrientes armónicas estimadas, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 5 nodos	41
Tabla 4.10	Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 5 nodos	42
Tabla 4.11	Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados,	

	sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 5 nodos	43
Tabla 4.12	THD de los voltajes, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 5 nodos	44
Tabla 4.13	Mediciones para la estimación por el método de Nguyen [19], con error en las mediciones para el sistema de 5 nodos	44
Tabla 4.14	Corrientes armónicas estimadas, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 5 nodos	45
Tabla 4.15	Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 5 nodos	45
Tabla 4.16	Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 5 nodos	46
Tabla 4.17	THD de los voltajes, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen[19] para el sistema de 5 nodos	47
Tabla 4.18	Voltajes armónicos del sistema de 14 nodos	48
Tabla 4.19	Corriente Armónica de la Fuente de Armónicas [12-14]	48
Tabla 4.20	Mediciones para la estimación por el método de Heydt [15], sin error en las mediciones para el sistema de 14 nodos	50
Tabla 4.21	Corrientes armónicas estimadas, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 14 nodos	51
Tabla 4.22	Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 14 nodos	52
Tabla 4.23	Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 14 nodos	52
Tabla 4.24	THD de los voltajes, sin error en las mediciones, por el método de Heydt[15] para el sistema de 14 nodos	55
Tabla 4.25	Mediciones para la estimación por el método de Nguyen [19], sin error en las mediciones para el sistema de 14 nodos	56
Tabla 4.26	Corrientes armónicas estimadas, sin error en las mediciones,	

	por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos	57
Tabla 4.27	Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos	58
Tabla 4.28	Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos	59
Tabla 4.29	THD de los voltajes, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos	62
Tabla 4.30	Mediciones para la estimación por el método de Nguyen [19], con error en las mediciones para el sistema de 14 nodos	63
Tabla 4.31	Corrientes armónicas estimadas, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14	64
Tabla 4.32	Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos	65
Tabla 4.33	Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos	65
Tabla 4.34	THD de los voltajes, con error en las mediciones, por el método de Nguyen[19] para el sistema de 14 nodos	69
Tabla 4.35	Voltajes armónicos del sistema de 14 nodos con dos fuentes armónicas	70
Tabla 4.36	Corriente Armónica del Horno de Arco (arco activo)	70
Tabla 4.37	Mediciones para la estimación por el método de Heydt [15], sin error para el sistema de 14 nodos con dos fuentes de armónicas	71
Tabla 4.38	Corrientes armónicas estimadas, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 14 nodos con dos fuentes armónicas	72
Tabla 4.39	Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 14 nodos	73

Tabla 4.40	Comparación de la corriente del Horno de arco contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 14 nodos	73
Tabla 4.41	Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Heydt[15] para el sistema de 14 nodos con dos fuentes armónicas	74
Tabla 4.42	THD de los voltajes, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 14 nodos	78
Tabla 4.43	Mediciones para la estimación por el método de Nguyen [19], sin error para el sistema de 14 nodos con dos fuentes de armónicas	79
Tabla 4.44	Corrientes armónicas estimadas, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos con dos fuentes armónicas	80
Tabla 4.45	Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos	81
Tabla 4.46	Comparación de la corriente del Horno de arco contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos	81
Tabla 4.47	Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos con dos fuentes armónicas	82
Tabla 4.48	THD de los voltajes, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos	86
Tabla 4.49	Mediciones para la estimación por el método de Nguyen [19], con error para el sistema de 14 nodos con dos fuentes de armónicas	87
Tabla 4.50	Corrientes armónicas estimadas, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos con dos fuentes armónicas	88
Tabla 4.51	Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, con error en las mediciones, por el	

	método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos	89
Tabla 4.52	Comparación de la corriente del Horno de arco contra los estimados, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos	89
Tabla 4.53	Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos con dos fuentes armónicas	89
Tabla 4.54	THD de los voltajes, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos	94
Tabla A.1	Datos de las líneas del sistema de 5 nodos	102
Tabla A.2	Datos de los generadores del sistema de 5 nodos	102
Tabla A.3	Datos de los flujos de potencia a frecuencia fundamental del sistema de 5 nodos	102
Tabla A.4	Datos de los capacitores del sistema de 5 nodos	103
Tabla A.5	Datos de las líneas del sistema de 14 nodos	103
Tabla A.6	Datos de los generadores del sistema de 14 nodos	103
Tabla A.7	Datos de los flujos de potencia a frecuencia fundamental Del sistema de 14 nodos	104
Tabla A.8	Datos de los capacitores del sistema de 14 nodos	104

SIGLAS Y SIMBOLOGÍA

SIGLAS

THD	Distorsión Armónica Total
LPQ	Bus lineal PQ
LPV	Bus lineal PV
NLPQ	Bus no lineal PQ
C.D.	Corriente Directa

SIMBOLOGÍA

h	Armónica
H	Número total de armónicas en la red
V_h	Voltaje Armónico nodal h
I_h	Corriente Armónica nodal h
Y_h	Matriz Y_{bus} de la armónica h
k	bus
α	Ángulo de disparo del Rectificador de Graetz
*	Convolución
$i(t_0)$	Corriente inicial de C.D. del rectificador
F	Circuito del lado C.D. del rectificador modelado como una inductancia compuesta
R	Resistencia
E	Voltaje de C.D
A, B y C	Fases del circuito
$V_{an}(t)$	Voltaje an
$V_{bn}(t)$	Voltaje bn
$V_{cn}(t)$	Voltaje cn
P	Potencia Activa
Q	Potencia Reactiva
$\Delta P_i^{(1)}$	Incremento de las Potencia Activa
$\Delta Q_i^{(1)}$	Incremento de las Potencia Reactiva
$Y_{ij}^{(1)}$	Magnitud de la Admitancia del nodo i, j

$\theta_{ij}^{(1)}$	Ángulo de la Admitancia del nodo i, j
$z_i^{- (h)}$	Impedancia primitiva de la armónica \square
J_h	Matriz Jacobiana de la armónica h
Y	Variable aleatoria
η	Parámetro desconocido
ε	Error
x_1, \dots, x_{p-1}	Constantes conocidas
β_j	Parámetros a estimar
X	Matriz de regresión
$[G]_h$	Sub-matriz que se obtienen de la matriz Y_h .
$[H]_h$	Sub-matriz que se obtienen de la matriz Y_h .
$[J]_h$	Sub-matriz que se obtienen de la matriz Y_h .
$[K]_h$	Sub-matriz que se obtienen de la matriz Y_h .
$[J^+]_h$	Pseudoinversa de $[J]_h$
$H(h)$	Matriz de mediciones
$Z(h)$	Vector de mediciones
P_g	Potencia Activa generada
Q_g	Potencia Reactiva generada
P_d	Potencia Activa demandada
Q_d	Potencia Reactiva demandada

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Con el incremento de cargas no lineales y la electrónica de potencia el análisis armónico en los Sistemas Eléctricos de Potencia se ha vuelto fundamental, ya que las fuentes de armónicas pueden generar problemas de resonancia, disparos intempestivos en cargas sensibles, degradación de la capacitancia interna, falla en las celdas de los capacitores, calentamiento excesivo en los transformadores, etc.

Las compañías suministradoras desconocen la ubicación de estas fuentes, mismas que pueden no cumplir los estándares de calidad.

La ubicación de fuentes armónicas no puede ser hecha mediante mediciones en la red, ya que las armónicas se distribuyen en el sistema y es difícil identificar en que nodo se encuentran conectadas. Por ello se desarrollaron métodos para localizar las fuentes de armónicas, mismas que pueden ser penalizadas si no cumplen con la normatividad.

Los métodos de cuadrados mínimos para la identificación de fuentes armónicas están basados en el método de inyecciones de corriente, y no son iterativos, por lo que son de fácil implementación. En la literatura se han propuesto distintas metodologías [15-21, 24-25]. En este trabajo sólo se toman en cuenta los métodos propuestos por Heydt en [15] y por Nguyen en [19].

Los métodos por filtros de Kalman [20-21,24.25] son una variante de los métodos de cuadrados mínimos.

También es posible identificar fuentes armónicas con redes neuronales [23], aunque el inconveniente de estas es que se tiene que hacer una red para cada caso.

Con el estimador de estado armónico se puede obtener la corriente inyectada por la fuente armónica a la red, así como los voltajes y corrientes armónicos nodales, la Distorsión Armónica Total (THD) en el sistema, entre otros.

1.2 ESTADO DEL ARTE

La estimación de estado aplicada a los Sistemas Eléctricos de Potencia se dió alrededor de los años setentas por Fred C. Schweppe [29]. Los trabajos sobre estimación de estado en transmisión y distribución son variados; la estimación de estado para la identificación de fuentes de armónicas se propuso por primera vez por Heydt en [15] a finales de los años ochenta, en el cual propone dos metodologías, una con mediciones de Potencias nodales, y la última con mediciones de corrientes nodales, la cual está basada en el método de inyecciones de corrientes propuesto por Mahmoud en [1] a principio de los ochentas.

Los diferentes métodos para la estimación de estado armónica emplean el método de cuadrados mínimos [15-22, 24-25]. La estimación de estado armónica en redes neuronales está documentada en [23].

Por otro lado, Meliopolus en [16], propone que las mediciones de corriente sean trifásicas, y además agrega mediciones de voltaje. La estimación se realiza en parte real e imaginaria, empleando la función Lagrangiana para optimizar la solución.

Arrillaga en [17], desarrolla un estimador donde las mediciones pueden ser voltajes y corrientes armónicas nodales y además corrientes armónicas de rama. Los voltajes y corrientes armónicas estimadas se utilizan para comprobar si las fuentes inyectan o absorben armónicas de acuerdo al impacto que se tiene en la red.

Nguyen en [19] propone una extensión del método de Heydt [15], donde agrega mediciones de voltajes armónicos, clasificando los nodos en cuatro tipos de acuerdo a las mediciones que se tengan. También se propone un método para evaluar la contribución de potencia de las fuentes armónicas.

Se han desarrollado trabajos de estimación empleando los filtros de Kalman que son una derivación del método de cuadrados mínimos [20-22, 24-25]. El método de cuadrados mínimos se aplica en sistemas estáticos, mientras que los filtros de Kalman son empleados para sistemas dinámicos.

Beides y Heydt [21] emplean los filtros de Kalman para estimar por medio de mediciones de potencia real y reactiva, los voltajes en el sistema de potencia a diferentes niveles de voltaje.

Ma y Giris [22] proponen como variables de estado las inyecciones de corrientes, el problema es dependiente de la frecuencia.

1.2.1 Trabajos desarrollados en la SEPI.

Dentro de los trabajos que se han realizado en la SEPI para la identificación de fuentes armónicas se encuentra el de Montero [33], en el cual se empleó el método de redes neuronales para resolver el sistema de 5 nodos.

En cuanto a los trabajos de armónicas, en [35] Gómez analizó la sensibilidad de diferentes modelos de cargas ante las variaciones de las formas de onda de voltajes y corrientes armónicas. Luna [34] hace un estudio de flujos armónico a una red eléctrica y plantea diferentes formas para la mitigación de las armónicas en dicha red. Rey en [36] mediante simulaciones en MatLab modeló y analizó el comportamiento de un filtro activo de corriente.

Dentro de los trabajos de estimación por cuadrados mínimos se encuentra el de Michel [37] que desarrolló un algoritmo para la estimación de estado por cuadrados mínimos en sistemas de transmisión, mientras que Trejo en [38] lo hizo para redes de distribución. Ávila en [39] analiza la robustez del Jacobiano y la matriz de Ganancias del método de cuadrados mínimos para sistemas de transmisión.

1.3 OBJETIVO

Investigar, desarrollar códigos y evaluar métodos para la identificación de la ubicación de fuentes armónicas por métodos de estimación.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Debido al incremento de cargas no lineales que introducen armónicas al sistema, ha sido necesario desarrollar métodos para el análisis armónico en Sistemas Eléctricos de Potencia [1]. Estos métodos ayudan a conocer la propagación de armónicas en el sistema, lo cual puede usarse para el cálculo de capacitores, o simplemente conocer en que parte de la red se tiene mayor problema.

Las compañías suministradoras no siempre conocen la ubicación de las fuentes armónicas, por lo se han desarrollado métodos para detectar su ubicación, y así poder conocer las armónicas inyectadas a la red para que en caso de ser necesario, la compañía suministradora aplique sanciones a los consumidores.

No es posible conocer la ubicación de fuentes armónicas midiendo cada nodo de la red, ya que las armónicas se distribuyen por la red. Si se tienen varias fuentes armónicas en el sistema, no es viable fiarse en las mediciones, ya que los nodos con mayor Distorsión Armónica Total (THD) de voltaje no son los que tienen conectadas las distintas fuentes.

También los métodos para localizar las fuentes armónicas ayudan al diseño de bancos de capacitores para disminuir las armónicas en la red.

Para llevar a cabo un estudio de flujos armónicos es necesario conocer la ubicación y los datos de las distintas fuentes armónicas conectadas al sistema.

Los métodos empleados para la identificación de fuentes armónicas son: cuadrados mínimos y redes neuronales. Los métodos de cuadrados mínimos son de fácil implementación, ya que no son iterativos y deterministas, además están basados en el

método de inyecciones de corriente. Las redes neuronales presentan la desventaja de que para cada caso se requiere una nueva red neuronal, lo cual las hace ineficaces en sistemas eléctricos de potencia reales.

1.5 APORTACIONES

Desarrollo de una herramienta computacional en FORTRAN 90, que resuelve flujos de potencia armónicos por el método de inyecciones de corriente para más de una fuente armónica.

Desarrollo de una herramienta computacional en FORTRAN 90, que identifica las fuentes armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia por el método de Heydt [15] para mas de una fuente armónica.

Desarrollo de una herramienta computacional en FORTRAN 90, que identifica las fuentes armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia por el método de Nguyen [19] para mas de una fuente armónica.

Se verifica que los índices de Distorsión Armónica Total no identifican la ubicación de las fuentes de armónicas.

1.6 ALCANCES

Se utilizan dos métodos para identificar fuentes de armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia hasta para dos fuentes armónicas.

Se demostró que el THD del voltaje no es un índice que ayude a identificar fuentes de armónicas en la red.

1.7 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Este trabajo consta de cinco capítulos y tres apéndices. El primer capítulo contiene el objetivo, justificación, estado del arte y la aportación de este trabajo.

En el segundo capítulo se describen los métodos para la solución de flujos armónicos (Método de inyecciones de corriente, Gauss-Seidel y Newton-Raphson), además de describir sus características, ventajas, desventajas, y un diagrama de flujo para facilitar el entendimiento de cada método.

El tercer capítulo presenta una breve explicación del método de cuadrados mínimos. También se comentan los dos métodos empleados para la identificación de fuentes armónicas, el Método de Heydt [15] y de Nguyen [19]; se mencionan las características de cada método, se da un diagrama de flujo para facilitar su implementación y además de enlistar sus ventajas y desventajas.

En el cuarto capítulo se enlistan los resultados obtenidos para los diferentes casos, mismos que fueron resueltos por el Método de Heydt [15] y de Nguyen [19]. El primer caso que se reporta es el de un sistema de 5 nodos con una fuente armónica sin error en las mediciones, para el segundo caso se emplea el mismo sistema pero ahora con error en las mediciones. El tercer y cuarto caso se implementa con un sistema de 14 nodos con una fuente armónica, lo que difiere es que en el tercero no hay error en las mediciones, mientras que en el cuarto si lo hay. El quinto caso emplea el mismo sistema de 14 nodos pero conectando dos fuentes armónicas, sin tener error en las mediciones, y el último caso es el mismo sistema con las mismas fuentes armónicas pero con error en las mediciones.

El capítulo 5 contiene las conclusiones y observaciones que se obtuvieron durante el desarrollo de este trabajo, además de las recomendaciones para realizar trabajos futuros.

El Apéndice A tiene los datos de los sistemas de prueba empleados para este trabajo.

El Apéndice B una explicación básica de armónicas y algunas definiciones como la Distorsión Armónica Total, Valor RMS, Series de Fourier, etc.

En el Apéndice C se encuentra el programa empleado para la solución de flujos armónicos por el método de inyecciones de corriente.

Por último el Apéndice D contiene los programas usados para la identificación de fuentes armónicas (Método de Heydt y Nguyen).

CAPÍTULO 2

ESTUDIOS DE ARMÓNICAS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA PARA SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

2.1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años ha habido un incremento en las cargas con comportamiento no lineal, como los dispositivos controlados por la electrónica de potencia, mismos que introducen armónicas al Sistema Eléctrico de Potencia. Por ello se han desarrollado varios métodos para el estudio de las armónicas en los Sistemas Eléctricos de Potencia, dentro de los cuales se encuentran los métodos en el dominio de la frecuencia y los métodos en el dominio del tiempo [1-3, 5].

Dentro de los métodos en el dominio de la frecuencia se encuentran: el método de inyecciones de corriente [1,4-7], y reformulaciones de los métodos de flujos de potencia convencionales (Gauss-Seidel [4-11] y Newton-Raphson [2-3,4-7]) para el cálculo de la penetración armónica en la red. En este capítulo se explican los tres métodos mencionados.

2.2 MÉTODO DE INYECCIONES DE CORRIENTE

El método de inyecciones de corriente consiste en cambiar las fuentes de armónicas por fuentes de corriente que inyectan corrientes armónicas al sistema y así conocer el voltaje armónico nodal y su ángulo de fase. Para poder implementar el método es necesario conocer algunos datos de la fuente armónica, como las armónicas inyectadas por la fuente al sistema y la magnitud de cada corriente. También debe realizarse un estudio de flujos de potencia convencional a la red [1].

Una vez realizados los pasos previos al método, es necesario calcular la matriz de admitancias nodales para cada armónico y resolver la siguiente ecuación algebraica:

$$I_h = Y_h V_h \quad (2.1)$$

Donde Y_h es la matriz de admitancias de la armónica h , V_h es un vector que contiene el voltaje armónico nodal h , e I_h es un vector con la corriente de la armónica h inyectada por las cargas no lineales del sistema.

Como se observa en la Ecuación (1), este método no es iterativo, por lo que su resultado se obtiene directamente. De igual forma es el método mas sencillo ya que consiste en resolver la ecuación (1) para cada armónica de la red. En la figura 2.1 se ilustra por medio de un diagrama de flujo el método de inyecciones de corriente [1].

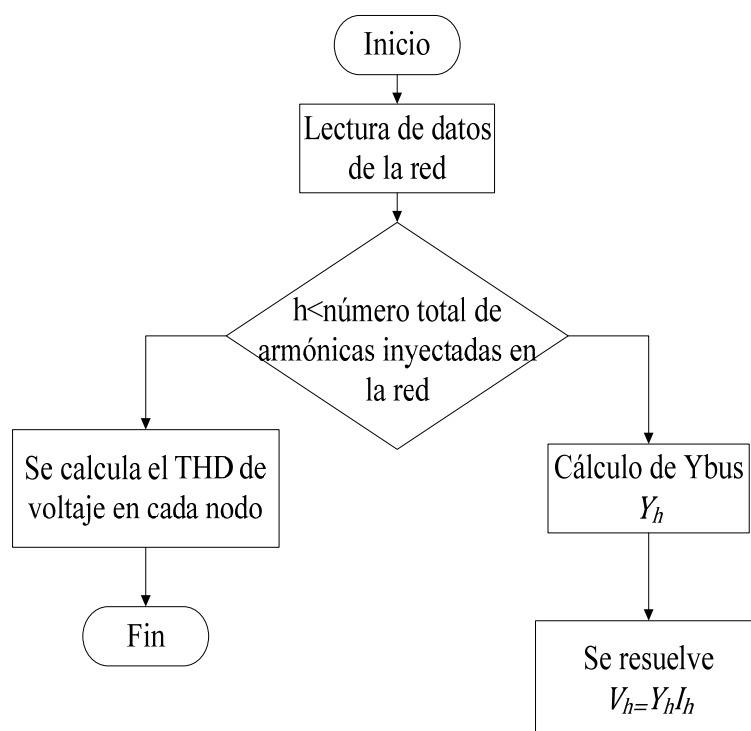


Fig. 2.1 Diagrama de flujo del método de inyecciones de corriente

Las ventajas de la metodología descrita son que la velocidad y eficiencia del método [4]. Debido a que el método no es iterativo, siempre se obtiene una solución [4]. Para una Distorsión Armónica Total (THD) baja en los voltajes nodales del bus y de corriente de la fuente armónica, se obtienen resultados precisos [6].

Desafortunadamente, el método de inyecciones de corriente no puede ser empleado con alta penetración armónica; esto es que con un THD arriba del 5% este método se vuelve impreciso [6].

2.3 ANÁLISIS ARMÓNICO ITERATIVO (MÉTODO DE GAUSS-SEIDEL)

Para facilitar la explicación de este método, consideremos un rectificador, el cual es un puente de Graetz de seis pulsos, conectado en el bus k de un sistema de transmisión como se muestra en la figura 2.2. El ángulo de disparo de este rectificador puede expresarse como [6]:

$$\alpha = f(P_{dc}, |v_k|, |i_k|) \tag{2.2}$$

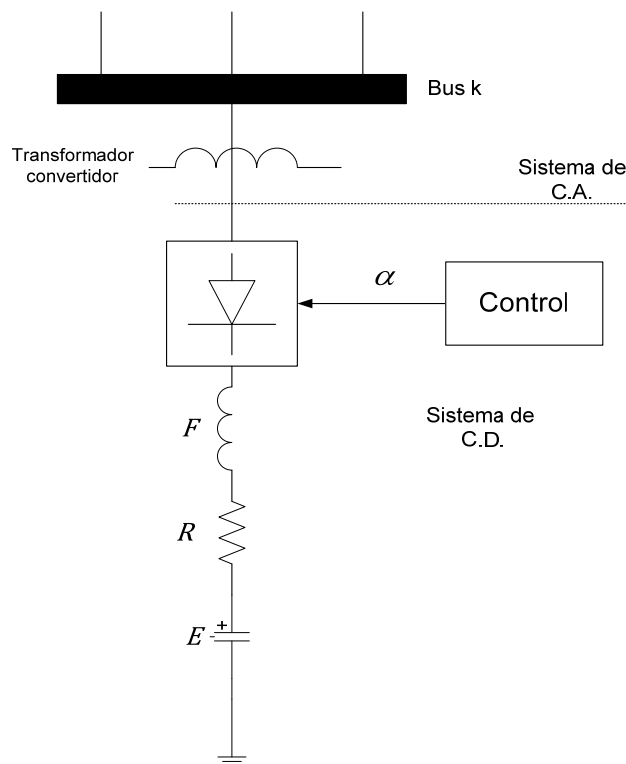


Fig. 2.2. Carga rectificadora en el bus k [6]

Después de un desarrollo mostrado en [6], cuando se encuentran conduciendo las fases A y B, se tiene la siguiente corriente de fase:

$$i(t) = e^{-\frac{Rt}{F+2T}} i(t_0) + e^{-\frac{Rt}{F+2T}} * (V_{an}(t) - V_{bn}(t) - E) \tag{2.3}$$

Donde $*$ denota la convolución, e $i(t_0)$ es el valor de la corriente de C.D. al principio del intervalo, F es un circuito del lado C.D. del rectificador que se modela como una inductancia compuesta, R es una resistencia y E un voltaje de C.D [6]. La

figura 2.3 muestra el circuito equivalente del rectificador cuando conducen las fases A y B [6].

Este tiempo de conducción no es el único en resolverse, ya que existen seis regiones diferentes de conducción y seis periodos de conmutación. Por ejemplo cuando conmutan las fases B y C, se tiene el circuito equivalente mostrado en la figura 2.4, y la corriente de fase es [6]:

$$i(t) = e^{\left(\frac{-Rt}{F+\frac{3}{2}T}\right)} i(t_0) + e^{\left(\frac{-Rt}{F+\frac{3}{2}T}\right)} * (V_{an}(t) - V_{cn}(t) - \frac{1}{2}V_{bn}(t)) \quad (2.4)$$

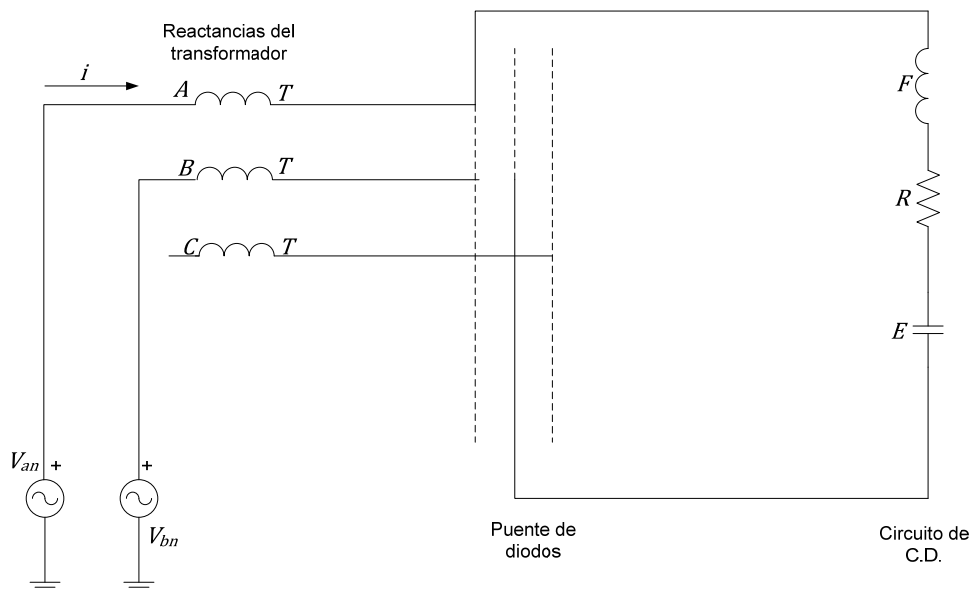


Fig. 2.3. Conducción en las fases A y B de un puente de Graetz [6]

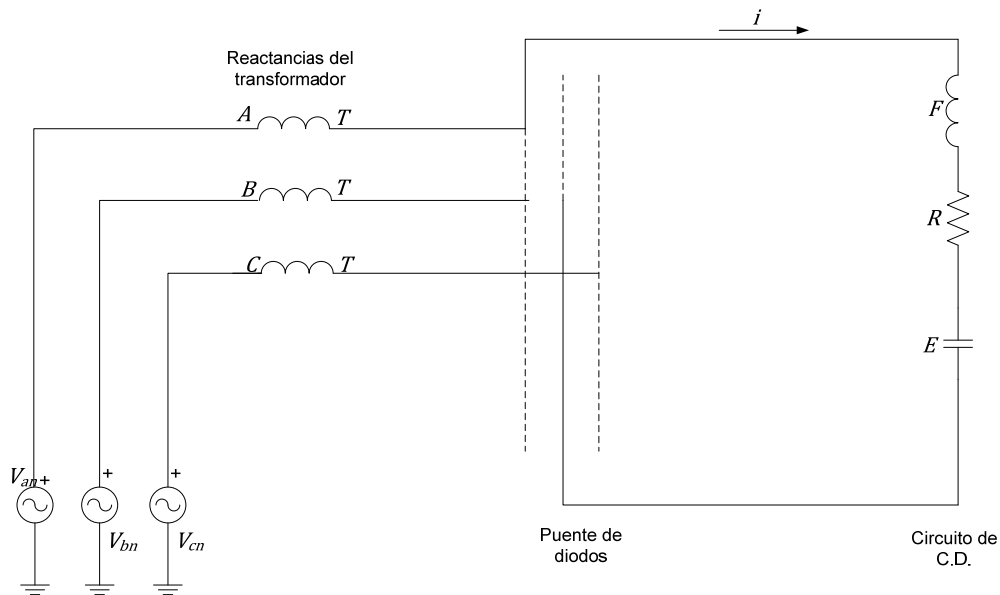


Fig. 2.4. Puente de Gaetz durante la conmutación [6]

Las condiciones que deben conocerse para la solución de la corriente de fase $i(t)$ son las siguientes:

- Cuando se tiene una alimentación de voltaje desbalanceado, es necesario resolver la ecuación de corriente en forma trifásica para los seis periodos de conducción y de conmutación [6].
- Si la alimentación de voltaje es balanceada, la ecuación de corriente debe resolverse para los seis periodos de conducción y conmutación solo para la fase A. Las corrientes de las demás fases serán idénticas en magnitud y desplazadas en ángulo 120° [6].
- Debido a la simetría de la onda de corriente, solo es necesario obtener las corrientes para tres periodos de conducción y conmutación. Los demás serán idénticas, solo que con signo contrario [6].
- Es necesario inicializar el ángulo de disparo, se encuentra una solución para los seis periodos de conducción y conmutación; se calcula la potencia promedio por ciclo y se actualiza el ángulo de disparo, este proceso se repite hasta que la potencia especificada y la calculada concuerden con una tolerancia dada [6].
- El proceso iterativo para calcular el ángulo de disparo del convertidor puede presentar problemas de divergencia [6].
- La solución puede diferenciarse por el ángulo de disparo, por lo que se debe obtener una ecuación para actualizar el ángulo de disparo [6]:

$$\alpha_{n+1} = \alpha_n + \frac{\partial \alpha}{\partial P} \Delta P$$

- Debido a que la solución de flujos armónicos requiere del Método de Gauss-Seidel, se debe pensar en limitar el número de armónicas a analizar [6].
- Se puede modificar el algoritmo para hacer un análisis con varias cargas rectificadoras. El análisis para los inversores es el mismo [6].

La explicación dada es la forma de realizar el estudio de flujos armónicos por el método de análisis armónico iterativo, que también se resume en el diagrama de flujos de la figura 2.5.

La principal desventaja de este método es que consume demasiado tiempo computacional en su ejecución [6]. Las razones principales de esta desventaja son:

- El estudio de Gauss-Seidel debe aplicarse para cada armónica del sistema [6].
- La inicialización de los datos para el estudio armónico es mucho más complicado que para el estudio de flujos convencional [6].
- El Método de Gauss-Seidel puede presentar problemas de divergencia si la inicialización está lejana de la solución [6].

2.4 ESTUDIO DE FLUJOS DE POTENCIA ARMÓNICO POR EL MÉTODO DE NEWTON - RAPHSON

Para realizar el cálculo de flujos de potencia armónico por el Método de Newton-Raphson, es necesario agregar el desajuste de potencia, considerando las frecuencias armónicas, y las corrientes armónicas [2-3].

Al igual que en el estudio de flujos de potencia convencional, se tienen diferentes tipos de buses, entre los cuales se encuentran los *buses lineales* y los *buses no lineales* [2-3]. El término bus lineal es aquel que no presenta una distorsión de corriente de línea cuando el voltaje de bus es sinusoidal, estos buses son los empleados en el problema de flujos de potencia convencional, por ejemplo los buses convencionales de

generación o con cargas convencionales (no rectificadores) conectadas [6]. El bus no lineal es aquel que presenta una distorsión en la corriente de línea provocada por fuentes o cargas, aunque la alimentación de voltaje sea sinusoidal, es decir buses con cargas conectadas como rectificadores, inversores, lámparas fluorescentes, etc [6].

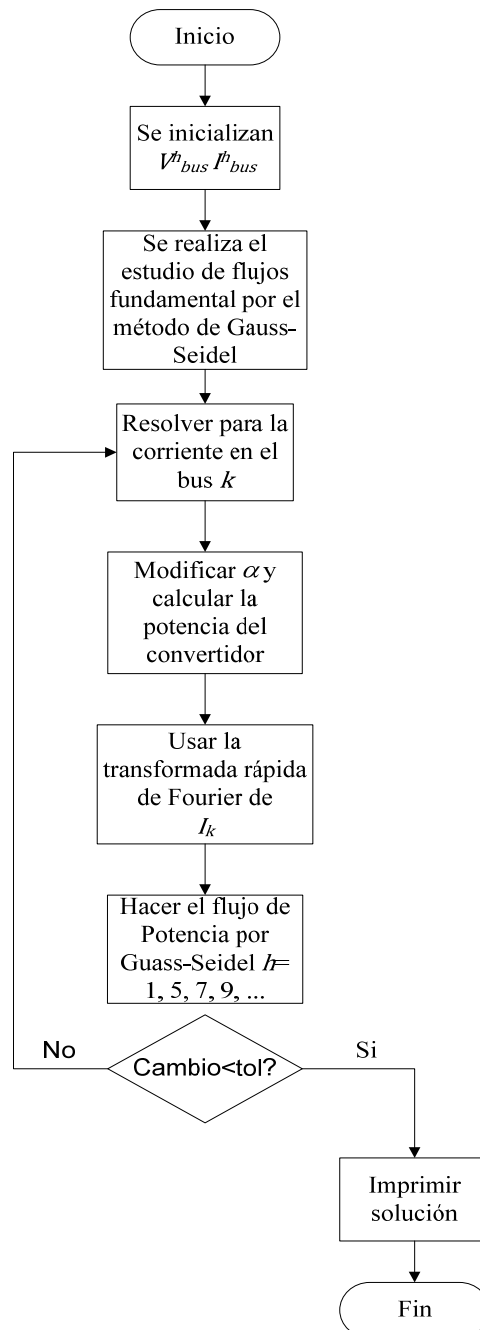


Fig. 2.5 Método de Gauss-Seidel para el análisis armónico en un Sistema Eléctrico de Potencia

Los tipos de buses en el flujo de potencia armónico son:

- Bus compensador: es solo un bus lineal y de voltaje controlado [2-3].
- Buses lineales PQ: son buses de carga, donde se especifica la Potencia Activa y Reactiva (P y Q) a la frecuencia fundamental, esto es sus cargas no introducen armónicos al sistema [2-3].
- Buses no lineales PQ: Son buses con dispositivos no lineales conectados como convertidores [2-3].
- Buses lineales PV: Son buses en los que se especifican la Potencia Activa y la magnitud del Voltaje (P y V) a la frecuencia fundamental [2-3].

Puede haber buses no lineales PV, los cuales son buses de voltaje controlado donde se encuentre conectado un inversor, estos pueden considerarse de forma análoga a los buses lineales PV, pero esto no será abordado en este trabajo [2-3].

Para el caso de flujos de potencia armónico, no es conveniente emplear los voltajes en forma polar, ya que los flujos de potencia activa y reactiva no son los únicos presentes, y por ello no existe una relación entre la magnitud del voltaje y el ángulo de fase con los flujos de potencia presentes, por ello es recomendable escribir los voltajes y las corrientes en forma rectangular [6].

Debido al comportamiento del generador en la presencia de armónicos se tiene una impedancia de secuencia negativa, la cual se asume que los buses de generación existe una impedancia de lazo cerrado a tierra la cual existe solo a las frecuencias armónicas, esta impedancia es conocida como *impedancia única armónica* [6]. La impedancia de secuencia negativa puede obtenerse al aplicar un estudio de corto circuito al generador [6].

En los buses lineales PQ, se tienen las siguientes expresiones de desajuste [2-3]:

$$\Delta P_i^{(1)} = P_i^{(1)} - |Y_{ij}^{(1)}| |v_i^{(1)}| |v_i^{(1)}| \cos(-\theta_{ij}^{(1)}) - \sum_{j \neq 1} |Y_{ij}^{(1)}| |v_j^{(1)}| |v_i^{(1)}| \cos(-\theta_{ij}^{(1)} - \delta_j^{(1)} + \delta_i^{(1)}) \quad (2.5)$$

$$\begin{aligned} \Delta Q_i^{(1)} = & Q_i^{(1)} - |Y_{ij}^{(1)}| |v_i^{(1)}| |v_i^{(1)}| \sin(-\theta_{ij}^{(1)}) \\ & - \sum_{j \neq 1} |Y_{ij}^{(1)}| |v_j^{(1)}| |v_i^{(1)}| \sin(-\theta_{ij}^{(1)} - \delta_j^{(1)} + \delta_i^{(1)}) \end{aligned} \quad (2.6)$$

La corriente a las frecuencias armónicas para los buses no lineales se calcula como [2-3]:

$$I_{bus}^{(h)} = Y_{bus}^{(h)} V_{bus}^{(h)} \quad (2.7)$$

Los voltajes armónicos en el bus están relacionados por la siguiente expresión [2-3]:

$$v_i^{(h)} = z_i^{- (h)} i_i^{(h)} \quad (2.8)$$

Donde $z_i^{- (h)}$ indica la impedancia primitiva, mientras que el superíndice (h) el armónico estudiado.

Para el caso de los buses PQ no lineales, se tomará en cuenta cuando el bus es un rectificador [2-3]. Debido a que un inversor tiene las mismas características de un rectificador, es sencillo extender el análisis [2-3]. En lo que respecta a las lámparas fluorescentes y de descarga de gas, hay un programa comercial que realiza el análisis de armónicas, y no ha existido nada nuevo al respecto [6].

Dado un bus de voltaje y un ángulo de disparo, es posible encontrar las corrientes armónicas del convertidor con la siguiente ecuación [2-3]:

$$i_i^{(h)} = f_1(v_i^{(h)}, \alpha) \quad h = 1, 2, 3, \dots, H \quad (2.9)$$

Donde α es el ángulo de disparo y H es la armónica de mayor orden. La potencia activa es [2-3]:

$$P_i^{(1)} = f_2(v_i^{(h)}, \alpha) \quad (2.10)$$

Por ultimo las expresiones de desajuste para nos buses PQ no lineales es [2-3]:

$$\Delta P_i^{(1)} = 0 \quad (2.11)$$

$$\Delta Q_i^{(1)} = 0 \quad (2.12)$$

En los buses lineales PV, el desajuste en la potencia activa es [2-3]:

$$\Delta P_i^{(h)} = 0 \quad (2.13)$$

Y también una expresión que incluya la impedancia única armónica de los generadores explicada anteriormente [2-3]:

$$v_i^{(h)} - z_i^{-(h)} i_i^{(h)} = 0 \quad (2.14)$$

El número y tipo de ecuaciones se muestra en la tabla 2.1, mientras que la tabla 2.2 enlista el número de incógnitas [6].

Para el caso de flujos de potencia armónicos por el Método de Newton-Raphson el Jacobiano J_h queda de la siguiente manera [6]:

$$J_h = \begin{pmatrix} J_1 & J_2 & J_3 \\ J_4 & J_5 & J_6 \\ J_7 & J_8 & J_9 \end{pmatrix} \quad (2.15)$$

La tabla 2.3 muestra un resumen de las sub-matrices que forman el Jacobiano J_h [6].

Tabla 2.1 Número y tipo de ecuaciones en un estudio de flujos de potencia armónico por el método de Newton-Raphson [6]

Tipo de bus	Tipo de ecuación	Forma de la ecuación	Válido para el armónico h	Numero de ecuación
LPQ	MP, MQ	$\Delta P^{(1)} = 0$ $\Delta Q^{(1)} = 0$	1	$2n_{lpq}$
	CC	$I_{bus}^{(h)} - Y_{bus}^{(h)} V_{bus}^{(h)} = 0$	$1 < h \leq H$	$2(H - 1)n_{lpq}$
	ZL	$v_i^{(h)} - z_i^{- (h)} i_i^{(h)} = 0$	$1 < h \leq H$	$2(H - 1)n_{lpq}$
	Subtotal			$4Hn_{lpq}$
NLPQ	FTC	$i_i^{(h)} - f_1(v_i^{(h)}, \alpha_i) = 0$	$1 < h \leq H$	$2Hn_{nlpq}$
	CPC	$P_h^{(1)} - f_2(v_i^{(h)}, \alpha_i) = 0$	1	n_{nlpq}
	MP, MQ	$\Delta P^{(1)} = 0$ $\Delta Q^{(1)} = 0$	1	$2n_{nlpq}$
	CC	$I_{bus}^{(h)} - Y_{bus}^{(h)} V_{bus}^{(h)} = 0$	$1 < h \leq H$	$2(H - 1)n_{nlpq}$
Subtotal			$4(H + 1)n_{nlpq}$	
LPV	MP	$\Delta P^{(1)} = 0$	1	n_{lpv}
	HO	$v_i^{(h)} - z_i^{- (h)} i_i^{(h)} = 0$	$1 < h \leq H$	$2(H - 1)n_{lpv}$
	CC	$I_{bus}^{(h)} - Y_{bus}^{(h)} V_{bus}^{(h)} = 0$	$1 < h \leq H$	$2(H - 1)n_{lpv}$
	Subtotal			$4(H - 3)n_{lpv}$
Número total de ecuaciones		$4Hn_{lpq} + 4(H + 1)n_{nlpq} + 4(H - 3)n_{lpv}$		

Nomenclatura

Tipos de bus		Tipos de ecuación	
LPQ	Bus lineal PQ Bus lineal PV Bus no lineal PQ	CC	Continuidad de la corriente
LPV		CPC	Cálculo de la potencia del convertidor
NLPQ		FTC	FFT de la corriente del convertidor
		HO	Única impedancia armónica
		MP	Desajuste de Potencia
		MQ	Desajuste de potencia reactiva
		ZL	Impedancia de la carga

La metodología para la solución de los flujos de potencia armónico por el Método de Newton-Raphson consta en los siguientes pasos [2-3]:

1.- Se obtiene una solución de la red por el Método de Newton-Raphson convencional (es decir a la frecuencia fundamental) [2-3,6].

2.- Se inicializan las variables de estado y se calcula el Jacobiano. Ya que el Jacobiano es muy disperso se recomienda usar técnicas de esparsidad [2-3, 6].

3.- Se factoriza el Jacobiano en la Matriz triangular superior y en la matriz triangular inferior [2-3,6]:

$$J_h = (L)(U) \tag{2.16}$$

4.- Una vez factorizado el Jacobiano, se emplea la siguiente fórmula para actualizar [2-3,6]

$$\Delta F = -(L)(U)\Delta X \tag{2.17}$$

Donde ΔF es el vector con las expresiones de desajuste y ΔX es el vector de correcciones de las variables de estado X .

5.- Una vez encontradas las correcciones ΔX se actualizan los valores [2-3,6]

$$X_{k+1} = X_k + \Delta X \tag{2.18}$$

6.- Este proceso continua hasta que el vector de desajuste es lo suficientemente pequeño.

La figura 2.6 muestra un diagrama de flujo del método de Newton-Raphson para el cálculo de flujos de potencia armónicos.

Tabla 2.2. Número de estados para el problema de flujos de potencia armónico por el Método de Newton-Raphson [6]

Variable de estado	Bus LPQ	Bus NLPQ	Bus LPV
$V^{(1)}$	n_{lpq}		
$\delta^{(1)}$			n_{lpv}
α		n_{nlpq}	
$I^{(h)}$ $h > 1$	$2(H - 1)n_{lpq}$	$2(H - 1)n_{nlpq}$	$2(H - 1)n_{lpv}$
$V^{(h)}$ $h > 1$	$2(H - 1)n_{lpq}$	$2(H - 1)n_{nlpq}$	$2(H - 1)n_{lpv}$
$I^{(1)}$		n_{nlpq}	
$V^{(1)}$		n_{nlpq}	
Total	$4Hn_{lpq}$	$(4H + 1)n_{nlpq}$	$(4H - 3)n_{lpv}$

Tabla 2.3 Sub-matrices del Jacobiano[6]

Sub-matriz	Filas			Columnas		
	Tipo de ecuación	Tipo de bus	Número de ecuaciones	Tipos de variable de estado	Tipo de bus	Número de variables
J_1	$\Delta P^{(1)}$	LPQ	n_{lpq}	$ V^{(1)} $	LPQ	n_{lpq}
	$\Delta Q^{(1)}$	LPQ	n_{lpq}	$\delta^{(1)}$	LPQ	n_{lpq}
	$\Delta I^{(h)}$	LPQ	$2(H-1)n_{lpq}$	$I^{(h)}$	LPQ	$2(H-1)n_{lpq}$
	$\Delta V^{(h)}$	LPQ	$2(H-1)n_{lpq}$	$V^{(h)}$	LPQ	$2(H-1)n_{lpq}$
J_4	$\Delta I_c^{(h)}$	NLPQ	$2Hn_{nlpq}$	$ V^{(1)} $	LPQ	n_{lpq}
	$\Delta P_c^{(h)}$	NLPQ	n_{nlpq}	$\delta^{(1)}$	LPQ	n_{lpq}
	$\Delta P^{(1)}$	NLPQ	n_{nlpq}	$I^{(h)}$	LPQ	$2(H-1)n_{lpq}$
	$\Delta Q^{(1)}$	NLPQ	n_{nlpq}	$V^{(h)}$	LPQ	$2(H-1)n_{lpq}$
	$\Delta I^{(h)}$	NLPQ	$2(H-1)n_{nlpq}$			
J_7	$\Delta P^{(1)}$	LPV	n_{lpv}	$ V^{(1)} $	LPQ	n_{lpq}
	$\Delta V^{(h)}$	LPV	$2(H-1)n_{lpv}$	$\delta^{(1)}$	LPQ	n_{lpq}
	$\Delta I^{(h)}$	LPV	$2(H-1)n_{lpv}$	$I^{(h)}$	LPQ	$2(H-1)n_{lpq}$
				$V^{(h)}$	LPQ	$2(H-1)n_{lpq}$
J_2	$\Delta P^{(1)}$	LPQ	n_{lpq}	α	NLPQ	n_{nlpq}
	$\Delta Q^{(1)}$	LPQ	n_{lpq}	$I^{(h)}$	NLPQ	$2(H-1)n_{nlpq}$
	$\Delta I^{(h)}$	LPQ	$2(H-1)n_{lpq}$	$V^{(h)}$	NLPQ	$2(H-1)n_{nlpq}$
	$\Delta V^{(h)}$	LPQ	$2(H-1)n_{lpq}$	$I^{(1)}$	NLPQ	$2n_{nlpq}$
				$V^{(1)}$	NLPQ	$2n_{nlpq}$
J_5	$\Delta I_c^{(h)}$	NLPQ	$2Hn_{nlpq}$	α	NLPQ	n_{nlpq}
	$\Delta P_c^{(h)}$	NLPQ	n_{nlpq}	$I^{(h)}$	NLPQ	$2(H-1)n_{nlpq}$
	$\Delta P^{(1)}$	NLPQ	n_{nlpq}	$V^{(h)}$	NLPQ	$2(H-1)n_{nlpq}$
	$\Delta Q^{(1)}$	NLPQ	n_{nlpq}	$I^{(1)}$	NLPQ	$2n_{nlpq}$
	$\Delta I^{(h)}$	NLPQ	$2(H-1)n_{nlpq}$	$V^{(1)}$	NLPQ	$2n_{nlpq}$
J_8	$\Delta P^{(1)}$	LPV	n_{lpv}	α	NLPQ	n_{nlpq}
	$\Delta V^{(h)}$	LPV	$2(H-1)n_{lpv}$	$I^{(h)}$	NLPQ	$2(H-1)n_{nlpq}$
	$\Delta I^{(h)}$	LPV	$2(H-1)n_{lpv}$	$V^{(h)}$	NLPQ	$2(H-1)n_{nlpq}$
				$I^{(1)}$	NLPQ	$2n_{nlpq}$
				$V^{(1)}$	NLPQ	$2n_{nlpq}$
J_3	$\Delta P^{(1)}$	LPQ	n_{lpq}	$\delta^{(1)}$	LPV	n_{lpv}
	$\Delta Q^{(1)}$	LPQ	n_{lpq}	$I^{(h)}$	LPV	$2(H-1)n_{lpv}$
	$\Delta I^{(h)}$	LPQ	$2(H-1)n_{lpq}$	$V^{(h)}$	LPV	$2(H-1)n_{lpv}$
	$\Delta V^{(h)}$	LPQ	$2(H-1)n_{lpq}$			
J_6	$\Delta I_c^{(h)}$	NLPQ	$2Hn_{nlpq}$	$\delta^{(1)}$	LPV	n_{lpv}
	$\Delta P_c^{(h)}$	NLPQ	n_{nlpq}	$I^{(h)}$	LPV	$2(H-1)n_{lpv}$
	$\Delta P^{(1)}$	NLPQ	n_{nlpq}	$V^{(h)}$	LPV	$2(H-1)n_{lpv}$
	$\Delta Q^{(1)}$	NLPQ	n_{nlpq}			
	$\Delta I^{(h)}$	NLPQ	$2(H-1)n_{nlpq}$			
J_9	$\Delta P^{(1)}$	LPV	n_{lpv}	$\delta^{(1)}$	LPV	n_{lpv}
	$\Delta V^{(h)}$	LPV	$2(H-1)n_{lpv}$	$I^{(h)}$	LPV	$2(H-1)n_{lpv}$
	$\Delta I^{(h)}$	LPV	$2(H-1)n_{lpv}$	$V^{(h)}$	LPV	$2(H-1)n_{lpv}$

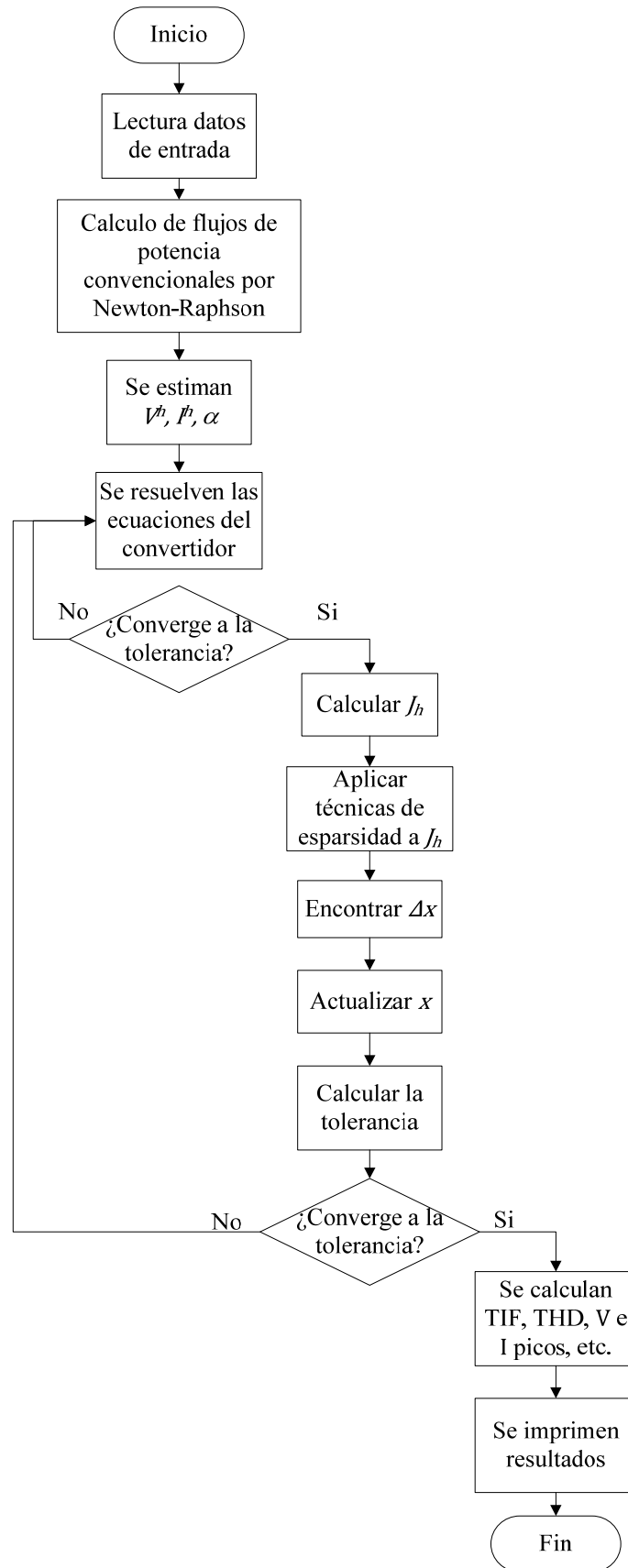


Fig. 2.6 Diagrama de flujo del estudio de flujos de potencia armónico por el método de Newton-Raphson [6]

Como es posible observar este método es más complicado que el método de inyecciones de corriente. El método es iterativo, y el Jacobiano de este es mayor que el de flujos convencional. Mientras que en el estudio de flujos convencional el número de iteraciones para resolver un sistema esta entre 2-6 iteraciones, para el caso del problema de flujos armónicos las iteraciones son alrededor de 20, por lo que se requiere un mayor tiempo computacional para la solución del método. Un estudio de flujos de potencia armónico de ninguna forma puede reemplazar al estudio de flujos convencional, ya que en este no se toman en cuenta los taps de los transformadores, ni los límites de Q entre otras consideraciones que se hacen en los estudios de flujos convencionales [6]. Además es necesario emplear técnicas de esparsidad para el Jacobiano, ya que, por ejemplo, para un estudio arriba del 15° armónico se tiene un Jacobiano con el 96% de esparsidad [11]. Este método solo puede ser aplicado a redes simétricas [8].

Se utilizó el método de inyecciones de corriente para comprobar los estimadores de estado en el sistema de 14 nodos; mismo que se encuentra en el Apéndice C de este trabajo.

CAPÍTULO 3

IDENTIFICACIÓN DE FUENTES ARMÓNICAS USANDO ESTIMACIÓN DE ESTADO

3.1 INTRODUCCIÓN

Debido al incremento de dispositivos controlados por electrónica de potencia, cargas armónicas, además del uso de sistemas de C.D. de alto voltaje, las diferentes alternativas de fuentes de energía y los sistemas con un gran porcentaje de iluminación fluorescente, se ha renovado el interés en el análisis de armónicas en los sistemas de potencia [15-17].

Según Heydt en [15] “la atención en sistemas de potencia se ha centrado en la propagación de señales para fuentes dadas, prestando poca atención al problema *inverso*: identificar la fuente de inyección armónica dando ciertas mediciones de línea y bus”.

Las compañías suministradoras generalmente no conocen la ubicación de las fuentes armónicas [17], por lo que es necesario desarrollar metodologías para conocer la ubicación de estas fuentes, así como la cantidad de armónicas que introducen al sistema, como se presenta en los trabajos [6, 15-25].

Las fuentes armónicas no se pueden identificar por medio de mediciones, ya que las armónicas se distribuyen por el sistema, y se puede tener un Voltaje armónico en algún nodo o un porcentaje de Distorsión Armónica Total (THD) [28].

Para poder realizar la estimación de estado armónica, es necesario tener las siguientes mediciones [16]:

- Ángulos de fase
- Mediciones trifásicas
- Formas de onda de voltaje y corriente

Los métodos más comunes para la identificación de fuentes armónicas son el de cuadrados mínimos [6, 15-18], filtros de Kalman [6, 20-22, 24], redes neuronales [6, 23], o despejando la fórmula empleada para la solución de flujos armónicos por el método de inyecciones de corriente [19]. Los métodos que se usarán en este trabajo son el de cuadrados mínimos de Heydt [15], y el método de despeje de Nguyen [19], mismos que se explicarán más adelante.

Los filtros de Kalman son una extensión del método de cuadrados mínimos, se ocupan para estimación dinámica como se menciona en [6, 20-22, 24-25]. Este método es muy eficiente debido a la naturaleza dinámica de las inyecciones armónicas, además no requiere tantas mediciones como en los demás métodos [20]. En [21] la metodología del estimador es usar mediciones de potencias activas y reactivas para estimar los voltajes armónicos en los buses. El modelo dado en [22] incluye la matriz de admitancias del sistema, la técnica propuesta es dependiente de la frecuencia, por ello es necesario conocer la frecuencia fundamental. [20] propone un modelo independiente de la frecuencia. El problema encontrado a esta metodología es que la ganancia puede ser insensible a la escala de la matriz de covarianza [25].

Los estimadores de estado armónicos tiene diversas aplicaciones, como dar información de la generación y penetración armónica en la red [15], y ayuda a cumplir los estándares armónicos [17].

3.2 MÉTODO DE CUADRADOS MÍNIMOS [27]

Si Y es una variable aleatoria que fluctúa alrededor de un parámetro desconocido η ; esto es $Y = \eta + \varepsilon$, donde ε es el error. Si el modelo es lineal, se asume que η puede expresarse de forma

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \dots + \beta_{p-1} x_{p-1},$$

Donde las variables x_1, x_2, \dots, x_{p-1} son constantes conocidas, y β_j ($j = 0, 1, \dots, p - 1$) son parámetros desconocidos a estimar. Si las x_j son variadas y n valores de Y son observadas, entonces

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i,1} + \dots + \beta_{p-1} x_{i,p-1} + \varepsilon_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3.1)$$

Escribiendo estas ecuaciones en forma matricial se tiene

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{10} & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1,p-1} \\ x_{20} & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2,p-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n0} & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{n,p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_{p-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

O

$$Y = X\beta + \varepsilon \quad (3.2)$$

Donde X se conoce como matriz de regresión.

Para estimar β por el método de cuadrados mínimos se debe minimizar $\sum_i \varepsilon_i^2$ con respecto a β ; es decir, ajustando $\theta = X\beta$, se minimiza $\varepsilon'\varepsilon = \|Y - \theta\|^2$ sujeto a $\theta \in C(X) = \Omega$, donde Ω es la columna espacio de $X (= \{y: y = Xx \text{ para cualquier } x\})$. Si se deja θ variar en Ω , $\|Y - \theta\|^2$ será mínimo para $\theta = \hat{\theta}$ cuando $(Y - \hat{\theta}) \perp \Omega$ (fig 3.1).

Por lo tanto $\hat{\theta}$ es la única proyección ortogonal de Y sobre Ω .

$$X'\hat{\theta} = X'Y \quad (3.3)$$

Se supone que las columnas de X son linealmente independientes por lo que existe un vector unitario $\hat{\beta}$ tal que $\hat{\theta} = X\hat{\beta}$. Entonces sustituyendo en (3.3) se tiene

$$X'X\hat{\beta} = X'Y \quad (3.4)$$

Por lo tanto $\hat{\beta}$ se puede resolver

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1}X'Y \quad (3.5)$$

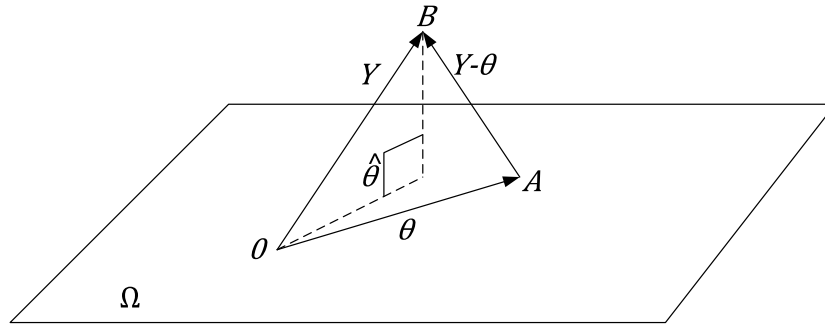


Fig. 3.1 El método de cuadrados mínimos consiste en encontrar A tal que AB es un mínimo.

3.3 MÉTODO DE CUADRADOS MÍNIMOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE FUENTES ARMÓNICAS

En este trabajo se abordan dos de los métodos usados para localizar fuentes armónicas en sistemas de potencia empleando algoritmos de estimación de estado, los cuales se conocerán como, *estimadores de armónicas o estimadores de estado armónico*; uno propuesto por Heydt en [15], y la otra metodología propuesta en [19] por Nguyen.

Ambos métodos parten de la ecuación empleada para resolver el problema de flujos armónicos usando la técnica de inyecciones de corrientes [15, 19]:

$$I_h = Y_h V_h \quad (3.6)$$

Donde:

I_h y V_h son la corriente y voltaje nodal de la armónica h .

Y_h es la matriz Ybus para la armónica h .

A continuación se explican con más detalle ambos métodos.

3.3.1 ESTIMADOR DE ESTADO ARMÓNICO PROPUESTO POR HEYDT EN [15]

Se tiene el sistema mostrado en la figura 3.1, del cual se desconoce la ubicación de la fuente armónica, y se tienen mediciones de voltajes y corrientes armónicas en los nodos 1, 2 y 3, entonces la ecuación (3.6) queda de la forma.

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix}_h \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \\ \bar{V}_4 \end{bmatrix}_h \quad (3.7)$$

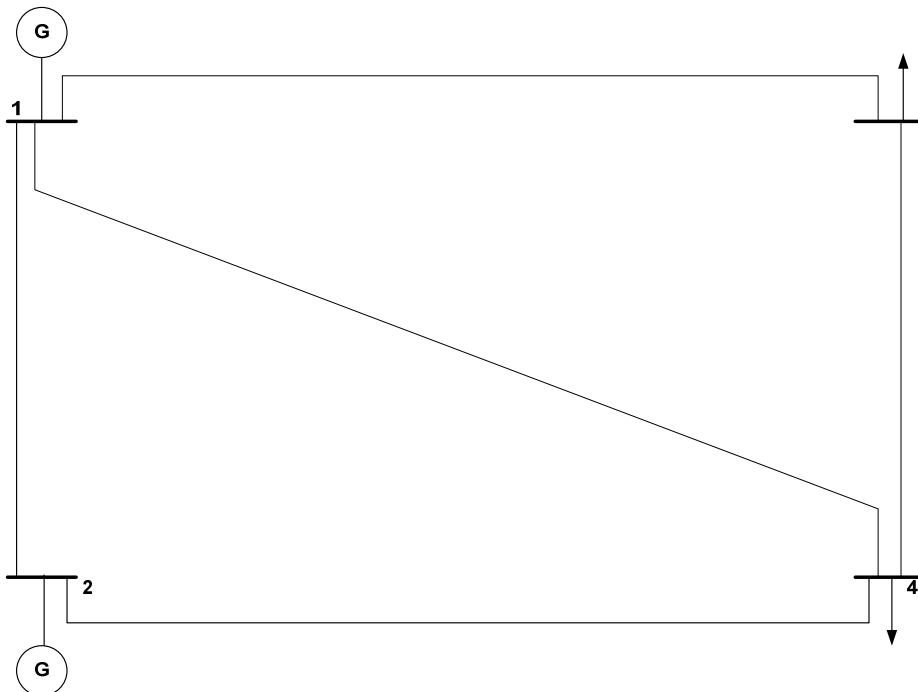


Fig. 3.2 Sistema de cuatro nodos

Si se reacomoda (3.7) agrupando los datos conocidos y los desconocidos se tiene [15]:

$$\begin{bmatrix} I_i \\ \bar{I}_j \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} G & H \\ J & K \end{bmatrix}_h \begin{bmatrix} V_i \\ \bar{V}_j \end{bmatrix}_h \quad (3.8)$$

De acuerdo al ejemplo la ecuación (3.8) se puede reescribir como:

$$\begin{bmatrix} I_4 \\ \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Y_{44} & Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} \\ Y_{14} & Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{24} & Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{34} & Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix}_h \begin{bmatrix} V_4 \\ \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix}_h$$

Resolviendo la ecuación:

$$[I_i]_h = [G]_h[V_i]_h + [H]_h[\bar{V}_j]_h \quad (3.9)$$

$$[\bar{I}_j]_h = [J]_h[V_i]_h + [K]_h[\bar{V}_j]_h \quad (3.10)$$

Donde:

$[\bar{I}_i]_h, [\bar{V}_i]_h$ Son vectores que contienen las corrientes y voltajes armónicos medidos en el nodo i .

$[I_j]_h, [V_j]_h$ Son vectores de corrientes y voltajes nodales armónicos desconocidos del nodo j .

$[G]_h, [H]_h, [J]_h, [K]_h$ Son sub-matrices que se obtienen al reacomodar la matriz Y_h .

Y “ $\bar{}$ ” significa que el dato es conocido o medido

Despejando $[V_j]_h$ de la ecuación (3.10)

$$[J]_h[V_j]_h = [\bar{I}_i]_h - [K]_h[\bar{V}_i]_h$$

Debido a que $[J]_h$ no es una matriz cuadrada, se emplea la pseudoinversa para poder despejar $[V_j]_h$.

$$[V_j]_h = [J^+]_h[\bar{I}_i]_h - [J^+]_h[K]_h[\bar{V}_i]_h \quad (3.11)$$

Donde:

$[J^+]_h = [[J^T]_h[J]_h]^{-1}[J^T]_h$, es la pseudoinversa de $[J]_h$.

$[J^T]_h$ es la transpuesta de $[J]_h$.

Sustituyendo (3.11) en (3.9):

$$[I_j]_h = [G]_h \{ [J^+]_h [\bar{I}_i]_h - [J^+]_h [K]_h [\bar{V}_i]_h \} + [H]_h [\bar{V}_i]_h$$

$$[I_j]_h = [G]_h [J^+]_h [\bar{I}_i]_h - [G]_h [J^+]_h [K]_h [\bar{V}_i]_h + [H]_h [\bar{V}_i]_h$$

Agrupando los términos de la ecuación anterior:

$$[I_j]_h = [G]_h [J^+]_h [\bar{I}_i]_h - \{ [G]_h [J^+]_h [K]_h + [H]_h \} [\bar{V}_i]_h \quad (3.12)$$

O bien reescribiendo la ecuación (3.12) con el ejemplo mostrado en la figura 3.2

$$[I_4]_h = [Y_{44}]_h \begin{bmatrix} Y_{14} \\ Y_{24} \\ Y_{34} \end{bmatrix}_h^+ \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix}_h - \left\{ [Y_{44}]_h \begin{bmatrix} Y_{14} \\ Y_{24} \\ Y_{34} \end{bmatrix}_h^+ \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix}_h + [Y_{41} \quad Y_{42} \quad Y_{43}]_h \right\} \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix}_h$$

La ecuación (3.12) es la reportada por Heydt en [15]. La figura 3.3 muestra el diagrama de flujo de este método.

La metodología para la identificación de fuentes armónicas por el método propuesto por Heydt en [15] consta en los siguientes pasos:

1.- Se obtienen los datos del sistema y las mediciones de voltajes y corrientes armónicas nodales para cada armónica h del sistema.

2.- Se calcula la matriz de admitancias nodales Y_h para cada armónica h del sistema.

3.- Se reacomoda la matriz de admitancias nodales Y_h , para obtener las submatrices G, H, J, K para cada armónica h .

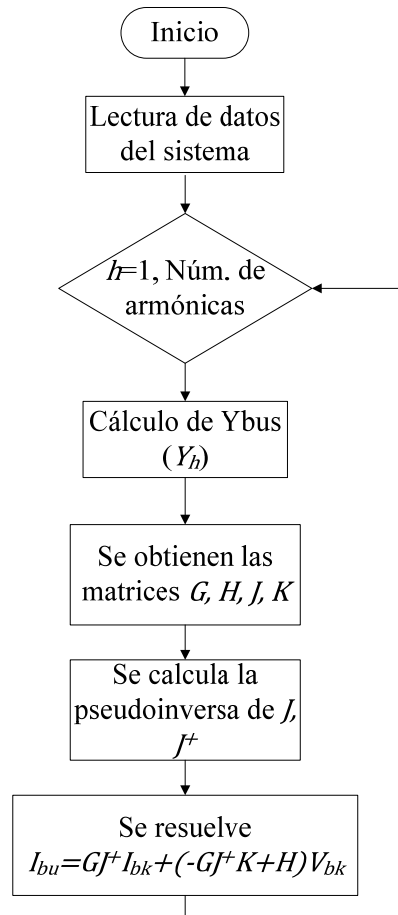


Fig. 3.3 Diagrama de flujo del Estimador de estado armónico propuesto por Heydt

- 4.- Se calcula la pseudoinversa de J .
- 5.- Se resuelve la ecuación (3.12) para cada armónica en el sistema.
- 6.- Se resuelve la ecuación (3.6) para obtener los voltajes armónicos nodales de la red.

Debido a que este método proviene del estudio de flujos por inyección de corrientes armónicas, las mediciones de corrientes armónicas nodales donde no este conectada una fuente armónica, o se sospeche que no haya alguna, serán consideradas igual a cero.

El proceso no es iterativo, por lo que el resultado se obtiene en forma directa para cada armónica medida en el sistema. Las mediciones de corrientes y voltajes armónicas nodales deben ser del mismo nodo.

Este método sólo calcula las corrientes armónicas nodales desconocidas, por lo que es necesario usar la ecuación (3.6) para conocer los voltajes armónicos que se desconocen.

3.3.2 ESTIMADOR DE ESTADO ARMÓNICO PROPUESTO POR NGUYEN EN [19]

El método propuesto por Nguyen en [19] también parte de la ecuación (3.6), y se emplean despejes para llegar a la ecuación final. Al igual que en el método propuesto por Heydt en [15], se usa la pseudoinversa para la estimación, y la diferencia entre estos métodos es que la metodología puede tener diferentes conjuntos de mediciones. Para facilitar el entendimiento del método se retoma la figura 3.2, en la cual se conocen las siguientes mediciones: $\bar{V}_1, \bar{I}_1, \bar{V}_2$ e \bar{I}_3 ; mientras que se desconoce: I_2, V_3, V_4 e I_4 .

Acomodando los conjuntos con la ecuación (3.6) [19].

$$\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix}_h \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ I_2 \\ \bar{I}_3 \\ I_4 \end{bmatrix}_h \quad (3.13)$$

O también:

$$Y_{11}\bar{V}_1 + Y_{12}\bar{V}_2 + Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4 = \bar{I}_1$$

$$Y_{21}\bar{V}_1 + Y_{22}\bar{V}_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 = I_2$$

$$Y_{31}\bar{V}_1 + Y_{32}\bar{V}_2 + Y_{33}V_3 + Y_{34}V_4 = \bar{I}_3$$

$$Y_{41}\bar{V}_1 + Y_{42}\bar{V}_2 + Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4 = I_4$$

Despejando las mediciones de los datos desconocidos

$$\begin{aligned}
 Y_{13}V_3 + Y_{14}V_4 &= -Y_{11}\bar{V}_1 - Y_{12}\bar{V}_2 + \bar{I}_1 \\
 Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 - I_2 &= -Y_{21}\bar{V}_1 - Y_{22}\bar{V}_2 \\
 Y_{33}V_3 + Y_{34}V_4 &= -Y_{31}\bar{V}_1 - Y_{32}\bar{V}_2 + \bar{I}_3 \\
 Y_{43}V_3 + Y_{44}V_4 - I_4 &= -Y_{41}\bar{V}_1 - Y_{42}\bar{V}_2
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

Agrupando (3.14) en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_{13} & Y_{14} \\ -1 & 0 & Y_{23} & Y_{24} \\ 0 & 0 & Y_{33} & Y_{34} \\ 0 & -1 & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix}_h \begin{bmatrix} I_2 \\ I_4 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} -Y_{11}\bar{V}_1 - Y_{12}\bar{V}_2 + \bar{I}_1 \\ -Y_{12}\bar{V}_1 - Y_{22}\bar{V}_2 \\ -Y_{31}\bar{V}_1 - Y_{32}\bar{V}_2 + \bar{I}_3 \\ -Y_{41}\bar{V}_1 - Y_{42}\bar{V}_2 \end{bmatrix}_h \tag{3.15}$$

O bien

$$Z(h) = H(h)X(h) \tag{3.16}$$

Donde:

$$\text{La matriz de mediciones } H(h) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & Y_{13} & Y_{14} \\ -1 & 0 & Y_{23} & Y_{24} \\ 0 & 0 & Y_{33} & Y_{34} \\ 0 & -1 & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix}_h$$

$$\text{El vector de mediciones } Z(h) = \begin{bmatrix} -Y_{11}\bar{V}_1 - Y_{12}\bar{V}_2 + \bar{I}_1 \\ -Y_{12}\bar{V}_1 - Y_{22}\bar{V}_2 \\ -Y_{31}\bar{V}_1 - Y_{32}\bar{V}_2 + \bar{I}_3 \\ -Y_{41}\bar{V}_1 - Y_{42}\bar{V}_2 \end{bmatrix}_h$$

La ecuaciones (3.15) y (3.16) son las reportadas por Nguyen en [19], y la figura 3.4 muestra el diagrama de flujo del método.

La metodología para identificar las fuentes armónicas por el método de Nguyen [19] se resume con los siguientes pasos:

1.- Se obtienen los datos del sistema y las mediciones de voltajes y corrientes armónicas nodales para cada armónica h del sistema.

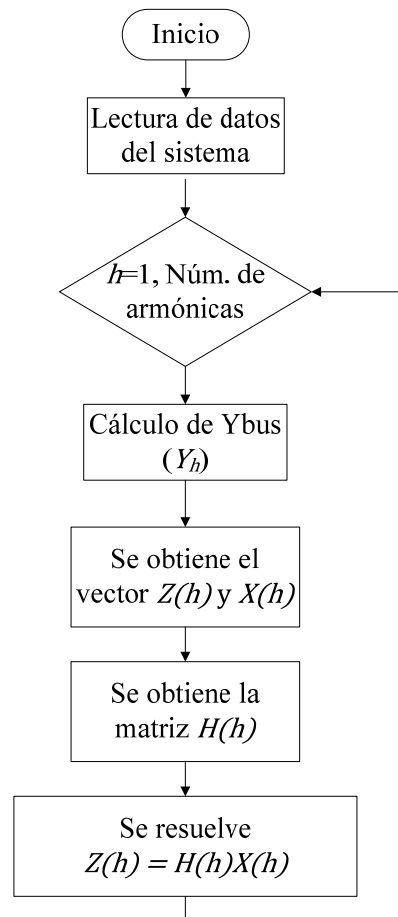


Figura 3.4 Diagrama de flujo del Estimador de Estado Armónico propuesto por Nguyen

- 2.- Se calcula la matriz de admitancias nodales Y_h para cada armónica h del sistema.
- 3.- Se obtiene la matriz Z_h , X_h y H_h para cada armónica h del sistema.
- 4.- Se resuelve la ecuación (3.16) para cada armónica h del sistema.

Una de las mayores diferencias entre los métodos abordados es que el propuesto por Heydt en [15] las mediciones de voltajes y corrientes armónicas deben ser hechas en el mismo nodo, mientras que en el de Nguyen [19] se pueden tener mediciones de voltajes y corriente armónicas en el mismo nodo o solo la medición de voltaje o corriente armónica. De igual forma que en el método propuesto en [15] por Heydt, el procedimiento no es iterativo, por ello el resultado se obtiene en forma directa para cada armónica medida del sistema.

A diferencia del método de Heydt que solo calcula las corrientes armónicas desconocidas, en este método se obtienen las corrientes y voltajes armónicos desconocidos.

Como se mencionó este método también proviene del método de inyecciones de corrientes armónicas, por ello las mediciones de corrientes armónicas nodales donde no se tenga una fuente armónica, o se sospeche que no haya alguna, serán igualadas a cero.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DE APLICACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE PRUEBAS

4.1 INTRODUCCIÓN

Este Capítulo contiene los resultados obtenidos al aplicar los métodos de estimación de estado armónico descritos en el Capítulo 3.

Para verificar la veracidad de los resultados se desarrolló un programa en FORTRAN 90 para el cálculo de flujos armónicos empleando el método de inyecciones de corriente [1]; comprobando los resultados con el libro de Acha y Madrigal [4].

Los sistemas de prueba empleados son el de 5 y 14 nodos dados en [4, 12-14].

Los datos de los sistemas de prueba se encuentran en las referencias citadas, y en el Apéndice A de este trabajo.

Debido a que los sistemas de prueba solo tienen una fuente de armónicas conectada a la red, se emplean los datos dados en [28, 32] para añadir más fuentes de armónicas y hacer pruebas.

4.2 ESTIMACIÓN DE UN SISTEMA DE 5 NODOS CON UNA FUENTE DE ARMÓNICAS

De acuerdo a los resultados mostrados por Acha y Madrigal en [4], los voltajes armónicos obtenidos con el método de inyecciones de corriente para el sistema de prueba de 5 nodos se encuentran en la tabla 4.1; mientras que los datos de la fuente armónica que para este caso es un Compensador Estático de Vars se enlistan en la tabla 4.2. La figura 4.1 muestra el sistema de prueba.

Tabla 4.1. Voltajes armónicos del sistema de 5 nodos [4]

V/h	5	7	11	13	17	19	23	25	THD%
$ V ^1$	0.0007	0.00005	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00009
θ^1	108.12	58.543	-4.728	-16.52	-40.39	-66.91	162.95	142.81	
$ V ^2$	0.0057	0.003	0.0015	0.0016	0.002	0.0026	0.0022	0.0012	0.008
θ^2	137.75	118.91	147.36	148.11	137.44	120.68	39.513	19.029	
$ V ^3$	0.1675	0.1235	0.0304	0.0188	0.0126	0.0134	0.0098	0.0056	0.2122
θ^3	99.919	50.809	-11.68	-22.73	-42.19	-61.16	-146.1	-169.1	
$ V ^4$	0.2107	0.154	0.036	0.0213	0.0123	0.0116	0.006	0.0026	0.265
θ^4	103.58	55.324	-6.193	-16.89	-35.55	-53.89	-136.2	-156.2	
$ V ^5$	0.5213	0.3302	0.2307	0.2217	0.2621	0.3293	0.2795	0.1512	0.8725
θ^5	148.76	145.76	150.37	148.3	136.65	119.83	38.673	18.173	

Tabla 4.2. Corriente Armónica de la Fuente de Armónicas (Compensador Estático de Vars) [4]

Armónica	% de la corriente fundamental	Armónica	% de la corriente fundamental
5	5.05	17	0.44
7	2.59	19	0.35
11	1.05	23	0.24
13	0.75	25	0.22

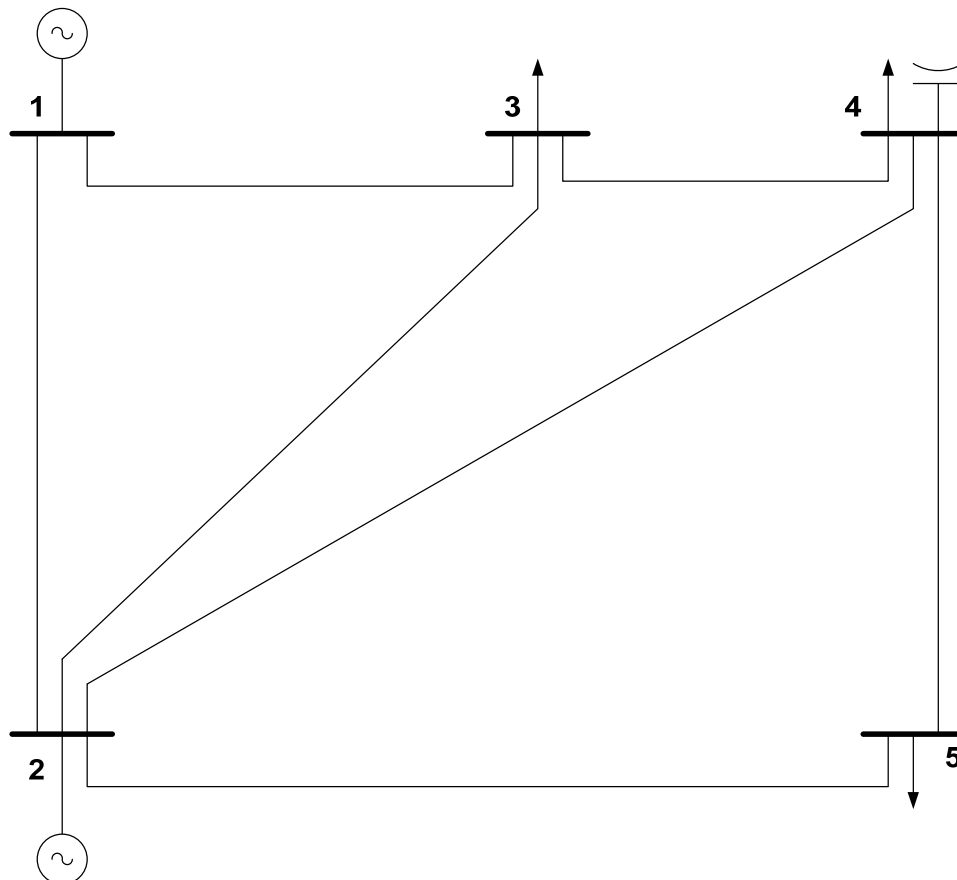


Fig 4.1 Sistema de prueba de 5 nodos

4.2.1 ESTIMACIÓN DE UN SISTEMA DE 5 NODOS CON UNA FUENTE DE ARMÓNICAS SIN ERROR EN MEDICIONES POR EL MÉTODO DE HEYDT[15]

Para realizar la identificación de la fuente armónica por el método dado por Heydt en [15]. La tabla 4.3 tiene las mediciones sin error usadas para llevar a cabo la estimación.

Tabla 4.3 Mediciones para la estimación por el método de Heydt [15], sin error en las mediciones para el sistema de 5 nodos

Medición\h	5	7	11	13	17	19	23	25
$ V ^2$	0.0057	0.00296	0.00153	0.001586	0.002009	0.002573	0.00215	0.00122
Θ^2	137.756	118.915	147.369	148.1139	137.4432	120.6839	39.513	19.0293
$ V ^3$	0.16404	0.121	0.02973	0.018437	0.012373	0.013101	0.00924	0.00547
Θ^3	99.9193	50.8093	-11.688	-22.7312	-42.1913	-61.1692	-146.11	-169.17
$ V ^4$	0.20602	0.15059	0.03514	0.020785	0.012009	0.011373	0.00567	0.00253
Θ^4	103.588	55.3242	-6.1935	-16.8994	-35.5594	-53.8979	-136.22	-156.22
$ I ^2$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^3$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^4$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Las corrientes armónicas estimadas sin error en las mediciones se muestran en la tabla 4.4. Como se observa en esta tabla, la corriente del nodo 1 es muy alta, por lo que es difícil identificar en que nodo se encuentra la fuente armónica; ya que como el método propuesto por Heydt en [15], está basado en el método de inyecciones de corrientes de Mahmoud [1], las corrientes de los nodos donde no se encuentre una fuente armónica deben ser iguales a cero.

La tabla 4.5 se comparan los resultados de la fuente armónica dada en [4] contra los estimados. Como se ve en esta tabla, las corrientes estimadas son exactas comparadas contra los datos dados en [4].

En la tabla 4.6 se comparan los voltajes armónicos obtenidos por el estimador. Se observa que para el voltaje del nodo 1 no coinciden los voltajes, esto es debido a que las corrientes armónicas estimadas en este nodo son muy altas.

Tabla 4.4. Corrientes armónicas estimadas, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 5 nodos

Arm.	Nodo	Mag. de Corriente	Ang. de la Corriente
5	1	.44499	-136.1141
	5	1.17515	83.30746
7	1	.31251	-158.0564
	5	.60267	83.30690
11	1	.22963	-125.8032
	5	.24418	83.30348
13	1	.01177	56.54605
	5	.17457	83.30370
17	1	.00091	-157.0494
	5	.10241	83.30377
19	1	.00683	-149.2284
	5	.08146	83.30363
23	1	.05354	131.62010
	5	.05580	83.30570
25	1	1.16860	-76.77283
	5	.04431	83.56160

Tabla 4.5 Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 5 nodos

Armónica	Mag. de Corrient estimada	Mag. de Corrient real [4]	Error de la mag.	Ang. de Corrient estimada	Ang. de Corrient real [4]	Error del Ang.
5	1.17515	1.1756	.00045	83.30746	83.3037	.00046
7	.60267	.602952	.000282	83.30690	83.3037	.001
11	.24418	.24444	.00026	83.30348	83.3037	.00022
13	.17457	.1746	.00003	83.30370	83.3037	0
17	.10241	.102432	.000022	83.30377	83.3037	.00007
19	.08146	.08148	.00002	83.30367	83.3037	.00003
23	.05580	.055872	.000072	83.30570	83.3037	.002
25	.04431	.04656	.00225	83.56160	83.3037	.2579

La tabla 4.7 muestra la Distorsión Armónica Total (THD) del voltaje en cada nodo de la red. Según el Estándar 519-1992 [28] el valor más alto de THD es de 1.5% para el caso de sistemas de transmisión. En la tabla el THD no sobrepasa el valor dado por el Estándar, aunque los resultados obtenidos, tanto de voltajes como corrientes armónicas, no son confiables para este caso por lo explicado.

Tabla 4.6. Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 14 nodos

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos [4]</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos [4]</i>	<i>Error del ang.</i>
5	1	.000157	.00007	.00164	-34.0557	108.122	-.142.18
	2	.00570	.0057	0	137.769	137.756	.013
	3	.16393	.16404	.00011	99.9287	99.9193	.0094
	4	.20591	.20602	.00011	103.6013	103.588	.0133
	5	.51709	.51721	.00012	148.7711	148.764	.0071
7	1	.00019	.00005	.00014	-55.4297	58.5431	-113.97
	2	.00292	.00296	.00004	118.942	118.915	.027
	3	.120918	.121	.000082	50.82581	50.8093	.01651
	4	.1505	.15059	.0004	55.34944	55.3242	.02524
	5	.32758	.32764	.00006	145.7735	145.768	.0055
11	1	.00026	.00001	.00025	-34.672	-4.7287	-39.402
	2	.00153	.00153	0	147.377	147.369	.008
	3	.02971	.02973	.00002	-11.704	-11.688	.016
	4	.03508	.03514	.00006	-6.18279	-6.1935	.01071
	5	.22872	.22891	.00019	150.3737	150.374	.0003
13	1	.00001	.000005	.000005	138.455	-16.527	154.982
	2	.00159	.001586	.000004	148.1138	148.1139	.00001
	3	.01844	.018437	.000003	-22.7301	-22.7312	.0011
	4	.02079	.020785	.00015	-16.8999	-16.8994	.0005
	5	.21996	.219951	.000009	148.3048	148.305	.0002
17	1	.00000	.000002	.000002	-52.707	-40.3931	11.7679
	2	.00201	.002009	.000001	137.4436	137.4432	.0004
	3	.01237	.012373	.00003	-42.1916	-42.1913	.0003
	4	.01201	.012009	.000001	-35.5592	-35.5594	.0002
	5	.26009	.260092	.000002	136.6536	136.6535	.00011
19	1	.00000	.000001	.000001	-59.8694	-66.9141	7.0447
	2	.00257	.002573	.000003	120.6838	120.6839	.0001
	3	.0131	.013101	.000001	-61.1698	-61.1692	.0006
	4	.01137	.011373	.000003	-53.898	-53.8979	.0001
	5	.32678	.326777	.000027	119.8391	119.8392	.0001
23	1	.00001	0	.00001	-138.56	162.952	-301.51
	2	.00215	.00215	0	39.5129	39.513	.0001
	3	.00925	.00924	.00001	-146.11	-146.11	0
	4	.00566	.00567	.00001	-136.217	-136.22	.003
	5	.2659	.26618	.00028	38.6754	38.6734	.002
25	1	.002926	0	.002926	13.2303	142.82	129.59
	2	.00122	.00122	0	19.03235	19.0293	.00305
	3	.0046	.00547	0.00087	-167.87	-169.17	.7
	4	.00252	.00253	.00001	-156.791	-156.22	.571
	5	.14281	.15003	.00722	18.42939	18.1738	.25559

Tabla 4.7. THD de los voltajes, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 5 nodos

Nod	%THD
1	.00281
2	.007929
3	.212051
4	.264821
5	.86753

4.2.2 ESTIMACIÓN DE UN SISTEMA DE 5 NODOS CON UNA FUENTE DE ARMÓNICAS SIN ERROR EN MEDICIONES POR EL MÉTODO DE NGUYEN[19]

La tabla 4.8 muestra las mediciones que se emplearon para llevar a cabo la estimación de armónicas por el método de Nguyen dado en [19].

Tabla 4.8 Mediciones para la estimación por el método de Nguyen [19], sin error en las mediciones para el sistema de 5 nodos

Medición\h	5	7	11	13	17	19	23	25
$ V ^1$	0.00007	0.00005	0.00001	0.000005	0.000002	0.000002	0.0	0.0
Θ^1	108.122	58.5431	-4.7287	-16.527	-40.3931	-66.9141	0.0	0.0
$ V ^2$	0.0057	0.00296	0.00153	0.001586	0.002009	0.002573	0.00215	0.00122
Θ^2	137.756	118.915	147.369	148.1139	137.4432	120.6839	39.513	19.0293
$ V ^3$	0.16404	0.121	0.02973	0.018437	0.012373	0.013101	0.00924	0.00547
Θ^3	99.9193	50.8093	-11.688	-22.7312	-42.1913	-61.1692	-146.11	-169.17
$ I ^2$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^4$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

En la tabla 4.9 se tienen las corrientes armónicas estimadas por el método de Nguyen [19]. Para este caso el estimador indica que la fuente armónica se encuentra en el nodo 5, y esto es correcto, ya que los nodos donde no se encuentra conectada la fuente armónica son valores menores a los de la corriente armónica en el nodo 5; además en algunos casos la corriente armónica se vuelve cero, caso contrario que en el caso resuelto por el método de Heydt [15].

Tabla 4.9 Corrientes armónicas estimadas, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 5 nodos

<i>Arm</i>	<i>Nodo</i>	<i>Mag. de Corriente</i>	<i>Ang. de Corrient</i>
5	1	.01154	-161.914
	3	.00043	39.72454
	5	1.17423	83.32327
7	1	.00330	148.3904
	3	.00035	16.30106
	5	.60213	83.34638
11	1	.00003	77.48232
	3	.00087	2.86331
	5	.24375	83.25249
13	1	.00006	73.54201
	3	.00003	96.49910
	5	.17461	83.30501
17	1	.00011	-130.39
	3	.00000	-165.992
	5	.10241	83.3040
19	1	.00010	23.1125
	3	.00000	-142.852
	5	.08146	83.3036
23	1	.00020	-106.320
	3	.00002	134.179
	5	.05575	83.3039
25	1	.00012	171.100
	3	.00069	-68.1774
	5	.04612	83.3180

La tabla 4.10 enlista el error que se tiene al comparar la corriente armónica real de la fuente dada por Acha y Madrigal en [4] contra la obtenida por el estimador. Como se observa en esta tabla las corrientes armónicas son exactas.

La tabla 4.11 muestra los voltajes armónicos contra los dados en [4] por Madrigal y Acha, los voltajes que están marcados de color gris fueron estimados por este método, mientras que los otros se obtuvieron con las corrientes estimadas empleando la expresión 3.8. A diferencia del estimador armónico propuesto por Heydt[15], los voltajes armónicos nodales de la tabla 4.11 son exactos. Para el caso del ángulo de los voltajes de las armónicas 23 y 25 en el nodo 1, se nota un error mayor, pero la magnitud del voltaje es cero, por lo que se omiten los resultados de los ángulos.

Tabla 4.10 Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 5 nodos

<i>Arm</i>	<i>Mag. de Corriente estimada</i>	<i>Mag. de Corriente real [4]</i>	<i>Error de la mag</i>	<i>Ang. de Corriente estimada</i>	<i>Ang. de corriente real [4]</i>	<i>Error del Ang</i>
5	1.17423	1.1756	.00137	83.32327	83.3037	.01957
7	.60213	.602952	.000822	83.34638	83.3037	.04268
11	.24375	.24444	.00069	83.25249	83.3037	.05121
13	.17461	.1746	.00001	83.30501	83.3037	.00131
17	.10241	.102432	.000022	83.30409	83.3037	.00039
19	.08146	.08148	.00002	83.30367	83.3037	.00003
23	.05575	.055872	.000122	83.30394	83.3037	.00024
25	.04612	.04656	.00044	83.31804	83.3037	.01434

Por último, la tabla 4.12 enlista el THD de voltaje para cada nodo del sistema. De antemano se conoce que la fuente armónica se encuentra en el nodo 5, pero es necesario saber si esta fuente introduce una mayor cantidad de armónicas que las permitidas según es Estándar 519-1992[28], lo que no ocurre para este caso. Se nota que el THD del nodo 1 para el caso de Heyd[15] y Nguyen [19] tablas 4.7 y 4.12 tienen valores distintos, esto es debido a que el método de Heydt estimó corrientes armónicas muy altas para este nodo, mismas que afectaron el cálculo de voltajes armónicos y THD, mientras que el método de Nguyen para este caso fue exacto.

4.2.3 ESTIMACIÓN DE UN SISTEMA DE 5 NODOS CON UNA FUENTE DE ARMÓNICAS CON ERROR EN MEDICIONES POR EL MÉTODO DE NGUYEN[19]

Debido a que la identificación de la fuente de armónica por el método de Nguyen dio mejores resultados, el siguiente paso es afectar las mediciones de voltaje y corriente armónicas con un error de $\pm 5\%$, según lo mencionado en los Estándar IEEE 519-1992 en [28]. El error de las mediciones se representó por medio de números aleatorios con una distribución uniforme y con límites de $\pm 5\%$; y se enlistan en la tabla 4.13.

Tabla 4.11 Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 5 nodos

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos [4]</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos [4]</i>	<i>Error del ang.</i>
5	1	.00007	.00007	0	108.122	108.122	0
	2	.00570	.0057	0	137.756	137.756	0
	3	.16404	.16404	0	99.9193	99.9193	0
	4	.20596	.20602	.00006	103.5813	103.588	.0067
	5	.51669	.51721	.00052	148.7773	148.764	.0133
7	1	.00005	.00005	0	58.54309	58.5431	.00001
	2	.00296	.00296	0	118.915	118.915	0
	3	.12100	.121	0	50.80931	50.8093	.00001
	4	.15054	.15059	.00005	55.30325	55.3242	.02095
	5	.32720	.32764	.00044	145.8066	145.768	.0386
11	1	.00001	.00001	0	-4.7287	-4.7287	0
	2	.00153	.00153	0	147.369	147.369	0
	3	.02973	.02973	0	-11.688	-11.688	0
	4	.03517	.03514	.00003	-6.65793	-6.1935	.46443
	5	.22826	.22891	.00065	150.3465	150.374	.0275
13	1	.00001	.000005	.000005	-16.527	-16.527	0
	2	.00159	.001586	.000004	148.1139	148.1139	0
	3	.01844	.018437	.000003	-22.7313	-22.7312	.0001
	4	.02080	.020785	.00015	-16.8868	-16.8994	.0126
	5	.22000	.219951	.000049	148.3057	148.305	.0007
17	1	.00000	.000002	.000002	-40.3936	-40.3931	.00053
	2	.00201	.002009	.000001	137.4436	137.4432	.0004
	3	.01237	.012373	.00003	-42.1913	-42.1913	.00001
	4	.01201	.012009	.000001	-35.5588	-35.5594	.00052
	5	.26009	.260092	.000002	136.6539	136.6535	.0004
19	1	.00000	.000001	.000001	-66.9142	-66.9141	.00011
	2	.00257	.002573	.000003	120.6838	120.6839	.0001
	3	.0131	.013101	.000001	-61.1692	-61.1692	0
	4	.01137	.011373	.000003	-53.898	-53.8979	.00011
	5	.32675	.326777	.000027	119.8391	119.8392	.0001
23	1	.00000	0	0	74.61845	162.952	
	2	.00215	.00215	0	39.5131	39.513	.0001
	3	.00924	.00924	0	-146.11	-146.11	0
	4	.00566	.00567	.00001	-136.221	-136.22	.0017
	5	.26564	.26618	.00054	38.6731	38.6734	.0003
25	1	.00000	0	0	164.7571	142.82	
	2	.00122	.00122	0	19.02921	19.0293	.00009
	3	.00457	.00547	0.0009	-169.17	-169.17	0
	4	.00267	.00253	.00014	-156.809	-156.22	.5894
	5	.14871	.15003	.00132	18.19943	18.1738	.02563

Tabla 4.12 THD de los voltajes, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen[19] para el sistema de 5 nodos

Nod	%THD
1	.000083
2	.007929
3	.212186
4	.264899
5	.867939

Tabla 4.13 Mediciones para la estimación por el método de Nguyen [19], con error en las mediciones para el sistema de 5 nodos

Medición\h	5	7	11	13	17	19	23	25
$ V ^1$	0.00007	0.00005	0.00001	0.000005	0.000002	0.000002	0.0	0.0
Θ^1	108.122	58.5431	-4.7287	-16.527	-40.3931	-66.9141	0.0	0.0
$ V ^2$	0.00594	0.00282	0.00155	0.00165	0.00195	0.00248	0.00205	0.00117
Θ^2	137.756	118.915	147.369	148.1139	137.4432	120.6839	39.513	19.0293
$ V ^3$	0.16238	0.12475	0.03043	0.01833	0.01226	0.01245	0.00943	0.0045
Θ^3	99.9193	50.8093	-11.688	-22.7312	-42.1913	-61.1692	-146.11	-169.17
$ I ^2$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^4$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Los resultados de las corrientes armónicas estimadas están en la tabla 4.14. Se nota como el error ha afectado estos resultados, y es difícil decir en donde se encuentra la fuente armónica, debido a que las corrientes armónicas estimadas en el nodo 3 son muy altas, lo cual hace que se sospeche que hay una fuente armónica conectada en este nodo.

En la tabla 4.15 se comprueban los resultados estimados de la corriente armónica inyectada por la fuente armónica contra los dados por Madrigal y Acha en [4]. Las corrientes armónicas calculadas por el estimador son aceptables, debido a que se tiene un error grande en las mediciones.

En la tabla 4.16 se hace una comparación de los voltajes armónicos obtenidos contra los dados en [4] por Acha y Madrigal. Los voltajes sombreados con gris en la tabla 4.16 fueron obtenidos durante el proceso de estimación, mientras que los demás se calcularon con la expresión (3.8). Los voltajes marcados con negrita fueron los que dieron un mayor error, aunque para el caso del voltaje de las armónicas 23 y 25 en el nodo 1, se desprecia el error, ya que la magnitud de voltaje es igual a cero.

Tabla 4.14 Corrientes armónicas estimadas, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 5 nodos

Arm	Nodo	Mag. de Corriente	Ang. de Corrient
5	1	.00385	-153.9417
	3	.02743	-140.9078
	5	1.23683	82.05344
7	1	.00819	145.0619
	3	.01943	15.74035
	5	.5859	85.75977
11	1	.00028	81.76109
	3	.00415	2.64098
	5	.2474	83.06385
13	1	.00005	103.0635
	3	.00722	95.97329
	5	.18258	83.58582
17	1	.00007	-129.7637
	3	.00080	-123.4757
	5	.09924	83.31034
19	1	.00004	17.20922
	3	.00033	36.8439
	5	.07838	83.29746
23	1	.00027	-87.63128
	3	.00073	133.0551
	5	.05323	83.31541
25	1	.00011	-179.9996
	3	.00058	-68.18332
	5	.0443	83.31613

Tabla 4.15 Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 5 nodos

Arm	Mag. de Corriente estimada	Mag. de Corriente real [4]	Error de la mag	Ang. de Corriente estimada	Ang. de corriente real [4]	Error del Ang
5	1.23683	1.1756	.06123	82.05344	83.3037	1.25026
7	.5859	.602952	.017052	85.75977	83.3037	2.45608
11	.2474	.24444	.00296	83.06385	83.3037	.23985
13	.18258	.1746	.00798	83.58582	83.3037	.28212
17	.09924	.102432	.0033192	83.31034	83.3037	.00664
19	.07838	.08148	.0031	83.29746	83.3037	.00624
23	.05323	.055872	.002642	83.31541	83.3037	.01171
25	.0443	.04656	.00226	83.31613	83.3037	.01243

Tabla 4.16 Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 5 nodos

Arm	Nod	Mag. Volt. estim.	Mag. Volt. flujos [4]	Error de la Mag.	Ang. volt estim.	Ang. Volt. Flujos [4]	Error del ang.
5	1	.00007	.00007	0	108.122	108.122	0
	2	.00594	.0057	0.00024	137.756	137.756	0
	3	.16238	.16404	0.00166	99.9193	99.9193	0
	4	.20773	.20602	.00171	104.0009	103.588	.4129
	5	.54437	.51721	.02716	147.9168	148.764	.8472
7	1	.00005	.00005	0	58.54308	58.5431	.00002
	2	.00282	.00296	0.00014	118.915	118.915	0
	3	.12475	.121	0.00375	50.8093	50.8093	0
	4	.15256	.15059	.00197	54.20296	55.3242	1.12124
	5	.31468	.32764	.01296	148.0398	145.768	2.2718
11	1	.00001	.00001	0	-4.7287	-4.7287	0
	2	.00155	.00153	0.00002	147.369	147.369	0
	3	.03043	.02973	0.0007	-11.688	-11.688	0
	4	.03616	.03514	.00102	-8.34233	-6.1935	2.14883
	5	.23149	.22891	.00258	150.2449	150.374	.1291
13	1	.00000	.000005	.000005	-16.527	-16.527	0
	2	.00165	.001586	.000064	148.1139	148.1139	0
	3	.01833	.018437	.000107	-22.7313	-22.7312	.0001
	4	.023320	.020785	.002535	-14.3794	-16.8994	2.52
	5	.22934	.219951	.009389	148.5175	148.305	.2125
17	1	.00000	.000002	.000002	-40.3936	-40.3931	.0005
	2	.00195	.002009	.000059	137.4436	137.4432	.0004
	3	.01226	.012373	.00113	-42.1913	-42.1913	0
	4	.01148	.012009	.000529	-35.5889	-35.5594	.0295
	5	.25212	.260092	.007972	136.6507	136.6535	.0028
19	1	.00000	.000001	.000001	-66.9142	-66.9141	.00001
	2	.002487	.002573	.000086	120.6838	120.6839	.0001
	3	.01245	.013101	.000651	-61.1692	-61.1692	0
	4	.011	.011373	.000373	-53.9049	-53.8979	.007
	5	.31438	.326777	.012397	119.8401	119.8392	.0009
23	1	0	0	0	71.47854	162.952	
	2	.00205	.00215	0.0001	39.5131	39.513	.0001
	3	.00943	.00924	0.00019	-146.11	-146.11	0
	4	.00526	.00567	.00041	-136.055	-136.22	.165
	5	.25356	.26618	.012624	38.66584	38.6734	.00756
25	1	0	0	0	164.7571	142.82	
	2	.00117	.00122	0.00005	19.0292	19.0293	.0001
	3	.0045	.00547	0.00097	-169.17	-169.17	0
	4	.00254	.00253	.0001	-156.734	-156.22	.514
	5	.14283	.15003	.0072	18.19599	18.1738	.02219

Como se observa en las tablas 4.15 y 4.16, al introducir error en las mediciones los resultados no son exactos como en el caso ideal, aunque al comparar los resultados

obtenidos con el estimador contra los datos en [4] los resultados son aceptables; el único problema que presentó el estimador fue que la corriente estimada en el nodo 3 es muy alta; esto pudo suceder debido a que el error en las mediciones permitido por el Estándar es muy grande, además de que ambos estimadores son deterministas.

La tabla 4.17 enlista el THD obtenido para cada nodo del sistema de prueba. En esta tabla se observa que la distorsión armónica no rebasa el 1.5% que indica el Estándar 519-1992[28] de la IEEE, por lo que se sabe que hay una fuente en el quinto nodo, pero no es necesaria la penalización.

Tabla 4.17 THD de los voltajes, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen[19] para el sistema de 5 nodos

<i>Nod</i>	<i>%THD</i>
1	.000084
2	.007988
3	.213171
4	.267844
5	.872042

4.3 ESTIMACIÓN DE UN SISTEMA DE 14 NODOS CON UNA FUENTE DE ARMÓNICAS

Los datos del sistema de prueba empleado se encuentran en el Apéndice A de este trabajo, al igual que en [12-14]. Debido a que las referencias [12-14] no enlistan los voltajes armónicos obtenidos por el estudio de flujos, se implementó un programa que resuelva flujos armónicos por el método de inyecciones de corriente en FORTRAN 90. Para validar este programa, se compararon los resultados del sistema de 5 nodos con los datos en [4], mismos que se encuentran reportados en [31].

La figura 4.2 muestra el sistema de prueba, mientras que la tabla 4.18 los voltajes armónicos obtenidos por el programa de flujos armónicos.

La tabla 4.19 enlista el porcentaje de armónicas que introduce la fuente de armónicas al sistema, que para este caso es un Compensador Estático de Vars conectado en el nodo 8 de la red.

Tabla 4.18 Voltajes armónicos del sistema de 14 nodos [31]

V/h	5	7	11	13	17	19	23	25	29
$ V ^1$	0.1689	0.0618	0.0106	0.0084	0.0121	0.0127	0.0099	0.0015	0.002
θ^1	132.18	12.09	-12.54	95.643	89.375	172.22	17.688	108.51	106.63
$ V ^2$	0.1807	0.0637	0.0098	0.0073	0.0087	0.0079	0.0045	0.0006	0.0011
θ^2	129.57	9.6918	-14.45	94.1	88.697	173.21	34.562	128.99	133.62
$ V ^3$	0.2049	0.0593	0.0057	0.0031	0.0009	0.0043	0.0089	0.0011	0.0008
θ^3	102.11	-18.47	-41.01	69.828	-159	-57.59	116.96	179.8	-47.69
$ V ^4$	0.2442	0.0759	0.005	0.0016	0.009	0.0131	0.0131	0.0018	0.0009
θ^4	142.09	23.704	12.539	170.85	-95.74	-6.294	-147.8	-56.88	84.02
$ V ^5$	0.2291	0.0758	0.0085	0.0039	0.0042	0.01	0.0201	0.0045	0.0114
θ^5	138.51	19.089	-3.236	109.57	-102.6	-8.299	-150.1	-61.97	-65.1
$ V ^6$	0.2119	0.0693	0.0151	0.0061	0.0016	0.0015	0.0065	0.0015	0.0039
θ^6	139.38	19.358	-9.04	84.544	92.646	-25.45	-159.3	-69.4	-70.76
$ V ^7$	0.4343	0.1044	0.442	0.037	0.05	0.0321	0.0447	0.0156	0.0588
θ^7	177.88	77.529	159.62	-96.94	-88.45	6.8693	11.779	111.57	114.87
$ V ^8$	0.7486	0.251	0.2357	0.1623	0.1854	0.1102	0.1718	0.0573	0.2078
θ^8	-149.2	141.09	169.5	-93.89	-87.66	8.3377	13.074	111.93	115.01
$ V ^9$	0.4727	0.1699	0.0533	0.022	0.0131	0.0065	0.0046	0.0014	0.0039
θ^9	155.6	37.997	6.1684	94.946	95.92	-171.4	-167.9	-67.15	-64.14
$ V ^10$	0.4205	0.1484	0.0447	0.0183	0.0104	0.0049	0.0046	0.0013	0.0036
θ^10	152.23	34.17	2.6555	91.717	93.341	-172.1	-168.3	-69.79	-67.3
$ V ^11$	0.3154	0.1079	0.0295	0.012	0.0059	0.0018	0.0053	0.0014	0.0036
θ^11	146.98	28.335	-1.613	88.602	91.942	-160.6	-164.2	-70.61	-70
$ V ^12$	0.2294	0.0734	0.0161	0.0063	0.002	0.0009	0.0054	0.0013	0.0033
θ^12	135.12	14.457	-14.61	78.452	85.053	-39.67	-164.5	-73.93	-74.54
$ V ^13$	0.244	0.0785	0.0179	0.0071	0.0026	0.0006	0.0052	0.0013	0.0032
θ^13	137.01	15.73	-13.43	78.893	84.734	-59.03	-165.3	-74.23	-76.56
$ V ^14$	0.3634	0.1209	0.033	0.0132	0.007	0.0029	0.0039	0.0011	0.0028
θ^14	141.91	23.022	-7.131	82.867	86.525	-174.7	-173.2	-76.2	-73.7

Tabla 4.19 Corriente Armónica de la Fuente de Armónicas [12-14]

Armónica	% de la corriente fundamental	Desfasamiento	Armónica	% de la corriente fundamental	Desfasamiento
5	7.02	46.92	19	0.32	173.43
7	2.5	-29.87	23	0.43	178.02
11	1.36	-23.75	25	0.13	-83.45
13	0.75	71.5	29	0.4	-80.45
17	0.62	77.12			

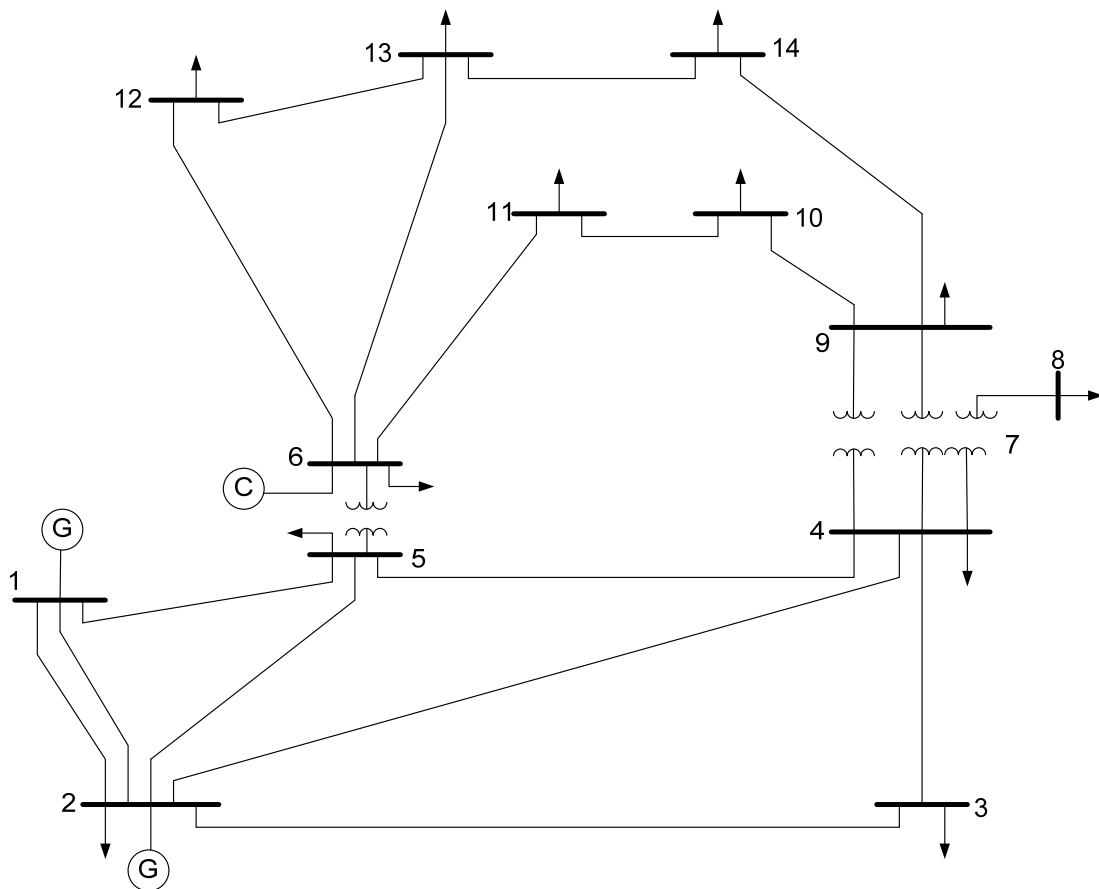


Fig4.2 Sistema de prueba de 14 nodos

4.3.1 ESTIMACIÓN DE UN SISTEMA DE 14 NODOS CON UNA FUENTE DE ARMÓNICAS SIN ERROR EN MEDICIONES POR EL MÉTODO DE HEYDT[15]

Al igual que en el sistema de 5 nodos del cual ya se enlistaron los resultados, se probó el sistema de 14 nodos con el método de Heydt [15], sin error en las mediciones, mismas que se encuentran en la tabla 4.20

Las corrientes armónicas nodales estimadas, con las mediciones dadas en la tabla 4.20, se enlistan en la tabla 4.21. Como se observa en esta tabla, se ha identificado la fuente armónica en el nodo 8, ya que se ve que en este nodo hay una corriente armónica, mientras que en los demás, la corriente es igual a cero o valores muy pequeños (como en los nodos 1 y 3 para la quinta armónica). Por esto se concluye que la estimación se ha realizado correctamente.

Tabla 4.20 Mediciones para la estimación por el método de Heydt [15], sin error en las mediciones para el sistema de 14 nodos

Medición\h	5	7	11	13	17	19	23	25	29
$ V ^2$	0.1807	0.0637	0.0098	0.0073	0.0087	0.0079	0.0045	0.0006	0.0011
Θ^2	129.57	9.6918	-14.45	94.1	88.697	173.21	34.562	128.99	133.62
$ V ^4$	0.2442	0.0759	0.005	0.0016	0.009	0.0131	0.0131	0.0018	0.0009
Θ^4	142.09	23.704	12.539	170.85	-95.74	-6.294	-147.8	-56.88	84.02
$ V ^5$	0.2291	0.0758	0.0085	0.0039	0.0042	0.01	0.0201	0.0045	0.0114
Θ^5	138.51	19.089	-3.236	109.57	-102.6	-8.299	-150.1	-61.97	-65.1
$ V ^6$	0.2119	0.0693	0.0151	0.0061	0.0016	0.0015	0.0065	0.0015	0.0039
Θ^6	139.38	19.358	-9.04	84.544	92.646	-25.45	-159.3	-69.4	-70.76
$ V ^7$	0.4343	0.1044	0.442	0.037	0.05	0.0321	0.0447	0.0156	0.0588
Θ^7	177.88	77.529	159.62	-96.94	-88.45	6.8693	11.779	111.57	114.87
$ V ^{10}$	0.4205	0.1484	0.0447	0.0183	0.0104	0.0049	0.0046	0.0013	0.0036
Θ^{10}	152.23	34.17	2.6555	91.717	93.341	-172.1	-168.3	-69.79	-67.3
$ V ^{11}$	0.3154	0.1079	0.0295	0.012	0.0059	0.0018	0.0053	0.0014	0.0036
Θ^{11}	146.98	28.335	-1.613	88.602	91.942	-160.6	-164.2	-70.61	-70
$ V ^{12}$	0.2294	0.0734	0.0161	0.0063	0.002	0.0009	0.0054	0.0013	0.0033
Θ^{12}	135.12	14.457	-14.61	78.452	85.053	-39.67	-164.5	-73.93	-74.54
$ V ^{13}$	0.244	0.0785	0.0179	0.0071	0.0026	0.0006	0.0052	0.0013	0.0032
Θ^{13}	137.01	15.73	-13.43	78.893	84.734	-59.03	-165.3	-74.23	-76.56
$ V ^{14}$	0.3634	0.1209	0.033	0.0132	0.007	0.0029	0.0039	0.0011	0.0028
Θ^{14}	141.91	23.022	-7.131	82.867	86.525	-174.7	-173.2	-76.2	-73.7
$ I ^2$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^4$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^5$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^6$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^7$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{10}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{10}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{11}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{11}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{12}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{12}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{13}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{13}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{14}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{14}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

En la tabla 4.22 se comparan las corrientes estimadas contra las dadas en [12-14]. Al observar la comparación de las corrientes armónicas se nota que son exactas.

En la tabla 4.23 se comparan los voltajes obtenidos con la expresión (3.8), empleando las corrientes armónicas estimadas contra los obtenidos por el programa de flujos armónicos y reportados en [31]. Como se observa en esta tabla, los voltajes armónicos calculados son exactos.

Tabla 4.21 Corrientes armónicas estimadas, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 14 nodos

<i>Arm.</i>	<i>Nodo</i>	<i>Mag. de Corriente</i>	<i>Ang. de la Corriente</i>
5	1	0.00001	95.74137
	3	0.00001	-62.14679
	8	0.51213	152.43
	9	0	163.7817
7	1	0	-14.07862
	3	0	-96.04494
	8	0.18238	75.63978
	9	0	-8.31913
11	1	0	118.4436
	3	0	-4.47409
	8	0.09922	81.76008
	9	0	84.58949
13	1	0	-0.68346
	3	0	-136.6172
	8	0.05472	177.01
	9	0	-5.84283
17	1	0	-103.2684
	3	0	37.05594
	8	0.04523	-177.37
	9	0	178.1711
19	1	0	-79.08955
	3	0	-59.31078
	8	0.02335	-81.06001
	9	0	-81.74386
23	1	0	136.3175
	3	0	49.15891
	8	0.03137	-76.46999
	9	0	93.41118
25	1	0	33.47577
	3	0	-174.144
	8	0.00948	22.0599
	9	0	-161.0872
29	1	0	21.07458
	3	0	173.9627
	8	0.02918	25.067
	9	0	22.30834

La tabla 4.24 muestra el THD del voltaje para cada nodo de la red; y como se puede observar, el THD no sobrepasa al 1.5% de lo estipulado por el Estándar de la IEEE 519-1998 [28], por lo que no es necesaria la penalización. A pesar de ello se tiene el conocimiento de que existe una fuente armónica en el nodo 8 para futuros estudios en la red.

Tabla 4.22 Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 14 nodos

<i>Armónica</i>	<i>Mag. de Corrient estimada</i>	<i>Mag. de Corrient real [12-14]</i>	<i>Error de la mag.</i>	<i>Ang. de Corrient estimada</i>	<i>Ang. de Corrient real [12-14]</i>	<i>Error del Ang.</i>
5	0.51213	0.51213	0	152.43	152.43	0
7	0.18238	0.18238	0	75.64016	75.64	0.00016
11	0.09922	0.09922	0	81.76008	81.76	0.00008
13	0.05472	0.05472	0	177.01	177.01	0
17	0.04523	0.04523	0	-177.37	-177.37	0
19	0.02335	0.02335	0	-81.06	-81.06	0
23	0.03137	0.03137	0	-76.4699	-76.47	0.0001
25	0.00948	0.00948	0	22.0598	22.06	0.0002
29	0.02918	0.02918	0	25.06	25.06	0

Tabla 4.23 Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 14 nodos

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. Flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
5	1	0.1689	0.1689	0	132.18	132.18	0
	2	0.1807	0.1807	0	129.57	129.57	0
	3	0.2049	0.2049	0	102.11	102.11	0
	4	0.2442	0.2442	0	142.09	142.09	0
	5	0.2291	0.2291	0	138.51	138.51	0
	6	0.2119	0.2119	0	139.38	139.38	0
	7	0.4342	0.4343	0.0001	177.88	177.88	0
	8	0.7486	0.7486	0	-149.2	-149.2	0
	9	0.4727	0.4727	0	155.6	155.6	0
	10	0.4205	0.4205	0	152.24	152.23	0.01
	11	0.3154	0.3154	0	146.98	146.98	0
	12	0.2294	0.2294	0	135.12	135.12	0
	13	0.2439	0.244	0.0001	136.01	136.01	0
	14	0.3634	0.3634	0	141.91	141.91	0
7	1	0.0618	0.0618	0	12.089	12.089	0
	2	0.0637	0.0637	0	9.9611	9.6918	0.0007
	3	0.0593	0.0593	0	-18.48	-18.47	0.01
	4	0.0759	0.0759	0	23.703	23.704	0.001
	5	0.0758	0.0758	0	19.088	19.089	0.001
	6	0.0693	0.0693	0	19.358	19.358	0
	7	0.1044	0.1044	0	77.529	77.528	0.001
	8	0.251	0.251	0	141.09	141.09	0
	9	0.1699	0.1699	0	37.997	37.997	0
	10	0.1484	0.1484	0	34.171	34.17	0.001
	11	0.1079	0.1079	0	28.335	28.335	0
	12	0.0734	0.0734	0	14.547	14.547	0
	13	0.0785	0.0785	0	15.73	15.73	0
	14	0.1209	0.1209	0	23.022	23.022	0

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. Flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
11	1	0.0106	0.0106	0	-12.53	-12.54	0.01
	2	0.0098	0.0098	0	-14.45	-14.45	0
	3	0.0057	0.0057	0	-41	-41.01	0.01
	4	0.005	0.005	0	12.452	12.539	0.087
	5	0.0085	0.0085	0	-3.234	-3.236	0.002
	6	0.0151	0.0151	0	-9.04	-9.04	0
	7	0.0442	0.0442	0	159.62	159.62	0
	8	0.2357	0.2357	0	169.5	169.5	0
	9	0.0533	0.0533	0	6.1684	6.1684	0
	10	0.0447	0.0447	0	2.6554	2.6555	0.0001
	11	0.0295	0.0295	0	-1.613	-1.613	0
	12	0.0161	0.0161	0	-14.46	-14.46	0
	13	0.0179	0.0179	0	-13.43	-13.43	0
	14	0.033	0.033	0	-7.131	-7.131	0
13	1	0.0084	0.0084	0	95.644	95.643	0.001
	2	0.0073	0.0073	0	94.102	94.1	0.002
	3	0.0031	0.0031	0	69.826	69.828	0.002
	4	0.0016	0.0016	0	170.86	170.85	0.01
	5	0.0039	0.0039	0	109.57	109.57	0
	6	0.0061	0.0061	0	84.544	84.544	0
	7	0.037	0.037	0	-96.94	-96.94	0
	8	0.1623	0.1623	0	-93.89	-93.89	0
	9	0.022	0.022	0	94.946	94.946	0
	10	0.0183	0.0183	0	91.717	91.717	0
	11	0.012	0.012	0	88.602	88.602	0
	12	0.0063	0.0063	0	78.452	78.452	0
	13	0.0071	0.0071	0	78.894	78.893	0.001
	14	0.0132	0.0132	0	82.867	82.867	0
17	1	0.0121	0.0121	0	89.375	89.375	0
	2	0.0087	0.0087	0	88.697	88.697	0
	3	0.0009	0.0009	0	-159	-159	0
	4	0.009	0.009	0	-95.74	-95.74	0
	5	0.0042	0.0042	0	-102.6	-102.6	0
	6	0.0016	0.0016	0	92.646	92.646	0
	7	0.05	0.05	0	-88.45	-88.45	0
	8	0.1854	0.1854	0	-87.66	-87.66	0
	9	0.0131	0.0131	0	95.92	95.92	0
	10	0.0104	0.0104	0	93.341	93.341	0
	11	0.0059	0.0059	0	91.452	91.942	0.49
	12	0.002	0.002	0	85.053	85.053	0
	13	0.0026	0.0026	0	84.734	84.734	0
	14	0.007	0.007	0	86.525	86.525	0

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
19	1	0.0127	0.0127	0	172.22	172.22	0
	2	0.0079	0.0079	0	173.21	173.21	0
	3	0.0043	0.0043	0	-57.59	-57.59	0
	4	0.0131	0.0131	0	-6.296	-6.294	0
	5	0.01	0.01	0	-8.301	-8.299	0.002
	6	0.0015	0.0015	0	-25.46	-25.45	0.01
	7	0.0321	0.0321	0	6.8692	6.8693	0.0001
	8	0.1102	0.1102	0	8.3376	8.3377	0.0001
	9	0.0065	0.0065	0	-171.4	-171.4	0
	10	0.0049	0.0049	0	-172.06	-172.06	0
	11	0.0018	0.0018	0	-160.6	-160.6	0
	12	0.0009	0.0009	0	-39.69	-39.67	0
	13	0.0006	0.0006	0	-59.05	-59.03	0
	14	0.0029	0.0029	0	-174.7	-174.7	0
23	1	0.0099	0.0099	0	17.69	17.688	0.002
	2	0.0045	0.0045	0	34.566	34.562	0.004
	3	0.0089	0.0089	0	116.95	117	0.05
	4	0.0131	0.0131	0	-147.8	-147.8	0
	5	0.0201	0.0201	0	-150	-150.1	0.1
	6	0.0065	0.0065	0	-159.3	-159.3	0
	7	0.0447	0.0447	0	11.779	11.779	0
	8	0.1718	0.1718	0	13.074	13.074	0
	9	0.0046	0.0046	0	-167.9	-167.9	0
	10	0.0046	0.0046	0	-168.3	-168.3	0
	11	0.0053	0.0053	0	-164.2	-164.2	0
	12	0.0054	0.0054	0	-164.5	-164.5	0
	13	0.0052	0.0052	0	-165.2	-165.3	0.1
	14	0.0039	0.0039	0	-173.2	-173.2	0
25	1	0.0015	0.0015	0	108.51	108.51	0
	2	0.0006	0.0006	0	129	129	0
	3	0.0011	0.0011	0	176.78	176.8	0.02
	4	0.0018	0.0018	0	-56.87	-56.88	0.01
	5	0.0045	0.0045	0	-67.97	-61.97	0
	6	0.0015	0.0015	0	-69.4	-69.4	0
	7	0.0156	0.0156	0	111.57	111.57	0
	8	0.0573	0.0573	0	111.93	111.93	0
	9	0.0014	0.0014	0	-67.15	-67.15	0
	10	0.0013	0.0013	0	-69.79	-69.79	0
	11	0.0014	0.0014	0	-70.61	-70.61	0
	12	0.0013	0.0013	0	-73.93	-73.93	0
	13	0.0013	0.0013	0	-74.23	-74.23	0
	14	0.0011	0.0011	0	-76.2	-76.2	0

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
29	1	0.002	0.002	0	106.63	106.63	0
	2	0.0011	0.0011	0	133.62	133.62	0
	3	0.0008	0.0008	0	-47.66	-47.69	0.03
	4	0.0009	0.0009	0	84.007	84.02	0.013
	5	0.0114	0.0114	0	-65.1	-65.1	0
	6	0.0039	0.0039	0	-70.76	-70.76	0
	7	0.0588	0.0588	0	114.87	114.87	0
	8	0.2078	0.2078	0	115.01	115.01	0
	9	0.0039	0.0039	0	-64.14	-64.14	0
	10	0.0036	0.0036	0	-67.3	-67.3	0
	11	0.0036	0.0036	0	-70.01	-70.01	0
	12	0.0033	0.0033	0	-74.54	-74.54	0
	13	0.0032	0.0032	0	-74.56	-74.56	0
	14	0.0028	0.0028	0	-73.7	-73.7	0

Tabla 4.24 THD de los voltajes, sin error en las mediciones, por el método de Heydt[15] para el sistema de 14 nodos

<i>Nod</i>	<i>%THD</i>
1	0.171258
2	0.18408
3	0.204867
4	0.249588
5	0.234961
6	0.209015
7	0.45172
8	0.891185
9	0.498535
10	0.441307
11	0.322298
12	0.229463
13	0.24581
14	0.378886

4.3.2 ESTIMACIÓN DE UN SISTEMA DE 14 NODOS CON UNA FUENTE DE ARMÓNICAS SIN ERROR EN MEDICIONES POR EL MÉTODO DE NGUYEN[19]

Se realizó la estimación de estado armónica por el método de Nguyen al sistema de 14 nodos mostrado en la figura 4.2; las mediciones sin error se enlistan en la tabla 4.25.

Tabla 4.25 Mediciones para la estimación por el método de Nguyen [19], sin error en las mediciones para el sistema de 14 nodos

Medición\h	5	7	11	13	17	19	23	25	29
$ V ^1$	0.1689	0.0618	0.0106	0.0084	0.0121	0.0127	0.0099	0.0015	0.002
Θ^1	132.18	12.09	-12.54	95.643	89.375	172.22	17.688	108.51	106.63
$ V ^3$	0.2049	0.0593	0.0057	0.0031	0.0009	0.0043	0.0089	0.0011	0.0008
Θ^3	102.11	-18.47	-41.01	69.828	-159	-57.59	116.96	179.8	-47.69
$ V ^5$	0.2291	0.0758	0.0085	0.0039	0.0042	0.01	0.0201	0.0045	0.0114
Θ^5	138.51	19.089	-3.236	109.57	-102.6	-8.299	-150.1	-61.97	-65.1
$ V ^7$	0.4343	0.1044	0.442	0.037	0.05	0.0321	0.0447	0.0156	0.0588
Θ^7	177.88	77.529	159.62	-96.94	-88.45	6.8693	11.779	111.57	114.87
$ V ^8$	0.7486	0.251	0.2357	0.1623	0.1854	0.1102	0.1718	0.0573	0.2078
Θ^8	-149.2	141.09	169.5	-93.89	-87.66	8.3377	13.074	111.93	115.01
$ V ^{10}$	0.4205	0.1484	0.0447	0.0183	0.0104	0.0049	0.0046	0.0013	0.0036
Θ^{10}	152.23	34.17	2.6555	91.717	93.341	-172.1	-168.3	-69.79	-67.3
$ V ^{11}$	0.3154	0.1079	0.0295	0.012	0.0059	0.0018	0.0053	0.0014	0.0036
Θ^{11}	146.98	28.335	-1.613	88.602	91.942	-160.6	-164.2	-70.61	-70
$ V ^{12}$	0.2294	0.0734	0.0161	0.0063	0.002	0.0009	0.0054	0.0013	0.0033
Θ^{12}	135.12	14.457	-14.61	78.452	85.053	-39.67	-164.5	-73.93	-74.54
$ V ^{13}$	0.244	0.0785	0.0179	0.0071	0.0026	0.0006	0.0052	0.0013	0.0032
Θ^{13}	137.01	15.73	-13.43	78.893	84.734	-59.03	-165.3	-74.23	-76.56
$ V ^{14}$	0.3634	0.1209	0.033	0.0132	0.007	0.0029	0.0039	0.0011	0.0028
Θ^{14}	141.91	23.022	-7.131	82.867	86.525	-174.7	-173.2	-76.2	-73.7
$ I ^2$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^3$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^4$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^5$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^6$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^9$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{10}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{10}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{11}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{11}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{12}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{12}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{14}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{14}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Las corrientes armónicas obtenidas por el estimador se encuentran en la tabla 4.26. Al observar esta tabla se distingue que en el nodo 8 es donde se encuentra conectada la fuente armónica, ya que se tiene un valor de corriente para cada armónica, mientras que en los demás nodos las corrientes armónicas son cero, por lo que resulta obvio decir que la fuente armónica se encuentra en este nodo.

Tabla 4.26 Corrientes armónicas estimadas, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos

<i>Arm.</i>	<i>Nodo</i>	<i>Mag. de Corriente</i>	<i>Ang. de la Corriente</i>
5	1	0	-4.58455
	7	0	-66.19855
	8	0.51213	152.4299
	13	0	-22.90273
7	1	0	-106.5112
	7	0	-156.0614
	8	0.18238	75.63984
	13	0	-70.82644
11	1	0	-86.03762
	7	0	100.9068
	8	0.09922	81.75999
	13	0	-98.70667
13	1	0	-157.0492
	7	0	-178.6724
	8	0.05472	177.01
	13	0	-19.42882
17	1	0	95.11942
	7	0	7.17862
	8	0.04523	-177.37
	13	0	178.2327
19	1	0	-144.1553
	7	0	-114.9792
	8	0.02335	-81.06001
	13	0	21.34664
23	1	0	-30.96012
	7	0	92.96058
	8	0.03137	-76.47
	13	0	69.37106
25	1	0	48.58557
	7	0	-151.9846
	8	0.00948	22.06002
	13	0	-158.5506
29	1	0	-153.0176
	7	0	14.99076
	8	0.02918	25.06006
	13	0	19.40301

En la tabla 4.27 se comparan las corrientes armónicas obtenidas con el estimador contra las corrientes armónicas dadas en los artículos [12-14]. Al igual que el método de Heydt [15], el método de Nguyen [19] es exacto al comparar las corrientes armónicas estimadas de la fuente armónica contra los datos dados en [12-14], por lo que en este caso los dos estimadores han dado resultados correctos ya que ambos identificaron la fuente armónica.

Tabla 4.27 Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos

<i>Armónica</i>	<i>Mag. de Corrient estimada</i>	<i>Mag. de Corrient real [12-14]</i>	<i>Error de la mag.</i>	<i>Ang. de Corrient estimada</i>	<i>Ang. de Corrient real [12-14]</i>	<i>Error del Ang.</i>
5	0.51213	0.51213	0	152.4299	152.43	0.0001
7	0.18238	0.18238	0	75.63984	75.64	0.00016
11	0.09922	0.09922	0	81.75999	81.76	0.00001
13	0.05472	0.05472	0	177.01	177.01	0
17	0.04523	0.04523	0	-177.37	-177.37	0
19	0.02335	0.02335	0	-81.06	-81.06	0
23	0.03137	0.03137	0	-76.47	-76.47	0
25	0.00948	0.00948	0	22.06002	22.06	0.00002
29	0.02918	0.02918	0	25.06006	25.06	0.00006

En la tabla 4.28 se encuentran los voltajes armónicos estimados por el método de Nguyen [19] comparados contra los obtenidos por el programa de flujos de potencia armónica y que se encuentran reportados en [31]. Los voltajes armónicos sombreados de gris fueron calculados directamente con el estimador, mientras que los demás se obtuvieron con la expresión (3.8). Se observa en la tabla 4.28 que los voltajes armónicos calculados son exactos.

La tabla 4.29 contiene el THD del voltaje para cada nodo del sistema. De igual forma que en el caso anterior no se sobrepasa el valor permitido por el Estándar de la IEEE 519-1998 [28] para los sistemas de transmisión, por lo que en conclusión se sabe que existe una fuente armónica en el nodo 8 pero que no sobrepasa el 1.5% de THD permitido, por lo que no es necesario sancionar, pero si tener en cuenta la existencia de esta fuente para estudios posteriores de la red.

Tabla 4.28 Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
5	1	0.1689	0.1689	0	132.18	132.18	0
	2	0.1807	0.1807	0	129.57	129.57	0
	3	0.2049	0.2049	0	102.11	102.11	0
	4	0.2442	0.2442	0	142.09	142.09	0
	5	0.2291	0.2291	0	138.51	138.51	0
	6	0.2119	0.2119	0	139.38	139.38	0
	7	0.4342	0.4343	0.0001	177.88	177.88	0
	8	0.7486	0.7486	0	-149.2	-149.2	0
	9	0.4727	0.4727	0	155.6	155.6	0
	10	0.4205	0.4205	0	152.24	152.23	0.01
	11	0.3154	0.3154	0	146.98	146.98	0
	12	0.2294	0.2294	0	135.12	135.12	0
	13	0.2439	0.244	0.0001	136.01	136.01	0
	14	0.3634	0.3634	0	141.91	141.91	0
7	1	0.0618	0.0618	0	12.088	12.089	0.001
	2	0.0637	0.0637	0	9.691	9.6918	0.0008
	3	0.0593	0.0593	0	-18.47	-18.47	0
	4	0.0759	0.0759	0	23.703	23.704	0.001
	5	0.0758	0.0758	0	19.088	19.089	0.001
	6	0.0693	0.0693	0	19.358	19.358	0
	7	0.1044	0.1044	0	77.53	77.528	0.002
	8	0.251	0.251	0	141.09	141.09	0
	9	0.1699	0.1699	0	37.998	37.997	0.001
	10	0.1484	0.1484	0	34.171	34.17	0.001
	11	0.1079	0.1079	0	28.336	28.335	0.001
	12	0.0734	0.0734	0	14.547	14.547	0
	13	0.0785	0.0785	0	15.731	15.73	0.001
	14	0.1209	0.1209	0	23.023	23.022	0.001
11	1	0.0106	0.0106	0	-12.53	-12.54	0.01
	2	0.0098	0.0098	0	-14.45	-14.45	0
	3	0.0057	0.0057	0	-41	-41.01	0.01
	4	0.005	0.0050	0	12.539	12.539	0
	5	0.0085	0.0085	0	-3.229	-3.236	0.007
	6	0.0151	0.0151	0	-9.04	-9.04	0
	7	0.0442	0.0442	0	159.62	159.62	0
	8	0.2357	0.2357	0	169.5	169.5	0
	9	0.0533	0.0533	0	6.1684	6.1684	0
	10	0.0447	0.0447	0	2.6551	2.6555	0.0004
	11	0.0295	0.0295	0	-1.612	-1.613	0.001
	12	0.0161	0.0161	0	-14.46	-14.46	0
	13	0.0179	0.0179	0	-13.43	-13.43	0
	14	0.033	0.033	0	-7.132	-7.131	0.001

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
13	1	0.0084	0.0084	0	95.645	95.643	0.002
	2	0.0073	0.0073	0	94.1	94.1	0
	3	0.0031	0.0031	0	69.831	69.828	0.003
	4	0.0016	0.0016	0	170.85	170.85	0
	5	0.0039	0.0039	0	109.57	109.57	0
	6	0.0061	0.0061	0	84.544	84.544	0
	7	0.037	0.037	0	-96.94	-96.94	0
	8	0.1623	0.1623	0	-93.89	-93.89	0
	9	0.022	0.022	0	94.946	94.946	0
	10	0.0183	0.0183	0	91.917	91.717	0
	11	0.012	0.012	0	88.602	88.602	0
	12	0.0063	0.0063	0	78.452	78.452	0
	13	0.0071	0.0071	0	78.894	78.893	0.001
	14	0.0132	0.0132	0	82.867	82.867	0
17	1	0.0121	0.0121	0	89.375	89.375	0
	2	0.0087	0.0087	0	88.696	88.697	0.001
	3	0.0009	0.0009	0	-159	-159	0
	4	0.009	0.009	0	-95.74	-95.74	0
	5	0.0042	0.0042	0	-102.6	-102.6	0
	6	0.0016	0.0016	0	92.646	92.646	0
	7	0.05	0.05	0	-88.45	-88.45	0
	8	0.1854	0.1854	0	-87.66	-87.66	0
	9	0.0131	0.0131	0	95.92	95.92	0
	10	0.0104	0.0104	0	93.341	93.341	0
	11	0.0059	0.0059	0	91.942	91.942	0
	12	0.002	0.002	0	85.053	85.053	0
	13	0.0026	0.0026	0	84.734	84.734	0
	14	0.007	0.007	0	86.525	86.525	0
19	1	0.0127	0.0127	0	172.22	172.22	0
	2	0.0079	0.0079	0	173.21	173.21	0
	3	0.0043	0.0043	0	-57.59	-57.59	0
	4	0.0131	0.0131	0	-6.294	-6.294	0
	5	0.01	0.01	0	-8.298	-8.299	0.001
	6	0.0015	0.0015	0	-25.45	-25.45	0
	7	0.0321	0.0321	0	6.8694	6.8693	0.0001
	8	0.1102	0.1102	0	8.3377	8.3377	0
	9	0.0065	0.0065	0	-171.4	-171.4	0
	10	0.0049	0.0049	0	-172.1	-172.1	0
	11	0.0018	0.0018	0	-160.6	-160.6	0
	12	0.0009	0.0009	0	-39.66	-39.67	0.01
	13	0.0006	0.0006	0	-59.032	-59.032	0
	14	0.0029	0.0029	0	-174.7	-174.7	0

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
23	1	0.0099	0.0099	0	17.69	17.688	0.002
	2	0.0045	0.0045	0	34.561	34.562	0.001
	3	0.0089	0.0089	0	116.96	117	0.04
	4	0.0131	0.0131	0	-147.8	-147.8	0
	5	0.0201	0.0201	0	-150	-150.1	0.1
	6	0.0065	0.0065	0	-159.3	-159.3	0
	7	0.0447	0.0447	0	11.778	11.779	0.001
	8	0.1718	0.1718	0	13.074	13.074	0
	9	0.0046	0.0046	0	-167.9	-167.9	0
	10	0.0046	0.0046	0	-168.3	-168.3	0
	11	0.0053	0.0053	0	-164.2	-164.2	0
	12	0.0054	0.0054	0	-164.5	-164.5	0
	13	0.0052	0.0052	0	-165.2	-165.3	0.1
	14	0.0039	0.0039	0	-173.2	-173.2	0
25	1	0.0015	0.0015	0	108.51	108.51	0
	2	0.0006	0.0006	0	129	129	0
	3	0.001	0.0011	0.0001	176.8	176.8	0
	4	0.0018	0.0018	0	-56.88	-56.88	0
	5	0.0045	0.0045	0	-61.97	-61.97	0
	6	0.0015	0.0015	0	-69.4	-69.4	0
	7	0.0156	0.0156	0	111.57	111.57	0
	8	0.0573	0.0573	0	111.93	111.93	0
	9	0.0014	0.0014	0	-67.15	-67.15	0
	10	0.0013	0.0013	0	-69.79	-69.79	0
	11	0.0014	0.0014	0	-70.61	-70.61	0
	12	0.0013	0.0013	0	-73.93	-73.93	0
	13	0.0013	0.0013	0	-74.23	-74.23	0
	14	0.0011	0.0011	0	-76.2	-76.2	0
29	1	0.002	0.002	0	106.64	106.63	0.01
	2	0.0011	0.0011	0	133.62	133.62	0
	3	0.0008	0.0008	0	-47.69	-47.69	0
	4	0.0009	0.0009	0	84.01	84.02	0.01
	5	0.0114	0.0114	0	-65.1	-65.1	0
	6	0.0039	0.0039	0	-70.76	-70.76	0
	7	0.0588	0.0588	0	114.87	114.87	0
	8	0.2078	0.2078	0	115.01	115.01	0
	9	0.0039	0.0039	0	-64.14	-64.14	0
	10	0.0036	0.0036	0	-67.3	-67.3	0
	11	0.0036	0.0036	0	-70.01	-70.01	0
	12	0.0033	0.0033	0	-74.54	-74.54	0
	13	0.0032	0.0032	0	-74.56	-74.56	0
	14	0.0028	0.0028	0	-73.7	-73.7	0

Tabla 4.29 THD de los voltajes, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen[19] para el sistema de 14 nodos

<i>Nod</i>	<i>%THD</i>
1	0.171255
2	0.184078
3	0.204867
4	0.249587
5	0.234959
6	0.209014
7	0.451717
8	0.891184
9	0.498532
10	0.441304
11	0.322296
12	0.229462
13	0.245808
14	0.378884

4.3.3 ESTIMACIÓN DE UN SISTEMA DE 14 NODOS CON UNA FUENTE DE ARMÓNICAS CON ERROR EN MEDICIONES POR EL MÉTODO DE NGUYEN[19]

Una vez realizado el caso sin error para el sistema de 14 nodos para el caso ideal, se procede a hacer el caso con error un error de $\pm 5\%$ en las mediciones, según lo estipulado en el Estándar 519-1992 de la IEEE [28]. La tabla 4.30 enlista las mediciones mismas que están afectadas con un error representado por números aleatorios con una distribución uniforme con límites de $\pm 5\%$.

Las corrientes armónicas estimadas para este caso se encuentran enlistadas en la tabla 4.31. Es difícil identificar en que nodo se encuentra la fuente armónica, ya que como se observa, las corrientes armónicas son altas, por lo que se sospecharía la presencia de más de una fuente armónica y no es el caso. Esto puede suceder debido a dos situaciones; la primera que el error de las mediciones es muy alto, y la última que el método de Nguyen [19] y de Heydt [15] son deterministas.

La tabla 4.32 muestra la comparación de la corriente armónica estimada contra las mostradas en los artículos [12-14]. Al observar esta tabla se encuentra un error mayor que en el caso ideal, esto se debe a que el error mencionado por el Estándar 519-

1992 [28] es muy grande comparado con los medidores convencionales; a pesar de ello, los resultados son aceptables.

Tabla 4.30 Mediciones para la estimación por el método de Nguyen [19], con error en las mediciones para el sistema de 14 nodos

Medición/h	5	7	11	13	17	19	23	25	29
$ V ^1$	0.1774	0.0643	0.0108	0.008	0.012	0.0133	0.0099	0.0015	0.0019
Θ^1	132.18	12.088	-12.54	95.643	89.375	172.22	17.688	108.51	106.63
$ V ^3$	0.2134	0.0589	0.0057	0.0031	0.0009	0.0044	0.0092	0.0011	0.0007
Θ^3	102.11	-18.47	-41.01	69.828	-159	-57.59	116.96	176.8	-47.69
$ V ^5$	0.2268	0.0752	0.0082	0.0039	0.0041	0.0099	0.0197	0.0044	0.0118
Θ^5	138.51	19.089	-3.236	109.57	-102.6	-8.3	-150.1	-61.97	-65.1
$ V ^7$	0.4172	0.1011	0.0436	0.037	0.0482	0.0318	0.0455	0.0153	0.0566
Θ^7	177.88	77.528	159.62	-96.94	-88.45	6.8693	11.779	111.57	114.87
$ V ^8$	0.7136	0.2487	0.2262	0.164	0.1856	0.1075	0.1726	0.0597	0.2053
Θ^8	-149.2	141.09	169.5	-93.89	-87.66	8.3377	13.074	111.93	115.01
$ V ^{10}$	0.4336	0.1482	0.0426	0.0178	0.0101	0.005	0.0048	0.0014	0.0035
Θ^{10}	152.23	34.17	2.6555	91.717	93.341	-172.1	-168.3	-69.79	-67.3
$ V ^{11}$	0.3149	0.1039	0.0305	0.0118	0.0062	0.0018	0.0055	0.0013	0.0036
Θ^{11}	146.98	28.335	-1.613	88.602	91.942	-160.6	-164.2	-70.61	-70.01
$ V ^{12}$	0.2318	0.0697	0.0155	0.0063	0.0021	0.001	0.0056	0.0013	0.0032
Θ^{12}	135.12	14.547	-14.46	78.452	85.053	-39.67	-164.4	-73.93	-74.5
$ V ^{13}$	0.2497	0.0767	0.0172	0.007	0.0026	0.0006	0.0052	0.0013	0.0033
Θ^{13}	136.01	15.73	-13.43	78.893	84.734	-59.03	-165.2	-74.23	-74.56
$ V ^{14}$	0.3545	0.1153	0.0336	0.0137	0.0068	0.0028	0.0041	0.0011	0.0029
Θ^{14}	141.91	23.022	-7.131	82.867	86.525	-174.7	-173.2	-76.2	-73.7
$ I ^2$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^3$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^4$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^5$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^6$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^9$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{10}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{10}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{11}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{11}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{12}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{12}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{14}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{14}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

En la tabla 4.33 se comparan los voltajes armónicos obtenidos por el estimador contra los voltajes obtenidos por el programa que resuelve flujos armónicos, mismos que se encuentran en [31]. Al revisar la tabla se aprecia un mayor error que en el caso ideal, aunque los resultados siguen siendo aceptables. A pesar de que al comparar los

datos estimados contra los obtenidos por los flujos armónicos son buenos, el estimador falla al identificar la ubicación de la fuente de armónicas.

Tabla 4.31 Corrientes armónicas estimadas, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14

<i>Arm.</i>	<i>Nodo</i>	<i>Mag. de Corriente</i>	<i>Ang. de la Corriente</i>
5	1	0.02916	49.8438
	7	0.4248	-129.4915
	8	0.48656	152.8302
	13	0.02006	56.54558
7	1	0.00657	-74.91571
	7	0.00588	164.9562
	8	0.18078	75.05639
	13	0.00352	-64.37756
11	1	0.00056	-94.08205
	7	0.0012	63.56954
	8	0.09468	81.83218
	13	0.0097	87.59126
13	1	0.0003	-166.5771
	7	0.00107	-4.68221
	8	0.05548	176.9963
	13	0.00017	176.8362
17	1	0.00008	-0.38016
	7	0.00224	2.18618
	8	0.04585	-177.3839
	13	0.00004	-1.1234
19	1	0.00017	-129.9248
	7	0.0005	-80.87141
	8	0.02263	-81.04597
	13	0.00004	66.15429
23	1	0.00048	-45.70518
	7	0.00039	-82.88332
	8	0.03138	-76.46255
	13	0.00005	-83.32413
25	1	0.00001	185.4036
	7	0.00075	-158.0901
	8	0.01007	22.05001
	13	0.00002	-157.831
29	1	0.00005	-146.13
	7	0.00098	-155.1679
	8	0.02911	25.05814
	13	0.00005	-161.5341

La tabla 4.34 contiene el THD del voltaje para cada nodo de la red. A pesar del error en las mediciones, ninguno de los nodos sobrepasa el valor estipulado por el Estándar 519-1992 [28], así que no es necesario aplicar sanciones.

Tabla 4.32 Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos

<i>Armónica</i>	<i>Mag. de Corrient estimada</i>	<i>Mag. de Corrient real [12-14]</i>	<i>Error de la mag.</i>	<i>Ang. de Corrient estimada</i>	<i>Ang. de Corrient real [12-14]</i>	<i>Error del Ang.</i>
5	0.48656	0.51213	0.02557	152.8302	152.43	0.4002
7	0.18078	0.18238	0.0016	75.05639	75.64	0.58361
11	0.09468	0.09922	0.00454	81.83218	81.76	0.07218
13	0.05548	0.05472	0.00076	176.9963	177.01	0.0133
17	0.04585	0.04523	0.00062	-177.3839	-177.37	0.0139
19	0.02263	0.02335	0.00072	-81.04597	-81.06	0.01403
23	0.03138	0.03137	0.00001	-76.46255	-76.47	0.00745
25	0.01007	0.00948	0.00059	22.05001	22.06	0.01001
29	0.02911	0.02918	0.00007	25.05814	25.06	0.00186

Tabla 4.33 Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
5	1	0.1733	0.1689	0.0044	134.18	132.18	2
	2	0.1847	0.1807	0.004	129.42	129.57	0.15
	3	0.1999	0.2049	0.005	103.96	102.11	1.87
	4	0.2419	0.2442	0.0023	141.81	142.09	0.28
	5	0.2234	0.2291	0.0057	140.40	138.51	1.89
	6	0.2123	0.2119	0.0004	139.39	139.38	0.01
	7	0.4056	0.4343	0.0287	178.35	177.88	0.47
	8	0.7182	0.7486	0.0304	-146.8	-149.2	2.4
	9	0.4753	0.4727	0.0026	155.4	155.6	0.2
	10	0.3974	0.4205	0.0231	155.08	152.23	2.85
	11	0.3021	0.3154	0.0133	149.46	146.98	2.52
	12	0.2294	0.2294	0	137.29	135.12	2.17
	13	0.2462	0.244	0.0022	138.18	136.01	2.17
	14	0.3487	0.3634	0.0147	144.37	141.91	2.46

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
7	1	0.0647	0.0618	0.0029	11.698	12.089	0.391
	2	0.0646	0.0637	0.0009	9.7105	9.6918	0.0187
	3	0.0593	0.0593	0	-18.94	-18.47	0.47
	4	0.0751	0.0759	0.0008	23.586	23.704	0.118
	5	0.0756	0.0758	0.0002	18.735	19.089	0.354
	6	0.0669	0.0693	0.0024	19.314	19.358	0.044
	7	0.1004	0.1044	0.004	79.916	77.528	2.388
	8	0.2521	0.251	0.0011	141.69	141.09	0.6
	9	0.1683	0.1699	0.0016	37.888	37.997	0.109
	10	0.1431	0.1484	0.0053	35.395	34.17	1.225
	11	0.105	0.1079	0.0029	29.193	28.335	0.858
	12	0.0738	0.0734	0.0004	15.037	14.547	0.49
	13	0.0794	0.0785	0.0009	16.284	15.73	0.554
	14	0.1177	0.1209	0.0032	23.936	23.022	0.914
11	1	0.0103	0.0106	0.0003	-16.55	-12.54	4.01
	2	0.0098	0.0098	0	-14.62	-14.45	0.17
	3	0.0053	0.0057	0.0004	-46.04	-41.01	5.03
	4	0.0047	0.0050	0.0003	13.235	12.539	0.696
	5	0.0078	0.0085	0.0007	-7.298	-3.236	4.062
	6	0.0151	0.0151	0	-8.757	-9.04	0.283
	7	0.0426	0.0442	0.0016	159.43	159.62	0.19
	8	0.2253	0.2357	0.0104	169.51	169.5	0.01
	9	0.0518	0.0533	0.0015	6.4521	6.1684	0.2837
	10	0.0433	0.0447	0.0014	2.7242	2.6555	0.0687
	11	0.0283	0.0295	0.0012	-1.507	-1.613	0.106
	12	0.0145	0.0161	0.0016	-14.66	-14.46	0.2
	13	0.016	0.0179	0.0019	-13.61	-13.43	0.18
	14	0.0315	0.033	0.0015	-6.862	-7.131	0.269
13	1	0.0084	0.0084	0	96.771	95.643	1.128
	2	0.0072	0.0073	0.0001	94.217	94.1	0.117
	3	0.0033	0.0031	0.0002	70.991	69.828	1.163
	4	0.0017	0.0016	0.0001	168.11	170.85	2.74
	5	0.0041	0.0039	0.0002	110.69	109.57	1.12
	6	0.006	0.0061	0.0001	84.629	84.544	0.085
	7	0.0368	0.037	0.0002	-96.95	-96.94	0.01
	8	0.1637	0.1623	0.0014	-93.89	-93.89	0
	9	0.0216	0.022	0.0004	95.108	94.946	0.162
	10	0.0182	0.0183	0.0001	91.646	91.717	0.071
	11	0.0119	0.012	0.0001	88.707	88.602	0.705
	12	0.0062	0.0063	0.0001	78.952	78.452	0.5
	13	0.0068	0.0071	0.0003	79.282	78.893	0.611
	14	0.013	0.0132	0.0002	82.924	82.867	0.057

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
17	1	0.0117	0.0121	0.0004	89.252	89.375	0.123
	2	0.0086	0.0087	0.0001	88.697	88.697	0
	3	0.0009	0.0009	0	-156.95	-159	2.05
	4	0.0088	0.009	0.0002	-95.8	-95.74	0.14
	5	0.0041	0.0042	0.0001	-102.3	-102.6	0.3
	6	0.0017	0.0016	0.0001	92.407	92.646	0.239
	7	0.0482	0.05	0.0018	-88.44	-88.45	0.01
	8	0.01855	0.1854	0.0001	-87.66	-87.66	0
	9	0.0126	0.0131	0.0005	95.918	95.92	0.004
	10	0.0101	0.0104	0.0003	93.343	93.341	0.002
	11	0.0057	0.0059	0.0002	91.908	91.942	0.034
	12	0.002	0.002	0	84.832	85.053	0.221
	13	0.00253	0.0026	0.0007	84.566	84.734	0.168
	14	0.0068	0.007	0.0002	86.481	86.525	0.044
19	1	0.0125	0.0127	0.0002	173.45	172.22	1.23
	2	0.0083	0.0079	0.0004	172.53	173.21	0.68
	3	0.0041	0.0043	0.0002	-55.64	-57.59	1.95
	4	0.013	0.0131	0.0001	-6.357	-6.294	0.063
	5	0.0097	0.01	0.0003	-6.949	-8.299	1.35
	6	0.0015	0.0015	0	-25.36	-25.45	0.09
	7	0.0317	0.0321	0.0004	7.0341	6.8693	0.1648
	8	0.1075	0.1102	0.0027	8.3873	8.3377	0.0496
	9	0.0065	0.0065	0	-171.4	-171.4	0
	10	0.0048	0.0049	0.0001	-171.9	-172.1	0.2
	11	0.0018	0.0018	0	-162.2	-160.6	1.6
	12	0.0008	0.0009	0.0001	-38.03	-39.67	1.64
	13	0.0005	0.0006	0.0001	-62.78	-59.032	3.748
	14	0.0029	0.0029	0	-175.25	-174.7	0.55
23	1	0.01	0.0099	0.0001	17.475	17.688	0.213
	2	0.0037	0.0045	0.0008	33.093	34.562	0.469
	3	0.0092	0.0089	0.0003	116.72	117	0.28
	4	0.0127	0.0131	0.0004	-147.8	-147.8	0
	5	0.0198	0.0201	0.0003	-150.5	-150.1	0.4
	6	0.0065	0.0065	0	-159.4	-159.3	0.1
	7	0.0454	0.0447	0.0007	11.823	11.779	0.044
	8	0.1725	0.1718	0.0007	13.086	13.074	0.012
	9	0.0047	0.0046	0.0001	-167.9	-167.9	0
	10	0.0046	0.0046	0	-168.3	-168.3	0
	11	0.0053	0.0053	0	-164.3	-164.2	0.1
	12	0.0053	0.0054	0.0001	-164.6	-164.5	0.1
	13	0.0051	0.0052	0.0001	-165.2	-165.3	0.1
	14	0.0039	0.0039	0	-173.2	-173.2	0

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
25	1	0.0015	0.0015	0	108.93	108.51	0.42
	2	0.0006	0.0006	0	128.18	129	0.82
	3	0.001	0.0011	0.0001	177.34	176.8	0.54
	4	0.0018	0.0018	0	-57.04	-56.88	0.16
	5	0.0044	0.0045	0.0001	-62.04	-61.97	0.07
	6	0.0015	0.0015	0	-69.45	-69.4	0.05
	7	0.0153	0.0156	0.0003	111.57	111.57	0
	8	0.0597	0.0573	0.0024	111.93	111.93	0
	9	0.0014	0.0014	0	-67.14	-67.15	0.01
	10	0.0013	0.0013	0	-69.82	-69.79	0.03
	11	0.0014	0.0014	0	-70.74	-70.61	0.13
	12	0.0013	0.0013	0	-74.14	-73.93	0.21
	13	0.0013	0.0013	0	-74.37	-74.23	0.14
	14	0.0011	0.0011	0	-76.34	-76.2	0.14
29	1	0.0021	0.002	0.0001	108.99	106.63	2.36
	2	0.0013	0.0011	0.0002	129.35	133.62	4.27
	3	0.0007	0.0008	0.0001	-49.62	-47.69	2.07
	4	0.0007	0.0009	0.0002	83.842	84.02	0.538
	5	0.011	0.0114	0.0004	-65.11	-65.1	0.01
	6	0.004	0.0039	0.0001	-70.74	-70.76	0.02
	7	0.0567	0.0588	0.0021	114.87	114.87	0
	8	0.2054	0.2078	0.0024	115.01	115.01	0
	9	0.0037	0.0039	0.0002	-64.13	-64.14	0.01
	10	0.0034	0.0036	0.0002	-67.34	-67.3	0.04
	11	0.0035	0.0036	0.0001	-70.14	-70.01	0.13
	12	0.0033	0.0033	0	-74.77	-74.54	0.23
	13	0.0033	0.0032	0.0001	-74.78	-74.56	0.22
	14	0.0028	0.0028	0	-73.91	-73.7	0.21

4.4 ESTIMACIÓN DE UN SISTEMA DE 14 NODOS CON DOS FUENTES DE ARMÓNICAS

Por último se probará la eficiencia de los estimadores propuestos con dos fuentes armónicas. La primer fuente armónica es el Compensador Estático de Vars del caso anterior conectado en el nodo 8. La segunda fuente es un horno de arco eléctrico conectado en el nodo 12; los datos de este se tomaron de el Estándar IEEE 519-1992[28] y de los datos dados por un fabricante en la internet [32]. Todos los datos de las fuentes y el sistema de prueba se encuentran en el Apéndice A de este trabajo. El sistema a probar es el mismo de la figura 4.2.

Tabla 4.34 THD de los voltajes, con error en las mediciones, por el método de Nguyen[19] para el sistema de 14 nodos

<i>Nod</i>	<i>%THD</i>
1	0.175988
2	0.183639
3	0.200283
4	0.24094
5	0.22624
6	0.206232
7	0.523782
8	0.864138
9	0.470795
10	0.418126
11	0.309221
12	0.229439
13	0.248031
14	0.364133

Los voltajes armónicos empleados como mediciones para llevar a cabo la estimación se obtuvieron de un programa desarrollado en FORTRAN 90 que obtiene los flujos armónicos por el método de inyecciones de corriente. Estos voltajes se encuentran en la tabla 4.35.

El porcentaje de corriente armónica inyectada por el Compensador Estático de Vars está dado en la tabla 4.19, mientras que el del horno de arco está en la tabla 4.36. La corriente armónica inyectada por el horno de arco fue tomado del Estándar IEEE 519-1992[28].

Cabe mencionar que el horno de arco tiene dos formas de funcionamiento, la primera es al inicio de la fundición, también conocida como arco activo, y la segunda es el refinamiento o arco estable. Para este caso se consideró que el horno de arco se encuentra con el arco activo.

4.3.1 ESTIMACIÓN DE UN SISTEMA DE 14 NODOS CON DOS FUENTES DE ARMÓNICAS SIN ERROR EN MEDICIONES POR EL MÉTODO DE HEYDT[15]

Se usó el sistema de pruebas de la figura 4.2, del cual se desconoce la ubicación de las fuentes de armónicas. Las mediciones que se emplearon para llevar a cabo la

estimación de estado usando el método de Heydt [15] no tienen error y se encuentran en la tabla 4.37.

Tabla 4.35 Voltajes armónicos del sistema de 14 nodos con dos fuentes armónicas

V/h	2	3	4	5	7	11	13	17	19	23	25	29
$ V ^1$	0.4119	0.376	0.1918	0.2704	0.2414	0.0106	0.0084	0.0121	0.0127	0.0099	0.0015	0.002
θ^1	39.54	30.984	18.825	29.429	-25.6	-12.54	95.643	89.375	172.22	17.688	105.51	106.63
$ V ^2$	0.4577	0.412	0.2076	0.2858	0.2534	0.0098	0.0073	0.0087	0.0079	0.0045	0.0006	0.0011
θ^2	35.798	27.141	14.932	25.282	-29.56	-14.45	94.1	88.697	173.21	34.562	129	133.62
$ V ^3$	0.6936	0.5693	0.2606	0.3185	0.2499	0.0057	0.0031	0.0009	0.0043	0.0089	0.0011	0.0008
θ^3	13.254	0.7867	-14.13	-6.409	-61.62	-41.01	69.828	-159	-57.59	116.96	176.8	-47.69
$ V ^4$	0.6091	0.5596	0.2849	0.3719	0.3297	0.005	0.0016	0.009	0.0131	0.0131	0.0018	0.0009
θ^4	40.803	33.532	21.931	30.99	-22.56	12.539	170.85	-95.74	-6.294	-147.8	-56.88	84.02
$ V ^5$	0.5912	0.5433	0.2729	0.3844	0.2855	0.0085	0.0039	0.0042	0.01	0.0201	0.0045	0.0114
θ^5	45.613	39.035	28.009	39.761	-12.93	-3.236	109.57	-102.6	-8.299	-150.1	-61.97	-65.1
$ V ^6$	0.9271	0.9152	0.4539	0.8402	0.5329	0.0151	0.0061	0.0016	0.0015	0.0065	0.0015	0.0039
θ^6	80.957	78.049	73.09	82.421	78.967	-9.04	84.544	92.646	-25.45	-159.3	-69.4	-70.76
$ V ^7$	0.751	0.7583	0.4165	0.3953	0.5201	0.0442	0.037	0.05	0.0321	0.0447	0.0156	0.0588
θ^7	51.864	43.66	30.245	25.374	-21.97	159.62	-96.94	-88.45	6.869	11.779	111.57	114.87
$ V ^8$	0.751	0.7583	0.4165	0.2741	0.2987	0.2357	0.1623	0.1854	0.1102	0.1718	0.0573	0.2078
θ^8	51.864	53.66	30.245	-57.23	-27.7	169.5	-93.89	-87.66	8.3377	13.074	111.93	115.01
$ V ^9$	0.8339	0.869	0.4878	0.6509	0.7597	0.0533	0.022	0.0131	0.0065	0.0046	0.0014	0.0039
θ^9	56.092	47.075	32.791	38.782	-20.43	6.1684	94.946	95.92	-171.4	-167.9	-67.15	-64.14
$ V ^10$	0.8367	0.8549	0.4623	0.6445	0.6055	0.0447	0.0183	0.0104	0.0049	0.0046	0.0013	0.0036
θ^{10}	59.875	51.332	37.535	45.86	-14.1	2.6555	91.717	93.341	-172.1	-168.3	-69.79	-67.3
$ V ^11$	0.8662	0.8596	0.435	0.7002	0.3888	0.0295	0.012	0.0059	0.0018	0.0053	0.0014	0.0036
θ^{11}	70.283	64.245	53.975	65.372	26.324	-1.613	88.602	91.942	-160.6	-164.2	-70.61	-70
$ V ^12$	1.9347	1.9578	1.0098	1.9852	1.6727	0.0161	0.0063	0.002	0.0009	0.0054	0.0013	0.0033
θ^{12}	87.03	88.535	88.513	94.159	97.802	-14.61	78.452	85.053	-39.67	-164.5	-73.93	-74.54
$ V ^13$	1.2305	1.2237	0.609	1.1487	0.7851	0.0179	0.0071	0.0026	0.0006	0.0052	0.0013	0.0032
θ^{13}	82.25	80.159	76.28	84.46	84.387	-13.43	78.893	84.734	-59.03	-165.3	-74.23	-76.56
$ V ^14$	1.024	1.008	0.506	0.7905	0.4476	0.033	0.0132	0.007	0.0029	0.0039	0.0011	0.0028
θ^{14}	65.26	58.32	46.996	57.331	14.754	-7.131	82.867	86.525	-174.7	-173.2	-76.2	-73.7

Tabla 4.36 Corriente Armónica del Horno de Arco (arco activo) [28]

Armónica	% de la corriente fundamental
2	7.7
3	5.8
4	2.5
5	4.1
7	3.1

La tabla 4.38 contiene las corrientes armónicas estimadas para este caso. Como se puede ver, los únicos nodos con corriente armónica son 8 y 12, por lo que se han detectado dos fuentes de armónicas en estos nodos.

Tabla 4.37 Mediciones para la estimación por el método de Heydt [15], sin error para el sistema de 14 nodos con dos fuentes de armónicas

Med/h	2	3	4	5	7	11	13	17	19	23	25	29
$ V ^2$	0.4577	0.412	0.2076	0.2858	0.2534	0.0098	0.0073	0.0087	0.0079	0.0045	0.0006	0.0011
θ^2	35.798	27.141	14.932	25.282	-29.56	-14.45	94.1	88.697	173.21	34.562	129	133.62
$ V ^3$	0.6936	0.5693	0.2606	0.3185	0.2499	0.0057	0.0031	0.0009	0.0043	0.0089	0.0011	0.0008
θ^3	13.254	0.7867	-14.13	-6.409	-61.62	-41.01	69.828	-159	-57.59	116.96	176.8	-47.69
$ V ^4$	0.6091	0.5596	0.2849	0.3719	0.3297	0.005	0.0016	0.009	0.0131	0.0131	0.0018	0.0009
θ^4	40.803	33.532	21.931	30.99	-22.56	12.539	170.85	-95.74	-6.294	-147.8	-56.88	84.02
$ V ^5$	0.5912	0.5433	0.2729	0.3844	0.2855	0.0085	0.0039	0.0042	0.01	0.0201	0.0045	0.0114
θ^5	45.613	39.035	28.009	39.761	-12.93	-3.236	109.57	-102.6	-8.299	-150.1	-61.97	-65.1
$ V ^6$	0.9271	0.9152	0.4539	0.8402	0.5329	0.0151	0.0061	0.0016	0.0015	0.0065	0.0015	0.0039
θ^6	80.957	78.049	73.09	82.421	78.967	-9.04	84.544	92.646	-25.45	-159.3	-69.4	-70.76
$ V ^7$	0.751	0.7583	0.4165	0.3953	0.5201	0.0442	0.037	0.05	0.0321	0.0447	0.0156	0.0588
θ^7	51.864	43.66	30.245	25.374	-21.97	159.62	-96.94	-88.45	6.869	11.779	111.57	114.87
$ V ^{10}$	0.8367	0.8549	0.4623	0.6445	0.6055	0.0447	0.0183	0.0104	0.0049	0.0046	0.0013	0.0036
θ^{10}	59.875	51.332	37.535	45.86	-14.1	2.6555	91.717	93.341	-172.1	-168.3	-69.79	-67.3
$ V ^{11}$	0.8662	0.8596	0.435	0.7002	0.3888	0.0295	0.012	0.0059	0.0018	0.0053	0.0014	0.0036
θ^{11}	70.283	64.245	53.975	65.372	26.324	-1.613	88.602	91.942	-160.6	-164.2	-70.61	-70
$ V ^{13}$	1.2305	1.2237	0.609	1.1487	0.7851	0.0179	0.0071	0.0026	0.0006	0.0052	0.0013	0.0032
θ^{13}	82.25	80.159	76.28	84.46	84.387	-13.43	78.893	84.734	-59.03	-165.3	-74.23	-76.56
$ V ^{14}$	1.024	1.008	0.506	0.7905	0.4476	0.033	0.0132	0.007	0.0029	0.0039	0.0011	0.0028
θ^{14}	65.26	58.32	46.996	57.331	14.754	-7.131	82.867	86.525	-174.7	-173.2	-76.2	-73.7
$ I ^2$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^4$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^5$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^6$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^7$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{10}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{10}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{11}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{11}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{12}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{12}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{13}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{13}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I ^{14}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{14}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

En las tablas 4.39 y 4.40 se muestran las comparaciones entre las corrientes que introducen las fuentes armónicas al sistema, contra las estimadas, mismas que son exactas.

La tabla 4.41 enlista los voltajes armónicos calculados con la expresión (3.8), empleando como corrientes armónicas las obtenidas por el estimador. Como se ve en esta tabla, los voltajes armónicos son exactos.

Tabla 4.38 Corrientes armónicas estimadas, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 14 nodos con dos fuentes armónicas

<i>Arm.</i>	<i>Nodo</i>	<i>Mag. de Corriente</i>	<i>Ang. de la Corriente</i>
2	1	0	-53.07695
	8	0	153.2088
	9	0	144.5416
	12	3.37811	28.28
3	1	0	-163.8678
	8	0	161.2047
	9	0	55.19055
	12	2.54455	28.28005
4	1	0	82.94823
	8	0	-55.52957
	9	0	136.0036
	12	1.09679	28.27997
5	1	0	121.9696
	8	0.51213	152.4301
	9	0	126.6467
	12	1.79874	28.28
7	1	0	59.32584
	8	0.18238	75.64007
	9	0	-82.18047
	12	1.36002	28.28
11	1	0	97.51796
	8	0.09922	81.76012
	9	0	68.8297
	12	0	97.79975
13	1	0	-62.66551
	8	0.05472	177.01
	9	0	-6.44789
	12	0	-170.6635
17	1	0	14.81686
	8	0.04523	177.37
	9	0	173.0838
	12	0	3.2976
19	1	0	-91.15543
	8	0.02335	-81.06
	9	0	-80.64646
	12	0	-8.02799
23	1	0	132.6577
	8	0.03137	-76.47002
	9	0	109.3095
	12	0	-65.53779
25	1	0	44.54401
	8	0.00948	22.05989
	9	0	-160.8848
	12	0	-156.1014
29	1	0	19.41068
	8	0.02918	25.06001
	9	0	23.03951
	12	0	5.02619

Tabla 4.39 Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 14 nodos

<i>Armónica</i>	<i>Mag. de Corrient estimada</i>	<i>Mag. de Corrient real</i>	<i>Error de la mag.</i>	<i>Ang. de Corrient estimada</i>	<i>Ang. de Corrient real</i>	<i>Error del Ang.</i>
5	0.51213	0.51213	0	152.4301	152.43	0.0001
7	0.18238	0.18238	0	75.64007	75.64	0.00007
11	0.0992	0.0992	0	81.76012	81.76	0.00012
13	0.05472	0.05471	0.00002	177.01	177.01	0
17	0.04523	0.04523	0	-177.37	-177.37	0
19	0.02335	0.02335	0	-81.06	-81.06	0
23	0.03137	0.03137	0	-76.47002	-76.47	0.00002
25	0.00948	0.00948	0	22.05989	22.06	0.00011
29	0.02918	0.02918	0	25.06001	25.06	0.00001

Tabla 4.40 Comparación de la corriente del Horno de arco contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 14 nodos

<i>Armónica</i>	<i>Mag. de Corrient estimada</i>	<i>Mag. de Corrient real</i>	<i>Error de la mag.</i>	<i>Ang. de Corrient estimada</i>	<i>Ang. de Corrient real</i>	<i>Error del Ang.</i>
2	3.37811	3.37811	0	28.28	28.28	0
3	2.54455	2.54455	0	28.28005	28.28	0.00005
4	1.09679	1.09679	0	28.27997	28.28	0.00003
5	1.79874	1.79874	0	28.28	28.28	0
7	1.36002	1.36002	0	28.28	28.28	0

La tabla 4.42 contiene la Distorsión Armónica Total del Voltaje en cada nodo, en ella se observa que no es posible identificar la ubicación de las fuentes armónicas empleando este criterio. Se ve que existen varios nodos que exceden el 1.5% del THD permitido por el Estándar IEEE 519-1992, pero debido a que se tienen dos fuentes armónicas, es necesario saber cuál de ellas excede este nivel, por ello es necesario realizar un estudio de flujos armónicos para cada fuente, para conocer que usuario debe ser sancionado.

El método propuesto por Heydt en [15] ha dado resultados exactos para los sistemas de 14; en el sistema de 5 nodos los resultados no fueron los esperados.

Tabla 4.41 Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Heydt[15] para el sistema de 14 nodos con dos fuentes armónicas

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
2	1	0.4119	0.4118	0.0001	39.54	39.54	0
	2	0.4577	0.4577	0	35.799	35.798	0.001
	3	0.6936	0.6936	0	13.254	13.254	0
	4	0.6091	0.6091	0	40.803	40.803	0
	5	0.5912	0.5912	0	45.613	45.613	0
	6	0.9271	0.9272	0.0001	80.957	80.957	0
	7	0.751	0.751	0	51.865	51.864	0.001
	8	0.751	0.751	0	51.865	51.864	0.001
	9	0.8339	0.8339	0	56.092	56.092	0
	10	0.8367	0.8367	0	59.875	59.875	0
	11	0.8662	0.8662	0	70.283	70.283	0
	12	1.9347	1.9347	0	87.03	87.03	0
	13	1.2305	1.2305	0	82.25	82.25	0
	14	1.0239	1.0239	0	65.26	65.26	0
3	1	0.376	0.376	0	30.984	30.984	0
	2	0.412	0.412	0	27.141	27.141	0
	3	0.5693	0.5693	0	0.7869	0.7867	0.0002
	4	0.5596	0.5596	0	33.532	33.532	0
	5	0.5433	0.5433	0	39.035	39.035	0
	6	0.9152	0.9152	0	78.049	78.049	0
	7	0.7583	0.7583	0	43.66	43.66	0
	8	0.7583	0.7583	0	43.66	43.66	0
	9	0.869	0.869	0	47.076	47.075	0.001
	10	0.8549	0.8549	0	51.333	51.331	0.002
	11	0.8596	0.86	0.004	64.245	64.245	0
	12	1.9578	1.9578	0	88.535	88.535	0
	13	1.2237	1.2237	0	80.159	80.159	0
	14	1.0084	1.0084	0	58.32	58.32	0
4	1	0.1918	0.1918	0	18.825	18.825	0
	2	0.2076	0.2076	0	14.932	14.932	0
	3	0.2606	0.2606	0	-14.13	-14.13	0
	4	0.2849	0.2849	0	21.931	21.931	0
	5	0.2729	0.2729	0	28.009	29.009	0
	6	0.4539	0.4539	0	73.09	73.09	0
	7	0.4165	0.4165	0	30.245	30.245	0
	8	0.4165	0.4165	0	30.245	30.245	0
	9	0.4877	0.4877	0	32.791	32.791	0
	10	0.4623	0.4623	0	37.535	37.535	0
	11	0.435	0.435	0	53.975	53.975	0
	12	1.0098	1.0098	0	88.413	88.413	0
	13	0.609	0.609	0	76.279	76.279	0
	14	0.5058	0.5058	0	46.996	46.996	0

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
5	1	0.2704	0.2704	0	29.429	29.429	0
	2	0.2858	0.2858	0	25.282	25.282	0
	3	0.3185	0.3185	0	-6.4085	-6.409	0.0005
	4	0.3719	0.3719	0	30.99	30.989	0.001
	5	0.3844	0.3844	0	39.761	39.761	0
	6	0.8402	0.8402	0	82.421	84.421	0
	7	0.3953	0.3953	0	25.374	25.374	0
	8	0.2741	0.2741	0	-57.23	-57.23	0
	9	0.6509	0.6509	0	38.752	38.752	0
	10	0.6445	0.6445	0	45.86	45.86	0
	11	0.7002	0.7002	0	65.372	65.372	0
	12	1.9852	1.9852	0	94.159	94.159	0
	13	1.1487	1.1487	0	84.46	84.46	0
	14	0.7905	0.7905	0	57.331	57.331	0
7	1	0.2414	0.2414	0	-25.6	-25.6	0
	2	0.2534	0.2534	0	-29.56	-29.56	0
	3	0.2499	0.2499	0	-61.62	-61.62	0
	4	0.3297	0.3297	0	-22.56	-22.56	0
	5	0.2855	0.2855	0	-12.93	-12.93	0
	6	0.5329	0.5329	0	78.967	78.967	0
	7	0.5201	0.5201	0	-21.97	-21.97	0
	8	0.2987	0.2987	0	-27.69	-27.69	0
	9	0.7597	0.7597	0	-20.43	-20.432	0.002
	10	0.6055	0.6055	0	-14.1	-14.1	0
	11	0.3888	0.3888	0	26.324	26.324	0
	12	1.6727	1.6727	0	97.802	97.802	0
	13	0.7851	0.7851	0	84.387	84.387	0
	14	0.4476	0.4476	0	14.754	14.754	0
11	1	0.0106	0.0106	0	-12.53	-12.54	0.01
	2	0.0098	0.0098	0	-14.45	-14.45	0
	3	0.0057	0.0057	0	-41	-41.01	0.01
	4	0.005	0.005	0	12.452	12.539	0.087
	5	0.0085	0.0085	0	-3.234	-3.236	0.002
	6	0.0151	0.0151	0	-9.04	-9.04	0
	7	0.0442	0.0442	0	159.62	159.62	0
	8	0.2357	0.2357	0	169.5	169.5	0
	9	0.0533	0.0533	0	6.1684	6.1684	0
	10	0.0447	0.0447	0	2.6554	2.6555	0.0001
	11	0.0295	0.0295	0	-1.613	-1.613	0
	12	0.0161	0.0161	0	-14.46	-14.46	0
	13	0.0179	0.0179	0	-13.43	-13.43	0
	14	0.033	0.033	0	-7.131	-7.131	0

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
13	1	0.0084	0.0084	0	95.644	95.643	0.001
	2	0.0073	0.0073	0	94.102	94.1	0.002
	3	0.0031	0.0031	0	69.826	69.828	0.002
	4	0.0016	0.0016	0	170.86	170.85	0.01
	5	0.0039	0.0039	0	109.57	109.57	0
	6	0.0061	0.0061	0	84.544	84.544	0
	7	0.037	0.037	0	-96.94	-96.94	0
	8	0.1623	0.1623	0	-93.89	-93.89	0
	9	0.022	0.022	0	94.946	94.946	0
	10	0.0183	0.0183	0	91.717	91.717	0
	11	0.012	0.012	0	88.602	88.602	0
	12	0.0063	0.0063	0	78.452	78.452	0
	13	0.0071	0.0071	0	78.894	78.893	0.001
	14	0.0132	0.0132	0	82.867	82.867	0
17	1	0.0121	0.0121	0	89.375	89.375	0
	2	0.0087	0.0087	0	88.697	88.697	0
	3	0.0009	0.0009	0	-159	-159	0
	4	0.009	0.009	0	-95.74	-95.74	0
	5	0.0042	0.0042	0	-102.6	-102.6	0
	6	0.0016	0.0016	0	92.646	92.646	0
	7	0.05	0.05	0	-88.45	-88.45	0
	8	0.1854	0.1854	0	-87.66	-87.66	0
	9	0.0131	0.0131	0	95.92	95.92	0
	10	0.0104	0.0104	0	93.341	93.341	0
	11	0.0059	0.0059	0	91.452	91.942	0.49
	12	0.002	0.002	0	85.053	85.053	0
	13	0.0026	0.0026	0	84.734	84.734	0
	14	0.007	0.007	0	86.525	86.525	0
19	1	0.0127	0.0127	0	172.22	172.22	0
	2	0.0079	0.0079	0	173.21	173.21	0
	3	0.0043	0.0043	0	-57.59	-57.59	0
	4	0.0131	0.0131	0	-6.296	-6.294	0
	5	0.01	0.01	0	-8.301	-8.299	0.002
	6	0.0015	0.0015	0	-25.46	-25.45	0.01
	7	0.0321	0.0321	0	6.8692	6.8693	0.0001
	8	0.1102	0.1102	0	8.3376	8.3377	0.0001
	9	0.0065	0.0065	0	-171.4	-171.4	0
	10	0.0049	0.0049	0	-172.06	-172.06	0
	11	0.0018	0.0018	0	-160.6	-160.6	0
	12	0.0009	0.0009	0	-39.69	-39.67	0
	13	0.0006	0.0006	0	-59.05	-59.03	0
	14	0.0029	0.0029	0	-174.7	-174.7	0

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
23	1	0.0099	0.0099	0	17.69	17.688	0.002
	2	0.0045	0.0045	0	34.566	34.562	0.004
	3	0.0089	0.0089	0	116.95	117	0.05
	4	0.0131	0.0131	0	-147.8	-147.8	0
	5	0.0201	0.0201	0	-150	-150.1	0.1
	6	0.0065	0.0065	0	-159.3	-159.3	0
	7	0.0447	0.0447	0	11.779	11.779	0
	8	0.1718	0.1718	0	13.074	13.074	0
	9	0.0046	0.0046	0	-167.9	-167.9	0
	10	0.0046	0.0046	0	-168.3	-168.3	0
	11	0.0053	0.0053	0	-164.2	-164.2	0
	12	0.0054	0.0054	0	-164.5	-164.5	0
	13	0.0052	0.0052	0	-165.2	-165.3	0.1
	14	0.0039	0.0039	0	-173.2	-173.2	0
25	1	0.0015	0.0015	0	108.51	108.51	0
	2	0.0006	0.0006	0	129	129	0
	3	0.0011	0.0011	0	176.78	176.8	0.02
	4	0.0018	0.0018	0	-56.87	-56.88	0.01
	5	0.0045	0.0045	0	-67.97	-61.97	0
	6	0.0015	0.0015	0	-69.4	-69.4	0
	7	0.0156	0.0156	0	111.57	111.57	0
	8	0.0573	0.0573	0	111.93	111.93	0
	9	0.0014	0.0014	0	-67.15	-67.15	0
	10	0.0013	0.0013	0	-69.79	-69.79	0
	11	0.0014	0.0014	0	-70.61	-70.61	0
	12	0.0013	0.0013	0	-73.93	-73.93	0
	13	0.0013	0.0013	0	-74.23	-74.23	0
	14	0.0011	0.0011	0	-76.2	-76.2	0
29	1	0.002	0.002	0	106.63	106.63	0
	2	0.0011	0.0011	0	133.62	133.62	0
	3	0.0008	0.0008	0	-47.66	-47.69	0.03
	4	0.0009	0.0009	0	84.007	84.02	0.013
	5	0.0114	0.0114	0	-65.1	-65.1	0
	6	0.0039	0.0039	0	-70.76	-70.76	0
	7	0.0588	0.0588	0	114.87	114.87	0
	8	0.2078	0.2078	0	115.01	115.01	0
	9	0.0039	0.0039	0	-64.14	-64.14	0
	10	0.0036	0.0036	0	-67.3	-67.3	0
	11	0.0036	0.0036	0	-70.01	-70.01	0
	12	0.0033	0.0033	0	-74.54	-74.54	0
	13	0.0032	0.0032	0	-74.56	-74.56	0
	14	0.0028	0.0028	0	-73.7	-73.7	0

Tabla 4.42 THD de los voltajes, sin error en las mediciones, por el método de Heydt [15] para el sistema de 14 nodos

<i>Nod</i>	<i>%THD</i>
1	0.653428
2	0.721559
3	0.976646
4	0.978786
5	0.942435
6	1.589701
7	1.298473
8	1.270063
9	1.617204
10	1.53281
11	1.465729
12	3.719565
13	2.205231
14	1.747272

4.3.2 ESTIMACIÓN DE UN SISTEMA DE 14 NODOS CON DOS FUENTES DE ARMÓNICAS SIN ERROR EN MEDICIONES POR EL MÉTODO DE NGUYEN [19]

Al igual que en el caso anterior, se realizó la estimación de estado por el método de Nguyen [19] al sistema de 14 nodos de la figura 4.2 para identificar las fuentes de armónicas en este. Para ello se tomaron en cuenta las mediciones sin error mostradas en la tabla 4.43.

En la tabla 4.44 se encuentran las corrientes armónicas obtenidas por el estimador propuesto en [19], donde se puede ver que se han identificado dos fuentes de armónicas en los nodos 8 y 12.

Las tablas 4.45 y 4.46 muestran la comparación entre las corrientes reales y las estimadas. Como se observa en estas tablas, las corrientes armónicas calculadas son exactas.

Tabla 4.43 Mediciones para la estimación por el método de Nguyen [19], sin error para el sistema de 14 nodos con dos fuentes de armónicas

Med\h	2	3	4	5	7	11	13	17	19	23	25	29
$ V _1^1$	0.4119	0.376	0.1918	0.2704	0.2414	0.0106	0.0084	0.0121	0.0127	0.0099	0.0015	0.002
Θ^1	39.54	30.984	18.825	29.429	-25.6	-12.54	95.643	89.375	172.22	17.688	105.51	106.63
$ V _3^3$	0.6936	0.5693	0.2606	0.3185	0.2499	0.0057	0.0031	0.0009	0.0043	0.0089	0.0011	0.0008
Θ^3	13.254	0.7867	-14.13	-6.409	-61.62	-41.01	69.828	-159	-57.59	116.96	176.8	-47.69
$ V _5^5$	0.5912	0.5433	0.2729	0.3844	0.2855	0.0085	0.0039	0.0042	0.01	0.0201	0.0045	0.0114
Θ^5	45.613	39.035	28.009	39.761	-12.93	-3.236	109.57	-102.6	-8.299	-150.1	-61.97	-65.1
$ V _7^7$	0.751	0.7583	0.4165	0.3953	0.5201	0.0442	0.037	0.05	0.0321	0.0447	0.0156	0.0588
Θ^7	51.864	43.66	30.245	25.374	-21.97	159.62	-96.94	-88.45	6.869	11.779	111.57	114.87
$ V _8^8$	0.751	0.7583	0.4165	0.2741	0.2987	0.2357	0.1623	0.1854	0.1102	0.1718	0.0573	0.2078
Θ^8	51.864	53.66	30.245	-57.23	-27.7	169.5	-93.89	-87.66	8.3377	13.074	111.93	115.01
$ V _{10}^{10}$	0.8367	0.8549	0.4623	0.6445	0.6055	0.0447	0.0183	0.0104	0.0049	0.0046	0.0013	0.0036
Θ^{10}	59.875	51.332	37.535	45.86	-14.1	2.6555	91.717	93.341	-172.1	-168.3	-69.79	-67.3
$ V _{11}^{11}$	0.8662	0.8596	0.435	0.7002	0.3888	0.0295	0.012	0.0059	0.0018	0.0053	0.0014	0.0036
Θ^{11}	70.283	64.245	53.975	65.372	26.324	-1.613	88.602	91.942	-160.6	-164.2	-70.61	-70
$ V _{12}^{12}$	1.9347	1.9578	1.0098	1.9852	1.6727	0.0161	0.0063	0.002	0.0009	0.0054	0.0013	0.0033
Θ^{12}	87.03	88.535	88.513	94.159	97.802	-14.61	78.452	85.053	-39.67	-164.5	-73.93	-74.54
$ V _{13}^{13}$	1.2305	1.2237	0.609	1.1487	0.7851	0.0179	0.0071	0.0026	0.0006	0.0052	0.0013	0.0032
Θ^{13}	82.25	80.159	76.28	84.46	84.387	-13.43	78.893	84.734	-59.03	-165.3	-74.23	-76.56
$ V _{14}^{14}$	1.024	1.008	0.506	0.7905	0.4476	0.033	0.0132	0.007	0.0029	0.0039	0.0011	0.0028
Θ^{14}	65.26	58.32	46.996	57.331	14.754	-7.131	82.867	86.525	-174.7	-173.2	-76.2	-73.7
$ I _2^2$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I _3^3$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I _4^4$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I _5^5$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I _6^6$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I _9^9$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I _{10}^{10}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{10}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I _{11}^{11}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{11}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I _{13}^{13}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{13}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
$ I _{14}^{14}$	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α^{14}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

La tabla 4.47 contiene los voltajes armónicos; los voltajes sombreados se obtuvieron aplicando el estimador, mientras que los demás se obtuvieron con la expresión (3.8). Como se ve en la tabla, los voltajes armónicos estimados y los calculados con (3.8) son exactos.

Tabla 4.44 Corrientes armónicas estimadas, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos con dos fuentes armónicas

<i>Arm.</i>	<i>Nodo</i>	<i>Mag. de Corriente</i>	<i>Ang. de la Corriente</i>
2	1	0.00001	-87.9786
	7	0	-112.5726
	8	0	0
	12	3.37811	28.27998
3	1	0	-130.2574
	7	0	-127.4945
	8	0	0
	12	2.54455	28.27993
4	1	0	-134.6049
	7	0	-102.6856
	8	0	0
	12	1.09679	28.28
5	1	0	-168.2737
	7	0	-129.7366
	8	0.51213	152.43
	12	1.79874	28.28
7	1	0	154.8379
	7	0	147.9766
	8	0.18238	75.63998
	12	1.36002	28.28001
11	1	0	86.06593
	7	0	100.9264
	8	0.09922	81.75999
	12	0	83.85068
13	1	0	-156.0296
	7	0	-178.6801
	8	0.05472	177.01
	12	0	-5.69008
17	1	0	97.31136
	7	0	7.21787
	8	0.04523	-177.37
	12	0	0.41832
19	1	0	-143.8517
	7	0	114.4134
	8	0.02335	-81.06001
	12	0	175.7535
23	1	0	-32.18983
	7	0	92.8583
	8	0.03137	-76.47
	12	0	107.9731
25	1	0	48.64992
	7	0	-152.0384
	8	0.00948	22.06002
	12	0	-148.0714
29	1	0	-153.1165
	7	0	15.02114
	8	0.02918	25.06006
	12	0	-163.6525

Tabla 4.45 Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos

<i>Armónica</i>	<i>Mag. de Corrient estimada</i>	<i>Mag. de Corrient real</i>	<i>Error de la mag.</i>	<i>Ang. de Corrient estimada</i>	<i>Ang. de Corrient real</i>	<i>Error del Ang.</i>
5	0.51213	0.51213	0	152.43	152.43	0
7	0.18238	0.18238	0	75.63998	75.64	0.00002
11	0.09922	0.0992	0.00002	81.75999	81.76	0.00001
13	0.05472	0.05471	0.00001	177.01	177.01	0
17	0.04523	0.04523	0	-177.37	-177.37	0
19	0.02335	0.02335	0	-81.06001	-81.06	0.00001
23	0.03137	0.03137	0	-76.47	-76.47	0
25	0.00948	0.00948	0	22.06002	22.06	0.00002
29	0.02918	0.02918	0	25.06006	25.06	0.00006

Tabla 4.46 Comparación de la corriente del Horno de arco contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos

<i>Armónica</i>	<i>Mag. de Corrient estimada</i>	<i>Mag. de Corrient real</i>	<i>Error de la mag.</i>	<i>Ang. de Corrient estimada</i>	<i>Ang. de Corrient real</i>	<i>Error del Ang.</i>
2	3.37811	3.37811	0	28.27998	28.28	0.00002
3	2.54455	2.54455	0	28.27993	28.28	0.00007
4	1.09679	1.09679	0	28.28	28.28	0
5	1.79873	1.79874	0.00001	28.28	28.28	0
7	1.36002	1.36002	0	28.28001	28.28	0.00001

La tabla 4.48 muestra la Distorsión Armónica Total de cada nodo del sistema. Se nota que varios nodos rebasan el 1.5% de Distorsión Armónica Total permitida por el Estándar IEEE 519-1992, pero este valor esta dado por ambas fuentes armónicas, por lo que es necesario realizar un estudio de flujos armónicos para cada fuente, y si es el caso identificar que fuente merece ser penalizada.

El método propuesto por Nguyen en [19] fue más confiable durante todas las pruebas, el único problema que se presentó es que al realizar la estimación para el sistema de 14 nodos, la matriz de mediciones se volvía singular, por lo que se acomodaron las mediciones de forma que se tuviera mas redundancia estadística y así se pudiera realizar la estimación.

Tabla 4.47 Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos con dos fuentes armónicas

Arm	Nod	Mag. Volt. estim.	Mag. Volt. flujos	Error de la Mag.	Ang. volt estim.	Ang. Volt. Flujos	Error del ang.
2	1	0.4119	0.4118	0.0001	39.538	39.54	0.002
	2	0.4577	0.4577	0	35.799	35.798	0.001
	3	0.6936	0.6936	0	13.252	13.254	0.002
	4	0.6091	0.6091	0	40.803	40.803	0
	5	0.5912	0.5912	0	45.611	45.613	0.002
	6	0.9271	0.9272	0.0001	80.957	80.957	0
	7	0.751	0.751	0	51.863	51.864	0.001
	8	0.751	0.751	0	51.863	51.864	0.001
	9	0.8339	0.8339	0	56.091	56.092	0.001
	10	0.8367	0.8367	0	59.874	59.875	0.001
	11	0.8662	0.8662	0	70.283	70.283	0
	12	1.9347	1.9347	0	87.029	87.03	0.001
	13	1.2305	1.2305	0	82.25	82.25	0
	14	1.0239	1.0239	0	65.26	65.26	0
3	1	0.376	0.376	0	30.982	30.984	0.002
	2	0.412	0.412	0	27.141	27.141	0
	3	0.5693	0.5693	0	0.7852	0.7867	0.0015
	4	0.5596	0.5596	0	33.532	33.532	0
	5	0.5432	0.5433	0.0001	39.034	39.035	0.001
	6	0.9152	0.9152	0	78.049	78.049	0
	7	0.7583	0.7583	0	43.659	43.66	0.001
	8	0.7583	0.7583	0	46.659	43.66	0.001
	9	0.869	0.869	0	47.075	47.075	0
	10	0.8549	0.8549	0	51.332	51.331	0.001
	11	0.8596	0.86	0.0004	64.245	64.245	0
	12	1.9578	1.9578	0	88.535	88.535	0
	13	1.2237	1.2237	0	80.159	80.159	0
	14	1.0084	1.0084	0	58.319	58.32	0.001
4	1	0.1918	0.1918	0	18.823	18.825	0.002
	2	0.2076	0.2076	0	14.933	14.932	0.001
	3	0.2606	0.2606	0	-14.13	-14.13	0
	4	0.2849	0.2849	0	21.931	21.931	0
	5	0.2729	0.2729	0	28.008	28.009	0.001
	6	0.4539	0.4539	0	73.09	73.09	0
	7	0.4164	0.4165	0.0001	30.244	30.245	0.001
	8	0.4164	0.4165	0.0001	30.244	30.245	0.001
	9	0.4877	0.4877	0	32.791	32.791	0
	10	0.4623	0.4623	0	37.535	37.535	0
	11	0.435	0.435	0	53.975	53.975	0
	12	1.0098	1.0098	0	88.413	88.413	0
	13	0.6089	0.609	0.0001	76.28	76.279	0.001
	14	0.5058	0.5058	0	46.996	46.996	0

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
5	1	0.2704	0.2704	0	29.428	29.429	0.001
	2	0.2858	0.2858	0	25.282	25.282	0
	3	0.3185	0.3185	0	-6.409	-6.409	0
	4	0.3719	0.3719	0	30.989	30.989	0
	5	0.3843	0.3844	0.0001	39.76	39.761	0.001
	6	0.8402	0.8402	0	82.421	82.421	0
	7	0.3952	0.3953	0.0001	25.374	25.374	0
	8	0.2741	0.2741	0	-57.23	-57.23	0
	9	0.6509	0.6509	0	38.752	38.752	0
	10	0.6445	0.6445	0	45.86	45.86	0
	11	0.7002	0.7002	0	65.373	65.372	0.001
	12	1.9852	1.9852	0	97.159	94.159	0
	13	1.1487	1.1487	0	84.46	84.46	0
	14	0.7905	0.7905	0	57.332	57.331	0.001
7	1	0.2414	0.2414	0	-25.6	-25.6	0
	2	0.2534	0.2534	0	-29.56	-29.56	0
	3	0.2499	0.2499	0	-61.62	-61.62	0
	4	0.3297	0.3297	0	-22.56	-22.56	0
	5	0.2855	0.2855	0	-12.93	-12.93	0
	6	0.5329	0.5329	0	78.967	78.967	0
	7	0.5201	0.5201	0	-21.97	-21.97	0
	8	0.2987	0.2987	0	-27.69	-27.69	0
	9	0.7597	0.7597	0	-20.43	-20.43	0
	10	0.6055	0.6055	0	-14.1	-14.1	0
	11	0.3888	0.3888	0	26.325	26.324	0.001
	12	1.6727	1.6727	0	97.802	97.802	0
	13	0.7851	0.7851	0	84.387	84.387	0
	14	0.4476	0.4476	0	14.755	14.754	0.001
11	1	0.0106	0.0106	0	-12.53	-12.54	0.01
	2	0.0098	0.0098	0	-14.45	-14.45	0
	3	0.0057	0.0057	0	-41	-41.01	0.01
	4	0.005	0.0050	0	12.539	12.539	0
	5	0.0085	0.0085	0	-3.229	-3.236	0.007
	6	0.0151	0.0151	0	-9.04	-9.04	0
	7	0.0442	0.0442	0	159.62	159.62	0
	8	0.2357	0.2357	0	169.5	169.5	0
	9	0.0533	0.0533	0	6.1684	6.1684	0
	10	0.0447	0.0447	0	2.6551	2.6555	0.0004
	11	0.0295	0.0295	0	-1.612	-1.613	0.001
	12	0.0161	0.0161	0	-14.46	-14.46	0
	13	0.0179	0.0179	0	-13.43	-13.43	0
	14	0.033	0.033	0	-7.132	-7.131	0.001

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
13	1	0.0084	0.0084	0	95.645	95.643	0.002
	2	0.0073	0.0073	0	94.1	94.1	0
	3	0.0031	0.0031	0	69.831	69.828	0.003
	4	0.0016	0.0016	0	170.85	170.85	0
	5	0.0039	0.0039	0	109.57	109.57	0
	6	0.0061	0.0061	0	84.544	84.544	0
	7	0.037	0.037	0	-96.94	-96.94	0
	8	0.1623	0.1623	0	-93.89	-93.89	0
	9	0.022	0.022	0	94.946	94.946	0
	10	0.0183	0.0183	0	91.917	91.717	0
	11	0.012	0.012	0	88.602	88.602	0
	12	0.0063	0.0063	0	78.452	78.452	0
	13	0.0071	0.0071	0	78.894	78.893	0.001
	14	0.0132	0.0132	0	82.867	82.867	0
17	1	0.0121	0.0121	0	89.375	89.375	0
	2	0.0087	0.0087	0	88.696	88.697	0.001
	3	0.0009	0.0009	0	-159	-159	0
	4	0.009	0.009	0	-95.74	-95.74	0
	5	0.0042	0.0042	0	-102.6	-102.6	0
	6	0.0016	0.0016	0	92.646	92.646	0
	7	0.05	0.05	0	-88.45	-88.45	0
	8	0.1854	0.1854	0	-87.66	-87.66	0
	9	0.0131	0.0131	0	95.92	95.92	0
	10	0.0104	0.0104	0	93.341	93.341	0
	11	0.0059	0.0059	0	91.942	91.942	0
	12	0.002	0.002	0	85.053	85.053	0
	13	0.0026	0.0026	0	84.734	84.734	0
	14	0.007	0.007	0	86.525	86.525	0
19	1	0.0127	0.0127	0	172.22	172.22	0
	2	0.0079	0.0079	0	173.21	173.21	0
	3	0.0043	0.0043	0	-57.59	-57.59	0
	4	0.0131	0.0131	0	-6.294	-6.294	0
	5	0.01	0.01	0	-8.298	-8.299	0.001
	6	0.0015	0.0015	0	-25.45	-25.45	0
	7	0.0321	0.0321	0	6.8694	6.8693	0.0001
	8	0.1102	0.1102	0	8.3377	8.3377	0
	9	0.0065	0.0065	0	-171.4	-171.4	0
	10	0.0049	0.0049	0	-172.1	-172.1	0
	11	0.0018	0.0018	0	-160.6	-160.6	0
	12	0.0009	0.0009	0	-39.66	-39.67	0.01
	13	0.0006	0.0006	0	-59.032	-59.032	0
	14	0.0029	0.0029	0	-174.7	-174.7	0

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
23	1	0.0099	0.0099	0	17.69	17.688	0.002
	2	0.0045	0.0045	0	34.561	34.562	0.001
	3	0.0089	0.0089	0	116.96	117	0.04
	4	0.0131	0.0131	0	-147.8	-147.8	0
	5	0.0201	0.0201	0	-150	-150.1	0.1
	6	0.0065	0.0065	0	-159.3	-159.3	0
	7	0.0447	0.0447	0	11.778	11.779	0.001
	8	0.1718	0.1718	0	13.074	13.074	0
	9	0.0046	0.0046	0	-167.9	-167.9	0
	10	0.0046	0.0046	0	-168.3	-168.3	0
	11	0.0053	0.0053	0	-164.2	-164.2	0
	12	0.0054	0.0054	0	-164.5	-164.5	0
	13	0.0052	0.0052	0	-165.2	-165.3	0.1
	14	0.0039	0.0039	0	-173.2	-173.2	0
25	1	0.0015	0.0015	0	108.51	108.51	0
	2	0.0006	0.0006	0	129	129	0
	3	0.001	0.0011	0.0001	176.8	176.8	0
	4	0.0018	0.0018	0	-56.88	-56.88	0
	5	0.0045	0.0045	0	-61.97	-61.97	0
	6	0.0015	0.0015	0	-69.4	-69.4	0
	7	0.0156	0.0156	0	111.57	111.57	0
	8	0.0573	0.0573	0	111.93	111.93	0
	9	0.0014	0.0014	0	-67.15	-67.15	0
	10	0.0013	0.0013	0	-69.79	-69.79	0
	11	0.0014	0.0014	0	-70.61	-70.61	0
	12	0.0013	0.0013	0	-73.93	-73.93	0
	13	0.0013	0.0013	0	-74.23	-74.23	0
	14	0.0011	0.0011	0	-76.2	-76.2	0
29	1	0.002	0.002	0	106.64	106.63	0.01
	2	0.0011	0.0011	0	133.62	133.62	0
	3	0.0008	0.0008	0	-47.69	-47.69	0
	4	0.0009	0.0009	0	84.01	84.02	0.01
	5	0.0114	0.0114	0	-65.1	-65.1	0
	6	0.0039	0.0039	0	-70.76	-70.76	0
	7	0.0588	0.0588	0	114.87	114.87	0
	8	0.2078	0.2078	0	115.01	115.01	0
	9	0.0039	0.0039	0	-64.14	-64.14	0
	10	0.0036	0.0036	0	-67.3	-67.3	0
	11	0.0036	0.0036	0	-70.01	-70.01	0
	12	0.0033	0.0033	0	-74.54	-74.54	0
	13	0.0032	0.0032	0	-74.56	-74.56	0
	14	0.0028	0.0028	0	-73.7	-73.7	0

Tabla 4.48 THD de los voltajes, sin error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos

<i>Nod</i>	<i>%THD</i>
1	0.653421
2	0.721551
3	0.976636
4	0.978774
5	0.942425
6	1.589686
7	1.298453
8	1.270049
9	1.61718
10	1.532787
11	1.46571
12	3.719549
13	2.205214
14	1.747248

4.3.3 ESTIMACIÓN DE UN SISTEMA DE 14 NODOS CON DOS FUENTES DE ARMÓNICAS CON ERROR EN MEDICIONES POR EL MÉTODO DE NGUYEN [19]

Se realizó la prueba al sistema de 14 nodos de la figura 4.2, pero ahora, con error en las mediciones. Las fuentes de armónicas se encuentran, como en los casos anteriores, en los nodos 8 y 12, así que se probará si el estimador identifica correctamente la ubicación de las fuentes de armónicas. La tabla 4.49 muestra las mediciones con error que se emplearon para llevar a cabo la estimación. Las mediciones tienen un error del $\pm 5\%$ según el Estándar IEEE 519-1992, y están representadas por números aleatorios con una distribución uniforme.

La tabla 4.50 contiene las corrientes armónicas estimadas con el método de Nguyen [19]. Como se puede observar, es difícil identificar en que nodo se encuentran las fuentes armónicas, ya que los nodos donde no se tienen conectadas dan un valor alto y diferente a cero, esto sucedió en los casos anteriores al afectar las mediciones con un error, las explicaciones son que ambos métodos de estimación son deterministas, además de que el error permitido en el Estándar IEEE 519-1992 para medidores de armónicas es muy grande.

Tabla 4.49 Mediciones para la estimación por el método de Nguyen [19], con error para el sistema de 14 nodos con dos fuentes de armónicas

Med\h	2	3	4	5	7	11	13	17	19	23	25	29
V ¹	0.4324	0.3914	0.1957	0.2586	0.2388	0.011	0.0083	0.0121	0.0122	0.0096	0.0016	0.0021
∅ ¹	39.54	30.984	18.825	29.429	-25.6	-12.54	95.643	89.375	172.22	17.688	108.51	106.63
V ³	0.7224	0.5658	0.2625	0.3212	0.2516	0.0059	0.0032	0.0009	0.0041	0.0088	0.0011	0.0008
∅ ³	13.254	0.7867	-14.13	-6.409	-61.62	-41.01	69.828	-159	-57.59	116.96	176.8	-47.69
V ⁵	0.5852	0.5388	0.262	0.3917	0.2827	0.0084	0.0038	0.0041	0.0104	0.0193	0.0047	0.0117
∅ ⁵	45.613	39.035	28.009	39.761	-12.93	-3.236	109.57	-102.6	-8.299	-150.1	-61.97	-65.1
V ⁷	0.7216	0.7348	0.4101	0.3947	0.5021	0.0439	0.0376	0.0491	0.0309	0.0458	0.0149	0.0583
∅ ⁷	51.864	43.66	30.245	25.374	-21.97	159.62	-96.94	-88.45	6.8693	11.779	111.57	114.87
V ⁸	0.7189	0.7514	0.4	0.277	0.2989	0.23	0.163	0.1929	0.1088	0.177	0.0571	0.2158
∅ ⁸	51.864	43.66	30.245	-57.23	-27.69	169.5	-93.89	-87.66	8.3377	13.074	111.93	115.01
V ¹⁰	0.8627	0.8539	0.441	0.6258	0.5889	0.0455	0.0191	0.0109	0.0048	0.0047	0.0014	0.0035
∅ ¹⁰	59.875	51.332	37.535	45.86	-14.1	2.6555	91.717	93.341	-172.1	-168.3	-69.79	-67.3
V ¹¹	0.8649	0.8272	0.4496	0.687	0.4054	0.0297	0.0125	0.0057	0.0018	0.0054	0.0014	0.0037
∅ ¹¹	70.283	64.245	53.975	65.372	26.324	-1.613	88.602	91.942	-160.6	-164.2	-70.61	-70.01
V ¹²	1.9544	1.8609	0.9736	1.9764	1.7242	0.0162	0.0065	0.0021	0.0009	0.0056	0.0013	0.0032
∅ ¹²	87.03	88.535	88.413	94.159	97.802	-14.46	78.452	85.053	-39.67	-164.5	-73.93	-74.54
V ¹³	1.26	1.196	0.5842	1.1381	0.8068	0.0172	0.0071	0.0026	0.0007	0.0051	0.0013	0.0033
∅ ¹³	82.25	80.159	76.28	84.46	84.387	-13.43	78.893	84.734	-59.03	-165.3	-74.23	-74.56
V ¹⁴	0.999	0.9614	0.5162	0.8226	0.435	0.0313	0.0138	0.0072	0.003	0.0039	0.0011	0.0028
∅ ¹⁴	65.26	58.32	46.996	57.331	14.754	-7.131	82.867	86.625	-174.7	-173.2	-76.2	-73.7
I ²	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α ²	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
I ³	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α ³	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
I ⁴	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α ⁴	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
I ⁵	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α ⁵	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
I ⁶	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α ⁶	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
I ⁹	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α ⁹	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
I ¹⁰	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α ¹⁰	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
I ¹¹	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α ¹¹	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
I ¹²	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α ¹²	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
I ¹³	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α ¹³	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
I ¹⁴	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
α ¹⁴	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Las tablas 4.51 y 4.52 muestran la comparación entre la corriente real inyectada por las fuentes armónicas y la estimada. Como se observa en las tablas, los resultados varían, esto es debido al error introducido por las mediciones. A pesar de ello los resultados son aceptables.

Tabla 4.50 Corrientes armónicas estimadas, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos con dos fuentes armónicas

<i>Arm.</i>	<i>Nodo</i>	<i>Mag. de Corriente</i>	<i>Ang. de la Corriente</i>
2	1	0.18426	-38.2265
	7	0.19013	144.8927
	8	0.01627	141.8642
	12	3.36966	28.29013
3	1	0.10753	-55.17715
	7	0.09444	135.2069
	8	0.03123	-46.34021
	12	2.35043	28.96169
4	1	0.04395	-61.9347
	7	0.04155	-57.05555
	8	0.01469	120.2445
	12	1.05803	28.40261
5	1	0.05757	125.325
	7	0.00397	-25.11005
	8	0.51322	152.7907
	12	1.79866	28.191
7	1	0.00342	25.71728
	7	0.0178	47.12143
	8	0.1678	76.31239
	12	1.40414	28.27677
11	1	0.00048	-94.15639
	7	0.00296	83.32912
	8	0.09648	81.80564
	12	0.00055	-98.3016
13	1	0.00002	90.01597
	7	0.00114	173.9028
	8	0.05476	177.0241
	12	0.0001	-4.50825
17	1	0.00002	19.67667
	7	0.00366	2.49711
	8	0.04804	-177.3918
	12	0	135.9539
19	1	0.00045	74.7243
	7	0.00097	96.22167
	8	0.0233	-71.08115
	12	0.00002	63.02454
23	1	0.00067	-64.20497
	7	0.00053	109.1197
	8	0.0324	-76.4744
	12	0.00012	111.1899
25	1	0.00015	-156.7841
	7	0.00048	-158.6062
	8	0.00959	22.05263
	12	0.00001	22.13342
29	1	0.00007	-158.1252
	7	0.00184	-155.0321
	8	0.03083	25.05673
	12	0.00005	19.0512

Tabla 4.51 Comparación de la corriente del Compensador Estático de Vars contra los estimados, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos

<i>Armónica</i>	<i>Mag. de Corriente estimada</i>	<i>Mag. de Corriente real</i>	<i>Error de la mag.</i>	<i>Ang. de Corriente estimada</i>	<i>Ang. de Corriente real</i>	<i>Error del Ang.</i>
5	0.51322	0.51213	0.00109	152.7907	152.43	0.3607
7	0.1678	0.18238	0.01458	76.31239	75.64	0.67239
11	0.09648	0.0992	0.00272	81.80564	81.76	0.04564
13	0.05476	0.05471	0.00005	177.0241	177.01	0.0141
17	0.04804	0.04523	0.00281	-177.3918	-177.37	0.0218
19	0.02333	0.02335	0.00002	-81.08115	-81.06	0.02115
23	0.0324	0.03137	0.00103	-76.4744	-76.47	0.0044
25	0.00959	0.00948	0.00011	22.05263	22.06	0.00737
29	0.03083	0.02918	0.00165	25.05673	25.06	0.00327

Tabla 4.52 Comparación de la corriente del Horno de arco contra los estimados, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos

<i>Armónica</i>	<i>Mag. de Corriente estimada</i>	<i>Mag. de Corriente real</i>	<i>Error de la mag.</i>	<i>Ang. de Corriente estimada</i>	<i>Ang. de Corriente real</i>	<i>Error del Ang.</i>
2	3.36966	3.37811	0.00845	28.29013	28.28	0.1013
3	2.35043	2.54455	0.19412	28.296169	28.28	0.16169
4	1.05803	1.09679	0.03876	28.40261	28.28	0.12261
5	1.79866	1.79874	0.00008	28.191	28.28	0.089
7	1.40414	1.36002	0.04412	28.27677	28.28	0.00323

En la tabla 4.53 están los voltajes armónicos calculados y estimados. Los voltajes armónicos estimados por el método de Nguyen [19] están sombreados, mientras que los demás voltajes fueron calculados con la expresión (3.8). Como se ve, los voltajes varían debido a que el error introducido por las mediciones es muy grande; aun así los voltajes armónicos son aceptables.

En la tabla 4.54 se tiene la Distorsión Armónica Total para cada nodo de la red. Se observa que en varios nodos se excede el valor de Distorsión Armónica Total permitido por el Estándar IEEE 519-1992, aunque debido a la existencia de dos fuentes armónicas, es necesario hacer un estudio de flujos armónicos para cada una de las fuentes y conocer así cual es la que debe ser sancionada. Se debe mencionar que estos resultados no son confiables como se ha demostrado, ya que existe bastante error en ellos.

Tabla 4.53 Comparación de los voltajes armónicos contra los estimados, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos con dos fuentes armónicas

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
2	1	0.4281	0.4118	0.0163	41.51	39.54	1.97
	2	0.4681	0.4577	0.0104	35.634	35.798	0.164
	3	0.6871	0.6936	0.0065	15.055	13.254	1.801
	4	0.6041	0.6091	0.005	40.611	40.803	0.192
	5	0.5963	0.5912	0.0051	47.376	45.613	1.763
	6	0.939	0.9272	0.0118	81.16	80.957	0.203
	7	0.6882	0.751	0.0628	54.014	51.864	2.15
	8	0.6826	0.751	0.0684	54.032	51.864	2.168
	9	0.7908	0.8339	0.0431	56.264	56.092	0.172
	10	0.8014	0.8367	0.0353	62.305	59.875	2.43
	11	0.8469	0.8662	0.0193	72.336	70.283	2.053
	12	1.9279	1.9347	0.0068	87.777	87.03	0.747
	13	1.2229	1.2305	0.0076	83.51	82.25	1.26
	14	0.9983	1.0239	0.0256	67.377	65.26	2.117
3	1	0.3675	0.376	0.0085	31.304	30.984	0.32
	2	0.4168	0.412	0.0048	27.249	27.141	0.108
	3	0.5305	0.5693	0.0388	1.16	0.7867	0.3733
	4	0.5536	0.5596	0.006	33.581	33.532	0.049
	5	0.5041	0.5433	0.0392	39.446	39.035	0.411
	6	0.8876	0.9152	0.0276	78.028	78.049	0.0021
	7	0.6718	0.7583	0.0865	44.547	43.66	0.887
	8	0.6883	0.7583	0.07	44.526	43.66	0.866
	9	0.8571	0.869	0.0119	47.125	47.075	0.05
	10	0.7714	0.8549	0.0835	52.572	51.331	1.241
	11	0.7833	0.86	0.0767	65.482	64.245	1.237
	12	1.8048	1.9578	0.153	89.433	88.535	0.898
	13	1.1253	1.2237	0.0984	81.206	80.159	1.047
	14	0.9176	1.0084	0.0911	59.62	58.32	1.3
4	1	0.2009	0.1918	0.0091	15.214	18.825	3.611
	2	0.2057	0.2076	0.0009	14.755	14.932	0.177
	3	0.2613	0.2606	0.0007	-18.1	-14.13	3.97
	4	0.2752	0.2849	0.0097	21.752	21.931	0.179
	5	0.27	0.2729	0.0029	23.951	28.009	4.058
	6	0.4423	0.4539	0.0116	72.909	73.09	0.181
	7	0.4153	0.4165	0.0012	26.662	30.245	3.583
	8	0.4049	0.4165	0.0031	26.57	30.245	3.675
	9	0.4713	0.4877	0.0164	32.74	32.791	0.051
	10	0.4468	0.4623	0.0155	34.029	37.535	3.506
	11	0.4129	0.435	0.0221	51.152	53.975	2.823
	12	0.9589	1.0098	0.0509	88.004	88.413	0.409
	13	0.5738	0.609	0.0352	75.16	76.279	1.119
	14	0.4806	0.5058	0.0252	44.205	46.996	2.791

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
5	1	0.2483	0.2704	0.0221	31.395	29.429	1.966
	2	0.2841	0.2858	0.0017	25.357	25.282	0.075
	3	0.3102	0.3185	0.0056	-4.427	-6.409	1.982
	4	0.3787	0.3719	0.0068	31.151	30.989	0.162
	5	0.379	0.3844	0.0054	41.668	39.761	1.907
	6	0.8327	0.8402	0.0075	82.356	82.421	0.065
	7	0.3995	0.3953	0.0042	27.389	25.374	2.015
	8	0.2637	0.2741	0.0104	-55.85	-57.23	1.38
	9	0.6443	0.6509	0.0066	38.844	38.752	0.092
	10	0.6555	0.6445	0.011	46.797	45.86	0.937
	11	0.7105	0.7002	0.0103	65.816	65.372	0.444
	12	1.9941	1.9852	0.0089	94.107	94.159	0.052
	13	1.1579	1.1487	0.0092	84.494	84.46	0.034
	14	0.8028	0.7905	0.0123	57.736	57.331	0.405
7	1	0.2453	0.2414	0.0039	-25.79	-25.6	0.119
	2	0.2517	0.2534	0.0017	-29.76	-29.56	0.2
	3	0.2583	0.2499	0.0084	-61.99	-61.62	0.37
	4	0.3254	0.3297	0.0043	-22.81	-22.56	0.25
	5	0.2948	0.2855	0.0093	-13.39	-12.93	0.46
	6	0.5491	0.5329	0.0162	78.798	78.967	0.169
	7	0.5422	0.5201	0.0221	-22.23	-21.97	0.26
	8	0.339	0.2987	0.0403	-27.44	-27.69	0.25
	9	0.736	0.7597	0.0237	-20.71	-20.43	0.28
	10	0.6276	0.6055	0.0221	-14.78	-14.1	0.68
	11	0.3989	0.3888	0.0101	25.622	26.324	0.702
	12	1.7237	1.6727	0.051	97.843	97.802	0.041
	13	0.8068	0.7851	0.0217	84.42	84.387	0.033
	14	0.4598	0.4476	0.0112	14.02	14.754	0.734
11	1	0.0105	0.0106	0.0001	-16.62	-12.54	4.08
	2	0.01	0.0098	0.0002	-14.59	-14.45	0.14
	3	0.0054	0.0057	0.0003	-46.01	-41.01	5
	4	0.005	0.0050	0	12.356	12.539	0.183
	5	0.008	0.0085	0.0005	-7.427	-3.236	4.191
	6	0.0159	0.0151	0.0008	-8.972	-9.04	0.068
	7	0.0445	0.0442	0.0003	159.74	159.62	0.12
	8	0.2306	0.2357	0.0051	169.5	169.5	0
	9	0.0541	0.0533	0.0008	6.0486	6.1684	0.1198
	10	0.0449	0.0447	0.0002	2.9827	2.6555	0.3272
	11	0.0297	0.0295	0.0002	-1.564	-1.613	0.049
	12	0.0171	0.0161	0.001	-14.98	-14.46	0.52
	13	0.0174	0.0179	0.0005	-13.83	-13.43	0.4
	14	0.0332	0.033	0.0002	-6.972	-7.131	0.159

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
13	1	0.0085	0.0084	0.0001	95.561	95.643	0.082
	2	0.0073	0.0073	0	94.006	94.1	0.094
	3	0.0032	0.0031	0.0001	69.558	69.828	0.27
	4	0.0016	0.0016	0	173.68	170.85	2.83
	5	0.0039	0.0039	0	109.19	109.57	0.38
	6	0.0061	0.0061	0	84.496	84.544	0.048
	7	0.0378	0.037	0.0008	-96.98	-96.94	0.04
	8	0.1632	0.1623	0.0009	-93.9	-93.89	0.01
	9	0.0228	0.022	0.0008	94.68	94.946	0.266
	10	0.0187	0.0183	0.0004	91.673	91.717	0.044
	11	0.0123	0.012	0.0003	88.487	88.602	0.115
	12	0.0067	0.0063	0.0004	78.232	78.452	0.22
	13	0.0073	0.0071	0.0002	78.68	78.893	0.213
	14	0.0135	0.0132	0.0003	82.764	82.867	0.103
17	1	0.0119	0.0121	0.0002	89.347	89.375	0.028
	2	0.0087	0.0087	0	88.658	88.697	0.039
	3	0.0009	0.0009	0	-158.1	-159	1.1
	4	0.0089	0.009	0.0001	-95.75	-95.74	0.01
	5	0.0041	0.0042	0.0001	-102.5	-102.6	0.1
	6	0.0016	0.0016	0	92.502	92.646	0.144
	7	0.049	0.05	0.001	-88.46	-88.45	0.01
	8	0.1929	0.1854	0.0075	-87.66	-87.66	0
	9	0.0127	0.0131	0.0004	95.833	95.92	0.087
	10	0.0102	0.0104	0.0002	93.333	93.341	0.008
	11	0.0058	0.0059	0.0001	91.941	91.942	0.001
	12	0.002	0.002	0	85.217	85.053	0.164
	13	0.0025	0.0026	0.0001	84.782	84.734	0.048
	14	0.0069	0.007	0.0001	86.526	86.525	0.001
19	1	0.0128	0.0127	0.0001	170.18	172.22	2.04
	2	0.0073	0.0079	0.0006	173.81	173.21	0.6
	3	0.0047	0.0043	0.0004	-59.41	-57.59	1.82
	4	0.0132	0.0131	0.0001	-6.326	-6.294	0.032
	5	0.0104	0.01	0.0004	-9.751	-8.299	1.452
	6	0.0016	0.0015	0.0001	-24.98	-25.45	0.47
	7	0.0309	0.0321	0.0012	6.6792	6.8693	0.1901
	8	0.1088	0.1102	0.0014	8.2839	8.3377	0.0538
	9	0.0063	0.0065	0.0002	-171.5	-171.4	0.1
	10	0.0047	0.0049	0.0002	-172.2	-172.1	0.1
	11	0.0017	0.0018	0.0001	-158.4	-160.6	2.2
	12	0.001	0.0009	0.0001	-39.68	-39.67	0.01
	13	0.0007	0.0006	0.0001	-55.49	-59.032	3.542
	14	0.0028	0.0029	0.0001	-174.5	-174.7	0.2

<i>Arm</i>	<i>Nod</i>	<i>Mag. Volt. estim.</i>	<i>Mag. Volt. flujos</i>	<i>Error de la Mag.</i>	<i>Ang. volt estim.</i>	<i>Ang. Volt. Flujos</i>	<i>Error del ang.</i>
23	1	0.0099	0.0099	0	16.296	17.688	1.392
	2	0.0034	0.0045	0.0011	37.195	34.562	2.633
	3	0.0092	0.0089	0.0003	116.27	117	0.73
	4	0.0123	0.0131	0.0008	-147.4	-147.8	0.4
	5	0.0197	0.0201	0.0004	-150	-150.1	0.1
	6	0.0064	0.0065	0.0001	-159.4	-159.3	0.1
	7	0.0457	0.0447	0.001	11.77	11.779	0.009
	8	0.1769	0.1718	0.0051	13.073	13.074	0.001
	9	0.0048	0.0046	0.0002	-167.8	-167.9	0.1
	10	0.0047	0.0046	0.0001	-168.4	-168.3	0.1
	11	0.0054	0.0053	0.0001	-164.4	-164.2	0.2
	12	0.0058	0.0054	0.0004	-164.7	-164.5	0.2
	13	0.0054	0.0052	0.0002	-165.5	-165.3	0.2
	14	0.004	0.0039	0.0001	-173.3	-173.2	0.1
25	1	0.0013	0.0015	0.0002	111.73	108.51	3.22
	2	0.0009	0.0006	0.0003	124.84	129	4.16
	3	0.0009	0.0011	0.0002	-180	176.8	3.2
	4	0.0021	0.0018	0.0003	-57.87	-56.88	0.99
	5	0.0044	0.0045	0.0001	-62.55	-61.97	0.58
	6	0.0015	0.0015	0	-69.29	-69.4	0.11
	7	0.0149	0.0156	0.0007	111.6	111.57	0.03
	8	0.0572	0.0573	0.0001	111.93	111.93	0
	9	0.0013	0.0014	0.0001	-67.16	-67.15	0.01
	10	0.0013	0.0013	0	-69.82	-69.79	0.03
	11	0.0013	0.0014	0.0001	-70.8	-70.61	0.19
	12	0.0012	0.0013	0.0001	-74.31	-73.93	0.38
	13	0.0012	0.0013	0.0001	-74.63	-74.23	0.4
	14	0.001	0.0011	0.0001	-76.29	-76.2	0.09
29	1	0.0022	0.002	0.0002	108.18	106.63	1.55
	2	0.0012	0.0011	0.0001	132.41	133.62	1.21
	3	0.0007	0.0008	0.0001	-48.96	-47.69	1.27
	4	0.0008	0.0009	0.0001	79.545	84.02	4.475
	5	0.0113	0.0114	0.0001	-65.1	-65.1	0
	6	0.004	0.0039	0.0001	-70.74	-70.76	0.02
	7	0.0584	0.0588	0.0004	114.87	114.87	0
	8	0.2159	0.2078	0.0081	115.01	115.01	0
	9	0.0038	0.0039	0.0001	-64.14	-64.14	0
	10	0.0035	0.0036	0.0001	-67.25	-67.3	0.05
	11	0.0035	0.0036	0.0001	-69.87	-70.01	0.14
	12	0.003	0.0033	0.0003	-74.33	-74.54	0.21
	13	0.0031	0.0032	0.0001	-76.35	-74.56	0.21
	14	0.0028	0.0028	0	-73.53	-73.7	0.17

Tabla 4.53 THD de los voltajes, con error en las mediciones, por el método de Nguyen [19] para el sistema de 14 nodos

<i>Nod</i>	<i>%THD</i>
1	0.655379
2	0.711686
3	0.951784
4	0.949658
5	0.918252
6	1.55135
7	1.226725
8	1.19888
9	1.565771
10	1.479492
11	1.416050
12	3.659264
13	2.155883
14	1.684854

Se puede observar que al afectar las mediciones con el error establecido en el Estándar IEEE 519-1992, la estimación no es exacta, esto es debido a que el error es muy grande, además de que los métodos de Nguyen [19] Heydt [15] son deterministas, lo cual los hace más sensibles a los errores de medición.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

5.1 CONCLUSIONES

Se emplearon dos sistemas de prueba, uno de 5, basado en el sistema de Stagg y 14 nodos, basado en la red de la IEEE, con sus respectivas modificaciones.

En el método propuesto por Heydt en [15] no se obtuvieron los resultados esperados para el sistema de 5 nodos, por ello se decidió no llevar a cabo el caso con error. Para el caso del sistema de 14 nodos con una y dos fuentes armónicas los resultados fueron exactos, identificando correctamente la ubicación de las fuentes de armónicas. El problema que se tuvo en el sistema de 5 nodos puede ser debido a que como es un sistema muy pequeño las armónicas no se distribuyen como el de 14, lo que hace más difícil de identificar la fuente.

El método propuesto por Nguyen [19] dio buenos resultados para el sistema de 5 nodos y el sistema de 14 nodos con una y dos fuentes de armónicas, ya que identificó correctamente la ubicación de las fuentes de armónicas.

Debido a que se obtuvieron buenos resultados con el método de Nguyen se decidió probar los sistemas con errores en las mediciones, aunque desafortunadamente no se encontró en que nodo se encontraban las fuentes de armónicas. Esto pudo suceder debido a dos razones, la primera es que el método es determinista y es más sensible a los errores; la segunda que el error permitido por el Estándar IEEE 519-1992 es muy grande, lo cual ocasiona que el estimador tenga problemas al encontrar las fuentes.

El índice de Distorsión Armónica Total utilizando voltajes no se puede emplear para encontrar la fuente de armónicas, ya que no se saben cuantas fuentes están conectadas a la red, además las armónicas se propagan, al igual que sus efectos por la red.

5.2 RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Ya que sólo se pudieron localizar dos fuentes armónicas, es necesario probar los métodos propuestos con más fuentes de armónicas. También es necesario hacer pruebas a sistemas con mayor cantidad de nodos, y si es posible un caso real, ya que se obtuvieron mejores resultados con el sistema de más nodos.

Además de identificar la fuente de armónicas, es posible conocer el tipo de fuente que introduce armónicas a la red, esto se hace obteniendo el espectro armónico de la fuente una vez que se ha identificado la ubicación de esta.

Es pertinente comparar los resultados obtenidos con estos métodos empleando otros métodos para la identificación de fuentes armónicas.

Debido a que al tener error en las mediciones el estimador no dio los resultados esperados, es necesario realizar una reformulación para que estos métodos sean estadísticos.

REFERENCIAS

- [1] Mahmoud A. A., Schultz D. R., "A Method for Analyzing Harmonic Distribution in A.C. Power Systems" *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 6, June 1982.
- [2] Xia D., Heydt G. T., "Harmonic Power Flow studies Part I: Formulation and Solution" *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 6 June 1982.
- [3] Xia D., Heydt G. T., "Harmonic Power Flow studies Part II: Implementation and Practical Application" *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 6 June 1982.
- [4] Acha E., Madrigal M., *Power System Harmonics Computer Modelling and Analysis*, 2nd ed., Ed. New York: John Wiley & Sons, 2001, pp. 35-72.
- [5] Arrillaga J., Smith B. C., Watson N. R., Wood A. R., *Power System Harmonic Analysis*, 2nd ed., Ed. New York: John Wiley & Sons, 1997, pp. 97-130.
- [6] Heydt G. T., *Electric Power Quality*, 2nd ed., Indiana: Stars in a Circle Publications, 1994, pp. 289-341.
- [7] Herraiz S., Sainz L., Clua J., "Review of Harmonic Load Flow Formulations", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 18, No. 3, July 2003.
- [8] Arrillaga J., Callaghan C. D., "Double-iterative algorithm for the analysis of power and harmonic flows at AC/DC convertors terminals" *IEEE Proceedings*, Vol. 136, PT. C., No. 6 November 1989.
- [9] Sharma V., Fleming R. J., Niekamp L., "An Iterative Approach for Analysis of Harmonic Penetration in the Power Transmissions Networks" *IEEE/PES Winter meeting*, New York, New York, August 31, 1990.

- [10] Carbone R., Fantaucchi M., Gagliardi F., Testa A., "Some Considerations on the Iterative Harmonic Analysis Convergence", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.13, No. 1, April 1998.
- [11] Smith B. C., Arrillaga J., Wood A. R., Watson N. R., "A review of Iterative Harmonic Analysis for AC-DC Power Systems", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 8, No. 2, January 1993.
- [12] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks Part II: Sample Systems and Examples" *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, January 1996.
- [13] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "Test Systems for Harmonics Modeling Simulation", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 14, No. 2, April 1999.
- [14] 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" *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, January 1996.
- [15] Heydt G. T., "Identification of Harmonic Sources by a State Estimation Technique", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4 No. 1, January 1989.
- [16] Sakis M. A. P., Zhang F., Zelingher S., Power System Harmonic State Estimation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 9 No. 3, July 1994.
- [17] Du Z. P., Arrillaga J., Watson N. R., Chen S., "Identification of Harmonic Sources of Power Systems Using State Estimation", *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 146 No. 1, January 1999.

- [18] Lobos T., Kozina T., Koglin H. J., “Power Systems Harmonic Estimation Using Linear Least Squares Method and SVD”, *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 148 No. 6, November 2001.
- [19] Nguyen H. T., Yang J. J., Choi, S. S., “On Harmonic State Estimation and the Evaluation of Harmonic Power Contribution from Sources”, *IEEE*, 2010.
- [20] Kent K. C., Watson N. R., Arrillaga J., “An Adaptive Kalman Filter for Dynamic Harmonic State Estimation and Harmonic Injection Tracking”, *IEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20 No. 2, April 2005.
- [21] Beides H. M., Heydt G. T., “Dynamic State Estimation of Power System Harmonics Using Kalman Filter Methodology”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 6 No. 4, October 1991.
- [22] Haili M., Girgis A. A., “Identification and Tracking of Harmonic Sources in a Power System Using A Kalman Filter”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11 No. 3, July 1996.
- [23] Hartana R. K., “Constrained Neural Network-Based Identification of Harmonic Sources”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 29 No. 1, January/February 1993.
- [24] Gursoy E., “Independent Component Analysis for Harmonic Source Identification in Electric Power Systems”, Thesis, Drexel University, April 2007.
- [25] Saab S. S., “Discrete-time Kalman Filter under incorrect noise covariances”, *Proc. Amer. Control Conf.*, Vol. 2, June 1995, pp.1152-1156.
- [26] Seber G. A. F., Alan J. L. *Linear Regression Analysis*, 2nd ed., New Zealand, Wiley Series in Probability and Statistics, 2003, pp. 35-42.

- [27] Montoya M. E., “Estudio Estocástico de Cargabilidad en Líneas de Transmisión”, Tesis de Maestría, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional, México 2008.
- [28] IEEE Std 519-1992, “IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems”.
- [29] Schweppe F. C., Wildes J., “Power System Static-State Estimation”, pt. I, II, III, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, Vol. 1, pp. 89, January 1970.
- [30] Kent K. C. Y., “Harmonic State Estimation and Transient State Estimation”, Thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2005.
- [31] Hernández A. L. A., Romero R. D., Robles G. J., “Efecto de un CEV en la Penetración Armónica en un Sistema de Potencia”, VI Congreso Internacional de Ingeniería Electromecánica y de Sistemas, Noviembre 2011.
- [32] <http://www.shenyan-sh.cn/html/20110711171212734.html>
- [33] Montero C. S., “Algoritmos de Detección de Origen de Armónicos en un Sistema Eléctrico”, Tesis, SEPI-IPN, ESIME Zacatenco, México, Diciembre 2005..
- [34] Luna V. C. L. E., “Metodología para el Análisis de las Perturbaciones Armónicas en los Sistemas Industriales en Baja Tensión”, Tesis, SEPI-IPN, ESIME Zacatenco, México, Junio 2007.
- [35] Gómez V. J. C., “Estudio de la Sensibilidad de los Modelos de Cargas para Análisis de Armónicos en Sistemas Eléctricos Industriales”, Tesis, SEPI-IPN, ESIME Zacatenco, México, Mayo 2001.
- [36] Reyes T. E., “Aplicación de un Filtro Activo de Corriente en la Reducción de Armónicos en Sistemas Eléctricos Industriales, Tesis, SEPI-IPN, ESIME Zacatenco, México, Agosto 2005.

- [37] Michel H. H. Y., “Estimación de Estado por Mínimos Cuadrados Ponderados en Sistemas de Potencia Empleando el Método de Newton”, Tesis, SEPI-IPN, ESIME Zacatenco, México, Junio 2009.
- [38] Trejo N. F., “Técnica Computacional para Estimación de Estado en Redes de Distribución”, Tesis, SEPI-IPN, ESIME Zacatenco, México, 2011.
- [39] Ávila A. D. F., “Robustez de la Estimación de Estado en SEP’s por el Método de Cuadrados Mínimos”, Tesis, SEPI-IPN, ESIME Zacatenco, México, Agosto 2012.

APÉNDICE A

INFORMACIÓN CARACTERÍSTICA DE LOS SISTEMAS DE PRUEBA

A.1 SISTEMA DE 5 NODOS.

Tabla A.1 Datos de las líneas del sistema de 5 nodos

Línea p-q	Impedancia serie	Admitancia en Derivación
1 – 2	$0.02 + j0.06$	$0 + j0.03$
1 – 3	$0.08 + j0.24$	$0 + j0.025$
2 – 3	$0.06 + j0.18$	$0 + j0.02$
2 – 4	$0.06 + j0.18$	$0 + j0.02$
2 – 5	$0.04 + j0.12$	$0 + j0.015$
3 – 4	$0.01 + j0.03$	$0 + j0.01$
4 – 5	$0.08 + j0.24$	$0 + j0.025$

Tabla A.2 Datos de los generadores del sistema de 5 nodos

Nodo	Admitancia del generador
1	$0 + j0.0001$
2	$0 + j0.001$

Tabla A.3 Datos de los flujos de potencia a frecuencia fundamental del sistema de 5 nodos

Nodo	$ V $	θ	P_g	Q_g	P_d	Q_d
1	1.05	0	1.526	0.6584	0	0
2	1	-2.6944	0.3	-0.6512	0	0
3	0.9796	-6.2114	0	0	0.45	0.2
4	0.9776	-6.9232	0	0	0.8	0.3
5	0.9922	-6.6963	0	0	0.5	0.25

Donde:

P_g es la Potencia Activa generada

Q_g es la Potencia Reactiva generada

P_d es la Potencia Activa demandada

Q_d es la Potencia Reactiva demandada

Tabla A.4 Datos de los capacitores del sistema de 5 nodos

Nodo	Potencia del Capacitor
4	0.3

A.2 SISTEMA DE 14 NODOS

Tabla A.5 Datos de las líneas del sistema de 14 nodos

Línea p-q	Impedancia serie	Admitancia en Derivación
1 – 2	$0.01938 + j0.05917$	$0 + j0.0264$
1 – 5	$0.05403 + j0.22304$	$0 + j0.0264$
2 – 3	$0.04699 + j0.19797$	$0 + j0.0219$
2 – 4	$0.05811 + j0.17632$	$0 + j0.0187$
2 – 5	$0.05695 + j0.17388$	$0 + j0.017$
3 – 4	$0.06701 + j0.17103$	$0 + j0.0173$
4 – 5	$0.01335 + j0.04211$	$0 + j0.0064$
4 – 7	$0 + j0.20912$	0
4 – 9	$0 + j0.55618$	0
5 – 6	$0 + j0.25202$	0
6 – 11	$0.09498 + j0.1989$	0
6 – 12	$0.12291 + j0.25581$	0
6 – 13	$0.06615 + j0.13027$	0
7 – 8	$0 + j0.17615$	0
7 – 9	$0 + j0.11001$	0
9 – 10	$0.03181 + j0.0845$	0
9 – 14	$0.12711 + j0.27038$	0
10 – 11	$0.08205 + j0.19207$	0
12 – 13	$0.22092 + j0.19988$	0
13 – 14	$0.17093 + j0.34802$	0

Tabla A.6 Datos de los generadores del sistema de 14 nodos

Nodo	Admitancia del generador
1	$0 + j0.25$
2	$0 + j0.25$
6	$0 + j0.25$

Tabla A.7 Datos de los flujos de potencia a frecuencia fundamental del sistema de 14 nodos

Nodo	$ V $	θ	P_g	Q_g	P_d	Q_d
1	1.06	0	2.61681	-.28633	0	0
2	1.045	-5.68	0.183	0.05857	0.217	0.127
3	1.0427	-15.3	0	0	0.942	0.19
4	1.02482	-11.41	0	0	0	0
5	1.0337	-9.82	0	0	0.076	0.016
6	1.07	-15.87	-0.112	0.442	0.112	0.075
7	1.0193	-14.47	0	0	0	0
8	1.0209	-14.49	0	0	0	0
9	1.0147	-16.09	0	0	0	0
10	1.0168	-16.33	0	0	0.09	0.058
11	1.0394	-16.21	0	0	0.035	0.018
12	1.0528	-16.72	0	0	0.061	0.016
13	1.0485	-16.73	0	0	0.135	0.058
14	1.0154	-17.39	0	0	0.149	0.05

Tabla A.8 Datos de los capacitores del sistema de 14 nodos

Nodo	Potencia del Capacitor
9	0.19

APÉNDICE B

TEORÍA DE ARMÓNICAS

B.1 SERIES DE FOURIER

Por definición, una función periódica, $f(t)$, es tal que $f(t) = f(t + T)$. Esta función puede representarse por series trigonométricas de elementos que consisten de un elemento de CD y otros elementos con frecuencias que comprende la componente fundamental y los múltiplos enteros de las frecuencias.

La expresión para las series trigonométricas $f(t)$ es la siguiente:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t)] \quad (\text{B1})$$

Donde $\omega_0 = 2\pi/T$.

La ecuación (B1) puede simplificarse de la siguiente forma:

$$f(t) = c_0 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k \sin(h\omega_0 t + \varphi_k) \quad (\text{B2})$$

Donde:

$$c_0 = \frac{a_0}{2}$$

$$c_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$$

$$\varphi_k = \tan^{-1} \left(\frac{a_k}{b_k} \right)$$

La ecuación (B2) se conoce como series de Fourier y describe una función periódica compuesta de las contribuciones de funciones sinusoidales a diferentes frecuencias.

- $(k\omega_0)$ k ésimo orden armónico de la función periódica
- c_o magnitud de la componente de CD
- c_k y φ_k magnitud y ángulo de fase de la k ésima componente armónica.

El componente con $k = 1$ se conoce como componente fundamental. La magnitud y ángulo de fase de cada armónica determina la forma de onda resultante $f(t)$.

La ecuación (B2) puede representarse en forma compleja:

$$f(t) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k e^{jk\omega_0 t} \quad (B3)$$

Donde:

$$c_k = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) c_k e^{-jk\omega_0 t} dt \quad (B4)$$

B.2 COEFICIENTES DE FOURIER

Si una función $f(t)$ es periódica con un periodo T (esto es, $f(t) = f(t \pm NT)$), entonces $f(t)$ puede escribirse en forma rectangular como:

$$f(t) = I_{dc} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega_0 t) + b_k \sin(k\omega_0 t)], \quad \omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad (B5)$$

Donde:

$$I_{dc} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) \cos(k\omega_0 t) dt$$

Si se quiere pasar la ecuación (B5) a su forma polar queda igual a la ecuación (B2).

B.3 DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL (THD)

La distorsión armónica total (THD) es un índice usado frecuentemente en sistemas de transmisión y distribución. Considera la contribución de cada componente armónico en la señal. El THD se define para señales de corriente y voltaje, respectivamente de la siguiente forma:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (B6)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (B7)$$

B.4 DISTORSIÓN TOTAL DE LA DEMANDA (TDD)

La distorsión Armónica es mas significativa cuando se monitorea en el punto de acoplamiento común (generalmente el punto de medición del cliente) sobre un periodo de tiempo que refleje la demanda máxima del cliente, generalmente 15 a 30 minutos como se sugiere en el Estándar IEEE 519-1992. Fuentes débiles con una corriente de demanda grande relativa a la corriente medida tendera a mostrar una onda mas distorsionada. A la inversa, fuentes fuertes caracterizadas por operar a bajas corrientes de demanda mostraran una forma de onda menos distorsionada. La distorsión total de la demanda se basa en la corriente demandada, I_L , por encima del periodo de monitores:

$$DD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (B8)$$

B.5 CANTIDADES DE POTENCIA BAJO SITUACIONES NO SINUSOIDALES

B.5.1 VOLTAJE INSTANEO

$$f(t) = \sum_{h=1}^{\infty} f_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} F_h \sin(h\omega_0 t + \theta_h) \quad (\text{B9})$$

B.5.2 POTENCIA INSTANTÁNEA

$$p(t) = v(t)i(t) \quad (\text{B10})$$

B.5.3 VALORES RMS

$$F_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} F_h^2} \quad (\text{B11})$$

F_{rms} es el valor rms de la función F , que puede ser un voltaje o una corriente.

APÉNDICE C

PROGRAMA PARA EL CÁLCULO DE FLUJOS ARMÓNICOS POR EL MÉTODO DE INYECCIONES DE CORRIENTE

C.1 RUTINA PRINCIPAL HARM_INJ

```

!PROGRAMA PARA EL CALCULO DE INYECCIONES ARMÓNICAS
!EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA
!ELABORADO POR: LUIS ALBERTO HERNÁNDEZ ARMENTA

PROGRAM HARM_INJ

USE MSIMSLMS
USE MSIMSLC
USE mData01
USE mData02
USE mData03
USE mData04
USE mData05
USE mData06
USE mData07
USE mData08
USE mData09

IMPLICIT NONE

! LA SUBROUTINA PRESENTA HACE UNA BREVE PRESENTACION
! PIDE LOS ARCHIVOS DE ENTRADA Y SALIDA
! E IMPRIME LA PRESENTACION EN ELLOS
CALL PRESENTA

! LA SUBROUTINA LEEDATOS, LEE LOS DATOS DE LOS ELEMENTOS
! DEL SISTEMA
CALL LEEDATOS

ALLOCATE (Vharmon (NOnodos, 50, NOfarm))

DO armon=1, NOfarm

! LA SUBROUTINA LEEDATOSARM, LEE LOS DATOS DE TODAS LAS
;FUENTES ARMÓNICAS
! DEL SISTEMA

CALL LEEDATOSARM

ALLOCATE (Zcap (NOcap),
Ycap (NOcap), Zcar (NOcarga), Ycar (NOcarga),
XL (NOcarga),
R (NOcarga),

```

```
        ALLOCATE          (XS(NOcarga),          Ih(NOnodos),
Zlin(NOlin),Ylin(NOlin),Zgen(NOgen))
        ALLOCATE (Yh(NOnodos,NOnodos))
        ALLOCATE          (invYh(NOnodos,NOnodos),      Vh(NOnodos),
Vharm(NOnodos,NOarm))
```

```
DO h=1, NOarm
```

```
!!! AFECTA LOS DATOS PARA CADA ARMÓNICA DEL SISTEMA
```

```
        CALL CDATOS
```

```
!!! CONSTRUYE LA MATRIZ YBUS PARA CADA ARMÓNICA DEL
SISTEMA
```

```
        CALL CYBUS
```

```
!!! SOLUCION DE FLUJOS ARMÓNICOS POR EL METODO DE
INYECCION DE CORRIENTE
```

```
        CALL SOLFLUJ
```

```
END DO
```

```
!!!! CALCULA EL THD DE CADA FUENTE ARMÓNICA
```

```
CALL THD
```

```
DEALLOCATE (Arm, IFA, angFA, Iarm)
DEALLOCATE(Zcap, Ycap,Zcar,Ycar, R, XL)
DEALLOCATE(XS, Ih, Zlin,Ylin,Zgen)
DEALLOCATE(Yh)
DEALLOCATE(invYh, Vh, Vharm)
DEALLOCATE (THDV)
```

```
END DO
```

```
IF (NOfarm .GT. 1) THEN
```

```
!!!! CALCULA EL THD DE LAS DOS FUENTES
```

```
        CALL THDTOT
```

```
END IF
```

```
END PROGRAM
```

C.2 SUBROUTINA LEEDATOS

```
SUBROUTINE LEEDATOS
```

```
!PIDE NOMBRE DE ARCHIVOS: DATOS Y RESULTADOS
!ABRE UNIDADES LOGICAS DE ENTRADA Y SALIDA
!LEE TODA LA INFORMACION REQUERIDA PARA EL PROGRAMA

    USE MDATA01
    USE MDATA02
    USE MDATA04
    USE MDATA05
    USE MDATA06
    USE MDATA07
    USE MDATA08
    USE MDATA09

IMPLICIT NONE

INTEGER :: ELE, NODO

    CHARACTER(40) :: FECHA

    INTEGER(4) HORA(3)

    CALL ITIME (HORA)

    CALL DATE (FECHA)

!EMPIEZA LECTURA DE DATOS

    READ(1,*)NONODOS, NOLIN, NOGEN, NOCARGA, NOCAP, NOFARM, MVABASE

!ASIGNA LOS TAMAÑOS ESPECIFICOS PARA EL CASO DE LAS LINEAS

    ALLOCATE ( P(NOLIN), Q(NOLIN), RPQ(NOLIN), IPQ(NOLIN),
    YPQ2(NOLIN), INDTR(NOLIN))

!ASIGNA LOS TAMAÑOS ESPECIFICOS PARA EL CASO DE LOS GENERADORES

    ALLOCATE( NODGEN(NOGEN), IGEN(NOGEN))

!ASIGNA LOS TAMAÑOS ESPECIFICOS PARA EL CASO DE TRANSF

    ALLOCATE( NODTRAFO(NOTRAFO), ZTRAFO(NOTRAFO), PTRAF0(NOTRAFO))

!ASIGNA LOS TAMAÑOS ESPECIFICOS PARA EL CASO DE CARGAS

    ALLOCATE( NODCARGA(NOCARGA), QCARGA(NOCARGA), PCARGA(NOCARGA))

!ASIGNA LOS TAMAÑOS ESPECIFICOS PARA EL CASO DE CAPACITORES

    ALLOCATE( NODCAP(NOCAP), QCAP(NOCAP))

!ASIGNA LOS TAMAÑOS ESPECIFICOS DE LOS VECTORES QUE TIENEN
!LOS DATOS DE LOS FLUJOS DE POTENCIA

    ALLOCATE ( TIPON(NONODOS), MAGV(NONODOS), ANGV(NONODOS))
```

```

        ALLOCATE (V(NONODOS))

        WRITE(2,18)ARCHRES
18  FORMAT( 3/,'>>NOMBRE DEL ARCHIVO DE SALIDA : ',A20)

        WRITE (2,19)FECHA
19  FORMAT (3/,'>> FECHA : ',A40)

        WRITE(2,20) HORA
20  FORMAT (3/,'>> HORA : ',1X,I2,':',I2,':',I2)

!LEE DATOS DE CADA LINEA

        DO ELE=1, NOLIN

                READ(1,*) P(ELE), Q(ELE), RPQ(ELE), IPQ(ELE), YPQ2(ELE),
INDTR(ELE)

        END DO

! IMPRIME LOS DATOS DE LA LINEAS

        WRITE(2,01)
01  FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S   D E   E N T R A D A
----')
        WRITE(2,02) NONODOS, NOLIN, NOGEN, NOCARGA, NOCAP
02  FORMAT(2/,'NUMERO DE NODOS = ',I3,1/,'NUMERO DE LINEAS =
',I3,1/,'NUMERO DE GENERADORES = ',&
                1/,I3,1/,'NUMERO DE CARGAS = ',I3, 1/,'NUMERO DE
CAPACITORES = ',I3)

        WRITE(2,03)
03  FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S   D E   L I N E A S --
--')
        WRITE(2,04)
04  FORMAT(2/,19X,'IMPEDANCIAS Y ADMITANCIAS PRIMITIVAS',&
                1/,10X,'LINEA',2X,'NE',5X,'NR',4X,'IMPEDANCIA
SERIE',9X,'YPQ/2',5X,'INDICADOR DE
TRANSFORMADOR(1=TRAFO,0=LINEA)')

        DO ELE=1,NOLIN

!           IF (INDTR(ELE) .EQ. 0) THEN

                WRITE(2,05)ELE, P(ELE), Q(ELE), RPQ(ELE), IPQ(ELE),
YPQ2(ELE), INDTR(ELE)
                05  FORMAT(12X,I3,I6,I6,F10.5,'+J',F8.5,'0.0
+J',F8.5, 12X, I6)

```

```

!           END IF

        END DO

!       WRITE(2,06)
! 06 FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S   D E   L O S   T R
A   F   O   S.   ----')
!       WRITE(2,07)
! 07 FORMAT(2/,19X,'IMPEDANCIAS Y ADMITANCIAS PRIMITIVAS',&
!           1/,10X,'TRANSF.',2X,'NE',5X,'NR',4X,'IMPEDANCIA
SERIE',9X,'YPQ/2')

!       DO ELE=1,NOLIN

!           WRITE(*,*) '1'

!           IF (INDTR(ELE) .EQ. 1) THEN

!               WRITE(2,08)ELE, P(ELE), Q(ELE), ZPQ(ELE), YPQ2(ELE)
!               08 FORMAT(12X,I3,I6,I6,F10.5,SP,F8.5,'+J',F8.5,'0.0
+J',F8.5)

!           END IF

!       END DO
! LEE LOS DATOS DEL GENERADOR

        DO ELE=1, NOGEN

                READ(1,*)NODGEN(ELE), IGEN(ELE)

        END DO

        WRITE(2,09)
09 FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S   D E L   G E N E R A
D O R ----')
        WRITE(2,10)
10 FORMAT(2/,10X,'GENERADOR',2X,'NODO',4X,'IMPEDANCIA DEL
GEN')

        DO ELE=1,NOGEN

                WRITE(2,11)ELE, NODGEN(ELE), IGEN(ELE)
11 FORMAT(12X,I3,3X,I6,2X,F10.5)

        END DO

!!!LECTURA DE LOS DATOS DE LAS CARGAS

```

```
DO ELE=1, NOCARGA

    READ(1,*)NODCARGA(ELE), PCARGA(ELE), QCARGA(ELE)

END DO

WRITE(2,12)
12 FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S   D E   L A S   C A R
G A S ----')
WRITE(2,13)
13 FORMAT(2/,12X,'CARGA',4X,'NODO',4X,'POTENCIA ACTIVA
(MW).',4X,'POTENCIA REACTIVA (MVAR)')

DO ELE=1, NOCARGA

    WRITE(2,14)ELE, NODCARGA(ELE), PCARGA(ELE), QCARGA(ELE)
14 FORMAT(12X,I3,3X,I6,8X,F10.5,16X,F10.5)

END DO

!!!LECTURA DE LOS DATOS DE LOS CAPACITORES

IF (NOCAP .NE. 0) THEN

    DO ELE=1, NOCAP

        READ(1,*)NODCAP(ELE), QCAP(ELE)

    END DO

    WRITE(2,15)
15 FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S   D E   L O S   C
A P A C I T O R E S ----')
    WRITE(2,16)
16 FORMAT(2/,10X,'CAPACITOR',4X,'NODO',4X,'POTENCIA
REACTIVA (MVAR)')

    DO ELE=1, NOCAP

        WRITE(2,17)ELE, NODCAP(ELE), QCAP(ELE)
17 FORMAT(12X,I3,3X,I6,8X,F10.5)

    END DO

END IF

!!!DATOS DE LOS FLUJOS DE POTENCIA

DO NODO=1, NONODOS

    READ(1,*) TIPON(NODO), MAGV(NODO), ANGV(NODO)
```

```
V(NODO) =
(MAGV(NODO)*COSD(ANGV(NODO)))+(0.0,1.0)*MAGV(NODO)*SIND(ANGV(NODO))

END DO

WRITE(2,27)
27 FORMAT(4/,10X,' --- V O L T A J E S D E L E S T
U D I O ---',&
2/,21x,' --- D E F L U J O S ---')

WRITE(2,28)
28 FORMAT(2/,16X,'NODO',5X,'TIPO DE NODO',9X,'VOLTAJE
(P.U.)',5X,'P GENERADA (P.U.)',&
5X,'Q GENERADA (P.U.)',5X,'P DE CARGA(P.U.)',&
5X,'Q DE CARGA (P.U.)')

DO NODO=1, NONODOS

IF (TIPON(NODO) .EQ. 1) THEN
WRITE(2,29)NODO,MAGV(NODO),ANGV(NODO)
29 FORMAT (12X,I6,10X,'SLACK',6X,F10.5,'<',X,F10.5)
END IF

IF (TIPON(NODO) .EQ. 2) THEN
WRITE(2,30)NODO,MAGV(NODO),ANGV(NODO)
30 FORMAT (12X,I6,10X,'CARGA',6X,F10.5,'<',X,F10.5)
END IF

IF (TIPON(NODO) .EQ. 0) THEN
WRITE(2,31)NODO,MAGV(NODO),ANGV(NODO)
31 FORMAT (12X,I6,10X,'GENER',6X,F10.5,'<',X,F10.5)
END IF

END DO

WRITE(*,*) NOFARM

PAUSE

ALLOCATE (TIPOFA(NOFARM))

END SUBROUTINE LEEDATOS
```

C.3 SUBROUTINA LEEDATOSARM

```
SUBROUTINE LEEDATOSARM
```

```

USE mData01
USE mData03
USE mData09

IMPLICIT NONE

INTEGER :: i

WRITE(2,01)
01 FORMAT(4/,10X,' --- D A T O S   D E   L A S   F
U E N T E S ---',&
          2/,21x,' --- A R M O N I C A S ---')

READ (3,*) TipoFA(armon)

IF (TipoFA(armon) .EQ. 1) THEN

    WRITE (2,02) armon
    02  FORMAT(2/,10X,'--- LA FUENTE ARMONICA', I2, ' ES UN
COMPENSADOR ESTATICO DE VARS')

    READ (3,*) NODFA, NOarm, QFA, Angdisp

    WRITE (2,03) NOarm, NODFA, QFA, Angdisp
    03  FORMAT(2/,2X,'NUMERO DE ARMONICAS INYECTADAS POR EL
COMPENSADOR ESTATICO DE VARS', I5,/,2X,'EL COMPENSADOR ESTATICO
DE VARS ESTA CONECTADO AL NODO', I6,&
          /,2X,'LA POTENCIA DEL COMPENSADOR ESTATICO
DE VARS ES', F10.5,/,2X,'CON UN ANGULO DE DISPARO',F10.5)

    ALLOCATE (Arm(NOarm), IFA(NOarm), angFA(NOarm),
Iarm(NOarm))

    DO i=1, NOarm

        READ (3,*) Arm(i), IFA(i), AngFA(i)

        Iarm(i) = IFA(i) * COSD(AngFA(i)) + ((0.0,1.0) *
IFA(i) * SIND(AngFA(i)))

    END DO

    WRITE(2,04)
    04  FORMAT(2/,12X,'ARMONICA',6X,'% DE LA CORRIENTE
FUNDAMENTAL', 6X, 'ANG DE DEFASAMIENTO')

    DO i=1, NOarm

        WRITE(2,05) Arm(i), IFA(i), AngFA(i)
    05  FORMAT(12X,I4,17X,F10.5,17X,F10.5)

    END DO

ELSE IF (TipoFA(armon) .EQ. 2) THEN

```



```
        WRITE (2,12) armon
12     FORMAT(2/,10X,'--- LA FUENTE ARMONICA', I2, ' ES UN
HORNO DE ARCO')

        READ (3,*) NODFA, NOarm, QFA, Angdisp

        WRITE (2,13) NOarm, NODFA, QFA, Angdisp
13     FORMAT(2/,2X,'NUMERO DE ARMONICAS INYECTADAS POR EL
HORNO DE ARCO', I5,/,2X,'EL HORNO DE ARCO ESTA CONECTADO AL
NODO', I6,&
        /,2X,'LA POTENCIA DEL HORNO DE ARCO ES',
F10.5,/,2X,'CON UN FACTOR DE POTENCIA',F10.5)

        ALLOCATE (Arm(NOarm), IFA(NOarm), angFA(NOarm),
Iarm(NOarm))

        DO i=1, NOarm

            READ (3,*) Arm(i), IFA(i), AngFA(i)

            Iarm(i) = IFA(i) * COSD(AngFA(i)) + ((0.0,1.0) *
IFA(i) * SIND(AngFA(i)))

        END DO

        WRITE(2,14)
14     FORMAT(2/,12X,'ARMONICA',6X,'% DE LA CORRIENTE
FUNDAMENTAL', 6X, 'ANG DE DEFASAMIENTO')

        DO i=1, NOarm

            WRITE(2,15) Arm(i), IFA(i), AngFA(i)
15     FORMAT(12X,I4,17X,F10.5,17X,F10.5)

        END DO

    END IF

END SUBROUTINE
```

C.4 SUBROUTINA CDATOS

```
SUBROUTINE CDATOS

USE mData01
USE mData02
USE mData03
USE mData04
USE mData05
USE mData06
USE mData07
```

```

USE mData08
USE mData09

IMPLICIT NONE

INTEGER :: i
REAL :: aux
COMPLEX :: aux1

Ih = (0.0,0.0)

DO i=1, NOcap
    Zcap(i) = 0.0+((0.0,-
1.0)*((magV(nodcap(i))**2)/(Qcap(i)/MVAbase)))
    Zcap(i) = Zcap(i)/Arm(h)
END DO

DO i=1, NOcarga
    aux = 0.0
    R(i) = magV(nodcarga(i))**2/(Pcarga(i)/MVAbase)
    aux = (Qcarga(i)/Pcarga(i))-0.74
    XL(i) = 0.0 + ((0.0,1.0)*(R(i)/(6.7*aux)))
    XL(i) = Arm(h)* XL(i)
    XS(i) = 0.0 + (0.0,1.0)*0.073*R(i)
    XS(i) = Arm(h) * XS(i)
    Zcar(i)= ((R(i)*XL(i))/(R(i)+XL(i)))+XS(i)
END DO

DO i=1, NOlin
    Zlin(i) = rpq(i) + ((0.0,1.0) * ipq(i) * Arm(h))
    Ylin(i) = (0.0,1.0) * ypq2(i) * Arm(h)
END DO

DO i=1, NOgen
    Zgen(i) = (0.0,1.0) * Igen(i) * Arm(h)
END DO

aux = 0.0

```

```
aux1 = (0.0, 0.0)
aux = (QFA/MVAbase)
aux1 = aux*COSD(angDisp)+((0.0,1.0)* aux * SIND(angDisp))
Ih(nodFA) = aux1/(SQRT(3.0)*CONJG(V(nodFA)))
WRITE(*,*) 'Corr', Ih(nodFA)
PAUSE
Ih(nodFA) = Ih(nodFA) * Iarm(h)
END SUBROUTINE
```

C.5 SUBROUTINA CYBUS

```
SUBROUTINE CYBUS

  USE mData01
  USE mData02
  USE mData03
  USE mData04
  USE mData05
  USE mData06
  USE mData07
  USE mData08
  USE mData09

  IMPLICIT NONE

  !ESPECIFICACION DE VARIABLES

  INTEGER :: nodo, ele, i, j

  !!LLENA LA DIAGONAL PRINCIPAL DE YBUS

  PRINT *, 'LLEGUE A CYBUS'

  Yh = (0.0,0.0)

  DO nodo=1,NOnodos

    DO ele=1, NOlin

      IF ((p(ele) .EQ. nodo) .OR. (q(ele) .EQ. nodo)) THEN
```

```

                Yh(nodo,nodo) = Yh(nodo,nodo) + 1.0 / Zlin(ele)
+ Ylin(ele)
                END IF
            END DO
        END DO
        DO i=1, NOgen
            Yh(Nodgen(i),Nodgen(i))= Yh(Nodgen(i),Nodgen(i)) +
1.0 / Zgen(i)
        END DO
        IF (NOtrafo .NE. 0) THEN
            DO i=i, NOtrafo
                Yh(Nodtrafo(i),Nodtrafo(i))=
Yh(Nodtrafo(i),Nodtrafo(i)) + 1.0 / Ztrafo(i)
            END DO
        END IF
        IF (NOcap .NE. 0) THEN
            DO i=1, NOcap
                Yh(Nodcap(i),Nodcap(i))= Yh(Nodcap(i),Nodcap(i))
+ 1.0 / Zcap(i)
            END DO
        END IF
        DO i=1,NOcarga
            Yh(Nodcarga(i),Nodcarga(i))=
Yh(Nodcarga(i),Nodcarga(i)) + 1.0 / Zcar(i)
        END DO
!LLENA ELEMENTOS FUERA DE LA DIAGONAL PRINCIPAL
        DO i=1,NOodos
            DO j=i+1, NOodos
                DO ele=1, Nolin
                    IF ((i .EQ. p(ele)) .AND. (j .EQ. q(ele))) THEN

```

```
        Yh(i,j) = Yh(i,j) - 1.0 / Zlin(ele)
        Yh(j,i)= Yh(i,j)
    END IF
END DO
END DO
END DO
!IMPRIME LA MATRIZ Ybus TRIANGULAR SUPERIOR
PRINT *, 'TERMINE YBUS'
END SUBROUTINE
```

C.6 SUBROUTINA SOLFLUJ

```
    SUBROUTINE SOLFLUJ
    USE mData01
    USE mData02
    USE mData03
    USE mData04
    USE mData05
    USE mData06
    USE mData07
    USE mData08
    USE mData09
    IMPLICIT NONE
    INTEGER :: i, j
    CALL LINCG(NOnodos, Yh, NOnodos, invYh, NOnodos)
    CALL
MCRCCR(NOnodos, NOnodos, invYh, NOnodos, NOnodos, 1, Ih, NOnodos, NOnodos
, 1, Vh, NOnodos)
    DO i=1 , NOnodos
        Vharm(i,h) = Vh(i)
!        WRITE(*,*) Vh(i)
!        PAUSE
        Vharmon(i, Arm(h), Armon) = Vh(i)
    END DO
```

END SUBROUTINE

C.7 SUBROUTINA THD

```

SUBROUTINE THD

USE mData01
USE mData03
USE mData08
USE mData09

IMPLICIT NONE

INTEGER :: i, j
REAL :: aux, aux2

ALLOCATE (THDV(NOnodos))

THDV = 0.0

DO i=1, NOnodos

    DO j=1, NOarm

        THDV(i) = THDV(i) + (ABS(Vharm(i,j))**2)

    END DO

    THDV(i) = SQRT(THDV(i))/ABS(magV(i))

END DO

WRITE (2,01)
01  FORMAT(3/,9X,'---- R E S U L T A D O S      D E      L
A   P E N E T R A C I O N ----',&
        /,26X,'---- A R M O N I C A ----')
WRITE(2,02)
02  FORMAT(2/,02X,'NODO',2X,'ARMONICA',4X,'MAG.      DE
VOLTAJE',4X,'ANG. DE VOLTAJE')

DO i=1, NOnodos

    DO j=1, NOarm

        aux = ABS(Vharm(i,j))

        IF ((REAL(Vharm(i,j)) .LT. 0) .AND. (IMAG(Vharm(i,j))
.GT. 0)) THEN

            aux2 = ATAND(IMAG(Vharm(i,j))/REAL(Vharm(i,j)))
            aux2 = aux2 + 180.0

```

```

                ELSE IF ((REAL(Vharm(i,j)) .LT. 0) .AND.
(IMAG(Vharm(i,j)) .LT. 0)) THEN

                    aux2 = ATAND(IMAG(Vharm(i,j))/REAL(Vharm(i,j)))
                    aux2 = aux2 - 180.0

                ELSE

                    aux2 = ATAND(IMAG(Vharm(i,j))/REAL(Vharm(i,j)))

                END IF

                WRITE (2,03) i, Arm(j), aux, aux2
03      FORMAT (2X,I3, 5X, I3, 4X,F13.6, 8X,F13.6)

                END DO

            END DO

            WRITE(2,04)
04      FORMAT(3/,9X,'----- D I S T O R C I O N       A R M
O N I C A -----',&
                /,25X,' ----- T O T A L -----')
            WRITE(2,05)
05      FORMAT(2/,02X,'NODO',11X,'THD')

            DO i=1, Nonodos

                WRITE (2,06) i, THDV(i)
06      FORMAT (2X,I3, 4X,F13.6)

            END DO

END SUBROUTINE

```

C.8 SUBROUTINA THDTOT

```

SUBROUTINE THDTOT

USE MDATA01
USE MDATA03
USE MDATA08
USE MDATA09

IMPLICIT NONE

INTEGER :: I, J, K
REAL :: AUX, AUX2
COMPLEX,ALLOCATABLE :: VHARMONTOT(:, :)

ALLOCATE (THDVTOT(NONODOS), VHARMONTOT(NONODOS, 50))

```

```

THDVTOT = 0.0

DO I=1, NONODOS

    DO J=1, 50

        DO K=1, NOFARM

            VHARMONTOT(I,J) = VHARMONTOT(I,J) +
VHARMON(I,J,K)

        END DO

    END DO

END DO

DO I=1, NONODOS

    DO J=1, 50

        THDVTOT(I) = THDVTOT(I) +
(ABS(VHARMONTOT(I,J))**2)

    END DO

    THDVTOT(I) = SQRT(THDVTOT(I))/ABS(MAGV(I))

END DO

WRITE (2,01)
01 FORMAT(3/,9X,'---- R E S U L T A D O S   D E   L A
P E N E T R A C I O N ----',&
/,26X,' ---- A R M O N I C A   T O T A
L   D E   L A S   F U E N T E S ----')
WRITE(2,02)
02 FORMAT(2/,02X,'NODO',2X,'ARMONICA',4X,'MAG. DE
VOLTAJE',4X,'ANG. DE VOLTAJE')

DO I=1, NONODOS

    DO J=1, 50

        IF (VHARMONTOT(I,J) .NE. (0.0,0.0)) THEN

            AUX = ABS(VHARMONTOT(I,J))

            IF ((REAL(VHARMONTOT(I,J)) .LT. 0) .AND.
(IMAG(VHARMONTOT(I,J)) .GT. 0)) THEN

                AUX2 =
ATAND(IMAG(VHARMONTOT(I,J))/REAL(VHARMONTOT(I,J)))
                AUX2 = AUX2 + 180.0

```



```

                                ELSE IF ((REAL(VHARMONTOT(I,J)) .LT. 0)
.AND. (IMAG(VHARMONTOT(I,J)) .LT. 0)) THEN

                                AUX2 =
ATAND (IMAG(VHARMONTOT(I,J))/REAL(VHARMONTOT(I,J)))
                                AUX2 = AUX2 - 180.0

                                ELSE

                                AUX2 =
ATAND (IMAG(VHARMONTOT(I,J))/REAL(VHARMONTOT(I,J)))

                                END IF

                                WRITE (2,03) I, J, AUX, AUX2
03      FORMAT (2X,I3, 5X, I3, 4X,F13.6, 8X,F13.6)

                                END IF

                                END DO

                                END DO

                                WRITE(2,04)
04      FORMAT(3/,9X,'---- D I S T O R C I O N   A R M O
N I C A ----',&
                                /,25X,' ---- T O T A L ----')
                                WRITE(2,05)
05      FORMAT(2/,02X,'NODO',11X,'THDTOTAL')

                                DO I=1, NONODOS

                                WRITE (2,06) I, THDVTOT(I)
06      FORMAT (2X,I3, 4X,F13.6)

                                END DO

                                END SUBROUTINE

```

C.9 ARCHIVO DE ENTRADA

Para este programa se realizaron dos archivos de entrada, el primero se muestra en la figura C.1, contiene los datos de la red con la siguiente estructura:

Núm de nodos	Nú de líneas	Núm de generadores	Núm de cargas	Núm de capacitores	Potencia base
--------------	--------------	--------------------	---------------	--------------------	---------------

Nodo de envío	Nodo de recepción	Impedancia de la línea	Admitancia en paralelo	Diferenciador entre línea y transformador 0 = Trafo 1 = Línea
---------------	-------------------	------------------------	------------------------	---

Nodo del generador	Impedancia del generador	Potencia Activa generada
--------------------	--------------------------	--------------------------

Nodo de la carga	Potencia Activa demandada	Potencia Reactiva demandada	Magnitud de Voltaje en la carga
------------------	---------------------------	-----------------------------	---------------------------------

Nodo del capacitor	Potencia Reactiva del capacitor	Magnitud de Voltaje en el capacitor
--------------------	---------------------------------	-------------------------------------

Tipo de Nodo 1 = Slack 0 = Nodo PV 2 = Nodo PQ	Magnitud del Voltaje	Ángulo del Voltaje
---	----------------------	--------------------

```

5      7      2      3      1      100.0
      1      2      0.02  0.06  0.03  0
      1      3      0.08  0.24  0.025 0
      2      3      0.06  0.18  0.02  0
      2      4      0.06  0.18  0.02  0
      2      5      0.04  0.12  0.015 0
      3      4      0.01  0.03  0.01  0
      4      5      0.08  0.24  0.025 0

      1      0.0001
      2      0.001

      3      45.0  20.0
      4      80.0  30.0
      5      50.0  25.0

      4      30.0

      1      1.05  0.0
      0      1.0  -2.6944
      2      0.9796 -6.2114
      2      0.9776 -6.9232
      2      0.9922 -6.6963
    
```

Fig. C.1 Primer archivo de entrada con los datos de la red

El segundo archivo de entrada se muestra en la figura C.2, y contiene los datos de la fuente de armónicas con la siguiente estructura:

Núm de fuentes armónicas

Tipo de fuente armónica

Nodo de la fuente	Núm de armónicas inyectadas por la fuente	Potencia Reactiva de la fuente	Ángulo de disparo en caso que exista
-------------------	---	--------------------------------	--------------------------------------

Armónica	% de la corriente fundamental	Ángulo de desfaseamiento con la corriente fundamental
----------	-------------------------------	---

```

1
1
5 8 40.0 90.0
5 5.05 0.0
7 2.59 0.0
11 1.05 0.0
13 0.75 0.0
17 0.44 0.0
19 0.35 0.0
23 0.24 0.0
25 0.2 0.0
    
```

Fig. C.2 Segundo archivo de entrada con los datos de la fuente armónica

C.3 ARCHIVO DE SALIDA

El archivo de salida consta de tres partes que se muestra en las figuras C.3, C.4 y C.5. La primer parte (figura C.3) es la reimpresión de los datos de la red, la segunda (figura C.4) la reimpresión de los datos de las fuentes armónicas y la última os voltajes armónicos calculados, además de las Distorsión Armónica Total.

```

Snod1.res - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
---- D A T O S   D E   E N T R A D A ----

NUMERO DE NODOS = 5
NUMERO DE LINEAS = 7
NUMERO DE GENERADORES = 2
NUMERO DE CARGAS = 3
NUMERO DE CAPACITORES = 1

---- D A T O S   D E   L I N E A S ----

      IMPEDANCIAS Y ADMITANCIAS PRIMITIVAS
LINEA NR   NR   IMPEDANCIA SERIE      ypq/2
  1   1   2   .02000 +.06000+j +.030000.0 +j
  2   1   3   .08000 +.24000+j +.025000.0 +j
  3   2   3   .06000 +.18000+j +.020000.0 +j
  4   2   4   .06000 +.18000+j +.020000.0 +j
  5   2   5   .04000 +.12000+j +.015000.0 +j
  6   3   4   .01000 +.03000+j +.010000.0 +j
  7   4   5   .08000 +.24000+j +.025000.0 +j

---- D A T O S   D E   L O S   T R A F O S. ----

      IMPEDANCIAS Y ADMITANCIAS PRIMITIVAS
TRANSF. NR   NR   IMPEDANCIA SERIE      ypq/2

---- D A T O S   D E   L   G E N E R A D O R ----

GENERADOR NODO   IMPEDANCIA DEL GEN
  1         1     .00010
  2         2     .00100

---- D A T O S   D E   L A S   C A R G A S ----

CARGA   NODO   POTENCIA ACTIVA (MW).   POTENCIA REACTIVA (MVAR)

```

Fig. C.3 Primer Sección del archivo de salida

```

Snod1.res - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
---- D A T O S   D E   L O S   C A P A C I T O R E S ----

CAPACITOR   NODO   POTENCIA REACTIVA (MVAR)
  1         4     30.00000

--- V O L T A J E S   D E   L   E S T U D I O ---
      --- D E F L U J O S ---

NODO   TIPO DE NODO      VOLTAJE (p.u.)   P GENERADA (p.u.)   Q GENERADA (p.u.)   P DE CARGA(p.u.)   Q DE CARGA (p
  1     Slack          1.05000<-      .00000
  2     Gener          1.00000<-      -2.69440
  3     Carga           .97960<-      -6.21140
  4     Carga           .97760<-      -6.92320
  5     Carga           .99220<-      -6.69630

---- D A T O S   D E   L A S   F U E N T E S ---
      --- A R M O N I C A S ---

--- LA FUENTE ARMONICA 1 ES UN COMPENSADOR ESTATICO DE VARS

NUMERO DE ARMONICAS INYECTADAS POR EL COMPENSADOR ESTATICO DE VARS   8
EL COMPENSADOR ESTATICO DE VARS ESTA CONECTADO AL NODO   5
LA POTENCIA DEL COMPENSADOR ESTATICO DE VARS ES 40.00000
COM UN ANGULO DE DISPARO 90.00000

ARMONICA   % DE LA CORRIENTE FUNDAMENTAL   ANG DE DEFASAMIENTO
  5          5.05000                  .00000
  7          2.59000                  .00000
 11          1.05000                  .00000
 13          .75000                   .00000
 17          .44000                   .00000
 19          .35000                   .00000
 23          .24000                   .00000
 25          .20000                   .00000

```

Fig. C.4 Segunda Sección del archivo de salida

```

---- R E S U L T A D O S   D E   L A   P E N E T R A C I O N ----
---- A R M O N I C A ----

NODO  ARMONICA      MAG. DE VOLTAJE      ANG. DE VOLTAJE
1      5              .000076              108.121900
1      7              .000052              58.543140
1      11             .000010              -4.728740
1      13             .000005              -16.527260
1      17             .000002              -40.393100
1      19             .000001              -66.914120
1      23             .000000              162.952300
1      25             .000000              142.819900
2      5              .005705              137.756300
2      7              .002964              118.915500
2      11             .001536              147.369300
2      13             .001586              148.113900
2      17             .002009              137.443200
2      19             .002573              120.683900
2      23             .002155              39.513390
2      25             .001227              19.029350
3      5              .164046              99.919360
3      7              .121008              50.809350
3      11             .029739              -11.688730
3      13             .018437              -22.731200
3      17             .012373              -42.191330
3      19             .013101              -61.169170
3      23             .009242              -146.112400
3      25             .005472              -169.176800
4      5              .206027              103.588100
4      7              .150595              55.324210
4      11             .035146              -6.193572
4      13             .020785              -16.899410
4      17             .012009              -35.559470
4      19             .011373              -53.897960
4      23             .005677              -136.225000
4      25             .002530              -156.226600
5      5              .517212              148.764300
5      7              .327645              145.767800
5      11             .228912              150.374000
5      13             .219951              148.304700
5      17             .260092              136.653500
5      19             .326777              119.839200
5      23             .266187              38.673360
5      25             .150037              18.173770

---- D I S T R I B U C I O N   A R M O N I C A ----
---- T O T A L ----
NODO      THD
    
```

Fig. C.5 Tercera Sección del archivo de salida

APÉNDICE D

PROGRAMAS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE FUENTES ARMÓNICAS

D.1 MÉTODO DE HEYDT

D.1.1 RUTINA PRINCIPAL HARM_EST

```

PROGRAM HARM_EST

USE mData01
USE mData02
USE mData03
USE mData04
USE mData05
USE mData06
USE mData07
USE MSIMSLMS
USE MSIMSLC

IMPLICIT NONE

CALL PRESENTA

CALL LEEDATOS

ALLOCATE (Zcap(NOcap), Ycap(NOcap), Zcar(NOcarga), Ycar(NOcarga), XL(NOcarga),
          R(NOcarga),
          Zlin(NOlin), Ylin(NOlin), Zgenh(NOgen))
ALLOCATE (XS(NOcarga),
          Yh(NOnodos, NOnodos))
ALLOCATE (MATG(desc, desc), MATH(desc, NOmedh), MATJ(NOmedh, desc),
          MATK(NOmedh, NOmedh))
ALLOCATE (MATJT(desc, NOmedh), AUX1(desc, desc),
          invAUX1(desc, desc))
ALLOCATE (PinvJ(desc, NOmedh), Ibk(NOmedh), Vbk(NOmedh),
          AUX2(desc, 1), AUX3(desc, 1))
ALLOCATE (AUX4(desc, NOmedh), MING(desc, desc), AUX5(desc, NOmedh), AUX6(desc, N
          Omedh), AUX7(desc, 1))
ALLOCATE (Ibu(desc), magI(desc), angI(desc),
          Iharm(NOnodos))
ALLOCATE (invYh(Nonodos, Nonodos), Vharm(NOnodos),
          Vharmon(NOnodos, NOharm))

DO h=1, NOharm

```

```
CALL CDATOS

CALL CYBUS

CALL MATR

CALL ESTIM

END DO

CALL THD

END PROGRAM
```

D.1.2 SUBROUTINA LEEDATOS

```
!LEE LOS DATOS DEL ARCHIVO DE DATOS DADO

SUBROUTINE LEEDATOS

USE mData01
USE mData02
USE mData03
USE mData04
USE mData05
USE mData06
USE mData07

IMPLICIT NONE

INTEGER :: nod, ele, i, j, l, m

CHARACTER(40) :: FECHA

INTEGER(4) hora(3)

CALL ITIME (hora)

CALL DATE (FECHA)

READ(1,*)Nonodos, Nolin, NOgen, NOtrafo, NOcarga, NOcap,
Nomedh, MVAbase

!!LECTURA DE LOS DATOS DE LAS LÍNEAS

ALLOCATE (p(Nolin), q(Nolin), tipoE(Nolin), zpq(Nolin),
ypq2(Nolin), indtr(Nolin))

zpq = (0.0,0.0)
ypq2 = (0.0,0.0)

!!ESCRIBE FECHA Y HORA EN EL ARCHIVO DE SALIDA
```

```

        WRITE(2,18)archres
18  FORMAT(      3/,'>>NOMBRE DEL ARCHIVO DE SALIDA : ',A20)

        WRITE (2,19)FECHA
19  FORMAT (3/,'>> FECHA : ',A40)

        WRITE(2,20) hora
20  FORMAT (3/,'>> HORA : ',1X,I2,':',I2,':',I2)

!LEE DATOS DE CADA LINEA

        DO ele=1, Nolin

                WRITE (*,*) ele

                PAUSE

                READ(1,*) p(ele), q(ele), zpq(ele), tipoE(ele)

                IF( tipoE(ele) .EQ. 1 )THEN

                        READ(1,*) ypq2(ele)

                END IF

        END DO

! IMPRIME LOS DATOS DE LA LINEAS

        WRITE(2,01)
01  FORMAT(3/,9X,'----- D A T O S   D E   E N T R A D
A ----')
        WRITE(2,02) NOnodos, Nolin, NOgen, NOtrafo, Nocarga, Nocap
02  FORMAT(2/,'NUMERO DE NODOS = ',I3,1/,'NUMERO DE LINEAS =
',I3,1/,'NUMERO DE GENERADORES = ',I3,&
        1/,'NUMERO DE TRANSFORMADORES = ',I3,1/,'NUMERO DE
CARGAS = ',I3, 1/,'NUMERO DE CAPACITORES = ',I3)
        WRITE(2,03)
03  FORMAT(3/,9X,'----- D A T O S   D E   L I N E A S
----')
        WRITE(2,04)
04  FORMAT(2/,19X,'IMPEDANCIAS Y ADMITANCIAS PRIMITIVAS',&
        1/,10X,'LINEA',2X,'NE',5X,'NR',4X,'IMPEDANCIA
SERIE',9X,'ypq/2')

        DO ele=1,Nolin

                WRITE(2,05)ele, p(ele), q(ele), zpq(ele), ypq2(ele)
05
FORMAT(12X,I3,I6,I6,F10.5,SP,F8.5,SS,'j',3X,F8.5,SP,F8.5,SS,'j')

        END DO

```



```
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!LECTURA DE DATOS DE LOS GENERADORES

      ALLOCATE( nodgen(NOgen), Zgen(NOgen))

      DO ele=1, NOgen

          READ(1,*)nodgen(ele), Zgen(ele)

      END DO

!IMPRIME LOS DATOS DE LOS GENERADORES

      WRITE(2,06)
06 FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S      D E L      G E N E R
A D O R ----')
      WRITE(2,07)
07 FORMAT(2/,10X,'GENERADOR',2X,'NODO',4X,'IMPEDANCIA DEL GEN')

      DO ele=1,NOgen

          WRITE(2,08)ele, nodgen(ele), Zgen(ele)
08 FORMAT(12X,I3,3X,I6,2X,F10.5,SP,F8.5,SS,'j')

      END DO

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!LECTURA DE DATOS DE LOS TRANSFORMADORES

      ALLOCATE(      nodtrafo(NOtrafo),      Ztrafo(NOtrafo),
Ptrrafo(NOtrafo))

      IF (NOtrafo .NE. 0) THEN

          DO ele=1, NOtrafo

              READ(1,*)nodtrafo(ele), Ztrafo(ele), Ptrrafo(ele)

          END DO

!IMPRIME LOS DATOS DE LOS TRANSF.

      WRITE(2,09)
09 FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S      D E L      T R A
N S F O R M A D O R ----')
      WRITE(2,10)
10 FORMAT(2/,10X,'TRANSFORMADOR',2X,'NODO',4X,'IMPEDANCIA
DEL TRANS.',4X,'POTENCIA (MW)')

      DO ele=1,NOtrafo
```

```

WRITE(2,11)ele,      nodtrafo(ele),      Ztrafo(ele),
Ptrrafo(ele)
      11
FORMAT(12X,I3,3X,I6,2X,F10.5,SP,F8.5,SS,'j',7X,F10.5)

      END DO

      ELSE

      WRITE(*,*) 'EL SISTEMA NO TIENE CONECTADO NINGUN
TRANSFORMADOR'

      END IF

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!LECTURA DE DATOS DE LAS CARGAS

      ALLOCATE(      nodcarga(NOcarga),      Qcarga(NOcarga),
Pcarga(NOcarga), magVcarga(NOcarga))

      DO ele=1, NOcarga

      READ(1,*)nodcarga(ele),      Pcarga(ele),      Qcarga(ele),
magVcarga(ele)

      END DO

!!IMPRIME LOS DATOS DE LA CARGA

      WRITE(2,12)
12  FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S      D E      L A S      C A
R G A S ----')
      WRITE(2,13)
13  FORMAT(2/,12X,'CARGA',4X,'NODO',4X,'POTENCIA      ACTIVA
(MW).',4X,'POTENCIA REACTIVA (MVAR)', 4X,'MAG. DEL VOLTAJE DE LA
CARGA')

      DO ele=1,NOcarga

      WRITE(2,14)ele,      nodcarga(ele),      Pcarga(ele),
Qcarga(ele), magVcarga(ele)
      14  FORMAT(12X,I3,3X,I6,8X,F10.5,16X,F10.5,16X,F10.5)

      END DO

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!LECTURA DE DATOS DE LOS CAPACITORES

      ALLOCATE( nodcap(NOcap), Qcap(NOcap), magVcap(NOcap))

      IF (NOcap .NE. 0) THEN

```

```

DO ele=1, NOcap
    READ(1,*)nodcap(ele), Qcap(ele), magVcap(ele)
END DO

!!IMPRIME LOS DATOS DE LOS CAPACITORES

    WRITE(2,15)
15  FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S D E L O S
C A P A C I T O R E S ----')
    WRITE(2,16)
16  FORMAT(2/,10X,'CAPACITOR',4X,'NODO',4X,'POTENCIA
REACTIVA (MVAR)',4X,'MAG. DE VOLTAJE DEL CAPACITOR')

DO ele=1,NOcap

    WRITE(2,17)ele,      nodcap(ele),      Qcap(ele),
magVcap(ele)
17  FORMAT(12X,I3,3X,I6,8X,F10.5,8X,F10.5)

END DO

ELSE

    WRITE(*,*) 'EL SISTEMA NO TIENE CONECTADO NINGUN
CAPACITOR'

END IF

ALLOCATE (magV(NOnodos), angV(NOnodos), V(NOnodos))

DO nod=1, NOnodos

    READ (1,*) magV(nod), angV(nod)

!    WRITE(*,*) magV(nod), angV(nod)

!    PAUSE

    V(nod) = (magV(nod) * COSD(angV(nod))) + ((0.0,1.0) *
(magV(nod) * SIND(angV(nod))))

END DO

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!LEE LAS MEDICIONES DE LAS ARMÓNICAS (VOLTAJES Y CORRIENTES)

READ (1,*) NOharm

ALLOCATE      (harm(NOharm),      nodh(NOmedh,NOharm),
magVh(NOmedh,NOharm))

```

```
        ALLOCATE (thetah(NOmedh,NOharm), magIh(NOmedh,NOharm),
angIh(NOmedh,NOharm))
        ALLOCATE (Vh(NOmedh,NOharm), Ih(NOmedh,NOharm))

        DO i=1, NOharm

                READ (1,*) harm(i)

                DO j=1, NOmedh

                        READ (1,*) nodh(j,i), magVh(j,i), thetah(j,i),
magIh(j,i), angIh(j,i)

                END DO

        END DO

        DO i=1, NOharm

                DO j=1, NOmedh

                        Vh(j,i) =
magVh(j,i)*(COSD(thetah(j,i))+(0.0,1.0)*SIND(thetah(j,i)))

                        Ih(j,i)=
magIh(j,i)*(COSD(angIh(j,i))+(0.0,1.0)*SIND(angIh(j,i)))

                END DO

        END DO

        desc = NONodos - NOmedh

        ALLOCATE (nodes(desc))

        DO i=1, NONodos

                l = 0

                DO j=1, NOmedh

                        IF (i .NE. nodh(j,1)) THEN

                                l=l+1

                                IF (L .EQ. NOmedh) THEN

                                        m = m+1

                                        nodes(m) = i

                                END IF

                        END IF

                END IF

        END IF
```

```

        END DO

    END DO

    DO i=1, desc

        WRITE (*,*) i, nodes(i)

        PAUSE

    END DO

!IMPRIME LOS DATOS DE LA FUENTE

        WRITE(2,30)
30  FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S      D E      L A S
M E D I C I O N E S ----')

    DO i=1, NOharm

        WRITE(2,31)
31  FORMAT(2/,10X,'HARMONICA')
        WRITE(2,32)harm(i)
32  FORMAT(12X,I3)
        WRITE(2,33)
33  FORMAT(2/,10X,'NODO',4X,'MAG. DEL VOLTAJE',4X,'ANG. DEL
VOLTAJE',4X,'MAG. DE CORRIENTE',4X,'ANG. DE LA CORRIENTE')

        DO j=1, NOmedh

            WRITE(2,34)nodh(j,i), magVh(j,i), thetah(j,i),
magIh(j,i), angIh(j,i)
34
FORMAT(12X,I3,8X,F10.5,8X,F10.5,8X,F10.5,8X,F10.5)

        END DO

    END DO

END SUBROUTINE

```

D.1.3 SUBROUTINA MATR

```

SUBROUTINE MATR

USE mData01
USE mData07

IMPLICIT NONE

INTEGER :: i, j

!DIVIDIENDO LA MATRIZ YBUS Y REACOMODANDOLA PARA LA ESTIMACION

```

```
DO i=1, desc
    DO j=1, desc
        MATG(i,j) = Yh(nodes(i), nodes(j))
    END DO
END DO

DO i=1, desc
    DO j=1, NOmedh
        MATH(i,j) = Yh(nodes(i), nodh(j,h))
    END DO
END DO

DO i=1, NOmedh
    DO j=1, desc
        MATJ(i,j) = Yh(nodh(i,h), nodes(j))
    END DO
END DO

DO i=1, NOmedh
    DO j=1, NOmedh
        MATK(i,j) = Yh(nodh(i,h), nodh(j,h))
    END DO
END DO

!!!CALCULO DE LA PSEUDOINVERSA DE J

DO i=1, NOmedh
    DO j=1, desc
        MATJT(j,i) = REAL(MATJ(i,j)) + ((0.0,-1.0) *
IMAG(MATJ(i,j)))
    END DO
END DO
```

```
CALL
MCRCR(desc,Nomedh,MATJT,desc,Nomedh,desc,MATJ,Nomedh,desc,desc,A
UX1,desc)
```

```
CALL LINCG(desc,AUX1,desc,invAUX1, desc)
```

```
! CALL LINRG (desc,AUXI,desc,invAUXI,desc)
```

```
CALL
MCRCR(desc,desc,invAUX1,desc,desc,Nomedh,MATJT,desc,desc,Nomedh,
PinvJ,desc)
```

```
END SUBROUTINE
```

D.1.4 SUBROUTINA ESTIM

```
SUBROUTINE ESTIM
```

```
USE mData01
```

```
USE mData07
```

```
IMPLICIT NONE
```

```
INTEGER :: i, j
```

```
DO i = 1, Nomedh
```

```
    Ibk(i) = Ih(i,h)
```

```
    Vbk(i) = Vh(i,h)
```

```
END DO
```

```
CALL
```

```
MCRCR(desc,Nomedh,PinvJ,desc,Nomedh,1,Ibk,Nomedh,desc,1,AUX2,des
c)
```

```
CALL
```

```
MCRCR(desc,desc,MATG,desc,desc,1,AUX2,desc,desc,1,AUX3,desc)
```

```
CALL
```

```
MCRCR(desc,Nomedh,PinvJ,desc,Nomedh,Nomedh,MATK,Nomedh,desc,Nome
dh,AUX4,desc)
```

```
DO i=1, desc
```

```
    DO j=1,desc
```

```
        MING(i,j) = -1.0 * MATG(i,j)
```

```
    END DO
```

```
END DO
```

```
CALL
MCRCR(desc,desc,MING,desc,desc,NOmedh,AUX4,desc,desc,NOmedh,AUX5
,desc)

DO i=1, desc
    DO j=1, NOmedh
        AUX6(i,j) = AUX5(i,j) + MATH(i,j)
    END DO
END DO

CALL
MCRCR(desc,NOmedh,AUX6,desc,NOmedh,1,Vbk,NOmedh,desc,1,AUX7,desc
)

! THDI(i) = 0.0

Iharm = 0.0

DO i=1, desc
    Ibu(i) = Aux3(i,1) + AUX7(i,1)
    Iharm(nodes(i)) = Ibu(i)
! WRITE(*,*) nodes(i), Iharm(nodes(i)), Ibu(i)
! PAUSE
END DO

CALL LINGG(NOnodos,Yh,NOnodos,invYh,NOnodos)

CALL
MCRCR(NOnodos,NOnodos,invYh,NOnodos,NOnodos,1,Iharm,NOnodos,NOno
dos,1,Vharm,NOnodos)

DO i=1, NOnodos
    Vharmon(i,h) = Vharm(i)
END DO

WRITE(2,10)
10 FORMAT(/,'R E S U L T A D O S',/)

WRITE(2,11)
11 FORMAT(2/,10X,'NODO',4X,'CORRIENTE (NUM COMPL.)',4X,'MAG.
CORRIENTE',4X,'ANG. DE CORRIENTE',/)

DO i=1, desc
```



```
        magI(i) = sqrt(REAL(Ibu(i))**2 + IMAG(Ibu(i))**2)
    END DO

    DO i=1, desc
        IF ((REAL(Ibu(i)) .GT. 0.0) .AND. (IMAG(Ibu(i)) .GE.
0.0)) THEN
            angI(i) = ATAND(IMAG(Ibu(i)) / REAL(Ibu(i)))
        ELSE IF ((REAL(Ibu(i)) .LT. 0.0) .AND. (IMAG(Ibu(i))
.GT. 0.0)) THEN
            angI(i) = ATAND(IMAG(Ibu(i)) / REAL(Ibu(i)))
            angI(i) = angI(i) + 180
        ELSE IF ((REAL(Ibu(i)) .LT. 0.0) .AND. (IMAG(Ibu(i))
.LT. 0.0)) THEN
            angI(i) = ATAND(IMAG(Ibu(i)) / REAL(Ibu(i)))
            angI(i) = angI(i) - 180
        ELSE IF ((REAL(Ibu(i)) .GT. 0.0) .AND. (IMAG(Ibu(i))
.LT. 0.0)) THEN
            angI(i) = ATAND(IMAG(Ibu(i)) / REAL(Ibu(i)))
        ELSE IF (REAL(Ibu(i)) .EQ. 0.0) THEN
            angI(i) = 0.0
        END IF
    END DO

    DO i=1, desc
        WRITE(2,34)nodes(i), REAL(Ibu(i)), IMAG(Ibu(i)),
magI(i), angI(i)
        34 FORMAT(12X,I3,8X,F10.5,'+i',F10.5,8X,F10.5,8X,F10.5)
    END DO

    END SUBROUTINE
```

D.1.5 SUBROUTINA THD

```
SUBROUTINE THD
```

```

USE mData01
USE mData02
USE mData07

IMPLICIT NONE

INTEGER :: i, j
REAL :: auxi, auxi2

ALLOCATE (THDV(NOnodos))

THDV = 0.0

DO i=1, NOnodos
    DO j=1, NOharm
        THDV(i) = THDV(i) + (ABS(Vharmon(i,j))**2)
    END DO
    THDV(i) = SQRT(THDV(i))/ABS(magV(i))
END DO

WRITE (2,01)
01 FORMAT(3/,9X,'---- R E S U L T A D O S      D E      L
A   P E N E T R A C I O N ----',&
        /,26X,' ---- A R M O N I C A ----')
WRITE(2,02)
02          FORMAT(2/,02X,'NODO',2X,'ARMONICA',4X,'MAG.      DE
VOLTAJE',4X,'ANG. DE VOLTAJE')

DO i=1, NOnodos
    DO j=1, NOharm
        WRITE(*,*) i,j, Vharmon(i,j)
    PAUSE
    END DO
END DO

DO i=1, NOnodos
    DO j=1, NOharm
        WRITE(*,*) i,j, Vharmon(i,j)
    PAUSE
    auxi = ABS(Vharmon(i,j))

```

```

                IF      ((REAL(Vharmon(i,j))      .LT.      0)      .AND.
(IMAG(Vharmon(i,j)) .GT. 0)) THEN

                auxi2                                     =
ATAND(IMAG(Vharmon(i,j))/REAL(Vharmon(i,j)))
                auxi2 = auxi2 + 180.0

                ELSE   IF      ((REAL(Vharmon(i,j))      .LT.      0)      .AND.
(IMAG(Vharmon(i,j)) .LT. 0)) THEN

                auxi2                                     =
ATAND(IMAG(Vharmon(i,j))/REAL(Vharmon(i,j)))
                auxi2 = auxi2 - 180.0

                ELSE

                auxi2                                     =
ATAND(IMAG(Vharmon(i,j))/REAL(Vharmon(i,j)))

                END IF

                WRITE (2,03) i, harm(j), auxi, auxi2
03      FORMAT (2X,I3, 5X, I3, 4X,F13.6, 8X,F13.6)

                END DO

                END DO

                WRITE(2,04)
04      FORMAT(3/,9X,'---- D I S T O R C I O N   A R M
O N I C A ----',&
                /,25X,' ---- T O T A L ----')
                WRITE(2,05)
05      FORMAT(2/,02X,'NODO',11X,'THD')

                DO i=1, NOnodos

                WRITE (2,06) i, THDV(i)
06      FORMAT (2X,I3, 4X,F13.6)

                END DO
END SUBROUTINE

```

D.2 ARCHIVO DE ENTRADA

En las figuras D.1 y D.2, se muestra el archivo de entrada para el estimador. La estructura del archivo de entrada es:

Núm de nodos	Nú de líneas	Núm de generadores	Núm de transformadores	Núm de cargas	Núm de capacitores	Núm de nodos medidos	Potencia base
--------------	--------------	--------------------	------------------------	---------------	--------------------	----------------------	---------------

Nodo de envío	Nodo de recepción	Impedancia de la línea	Diferenciador entre línea y transformador 0 = Trafo 1 = Linea
Admitancia en paralelo			

Nodo del generador	Impedancia del generador	Potencia Activa generada
--------------------	--------------------------	--------------------------

Nodo de la carga	Potencia Activa demandada	Potencia Reactiva demandada	Magnitud de Voltaje en la carga
------------------	---------------------------	-----------------------------	---------------------------------

Nodo del capacitor	Potencia Reactiva del capacitor	Magnitud de Voltaje en el capacitor
--------------------	---------------------------------	-------------------------------------

Número de armónicas

Armónica	Nodo	Magnitud del Voltaje	Ángulo del Voltaje	Magnitud de la Corriente	Ángulo de la Corriente
----------	------	----------------------	--------------------	--------------------------	------------------------

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
5	7	2	0	3
			1	3
				100.0
1	2	(0.02, 0.06)	1	
		(0.0,0.03)		
1	3	(0.08,0.24)	1	
		(0.0,0.025)		
2	3	(0.06,0.18)	1	
		(0.0,0.02)		
2	4	(0.06,0.18)	1	
		(0.0,0.02)		
2	5	(0.04,0.12)	1	
		(0.0, 0.015)		
3	4	(0.01,0.03)	1	
		(0.0,0.01)		
4	5	(0.08,0.24)	1	
		(0.0,0.025)		
1	(0.0,0.0001)	0.0		
2	(0.0,0.001)	30.0		
3	45.0	20.0	0.9796	
4	80.0	30.0	0.9776	
5	50.0	25.0	0.9922	
4	30.0	0.9776		
6				
5				
	1	0.00007	108.122	0.0 0.0
	2	0.0057	137.756	0.0 0.0
	4	0.20602	103.588	0.0 0.0
7				
	1	0.00005	58.5431	0.0 0.0
	2	0.00296	118.915	0.0 0.0
	4	0.15059	55.3242	0.0 0.0
11				
	1	0.00001	-4.7287	0.0 0.0

Fig. D.1 Primera Sección del archivo de entrada por el método de Heydt

3	45.0	20.0	0.9796	
4	80.0	30.0	0.9776	
5	50.0	25.0	0.9922	
4	30.0	0.9776		
8				
5				
	1	0.00007	108.122	0.0 0.0
	2	0.0057	137.756	0.0 0.0
	4	0.20602	103.588	0.0 0.0
7				
	1	0.00005	58.5431	0.0 0.0
	2	0.00296	118.915	0.0 0.0
	4	0.15059	55.3242	0.0 0.0
11				
	1	0.00001	-4.7287	0.0 0.0
	2	0.00153	147.369	0.0 0.0
	4	0.03514	-6.1935	0.0 0.0
13				
	1	0.000005	-16.527	0.0 0.0
	2	0.001586	148.1139	0.0 0.0
	4	0.020785	-16.8994	0.0 0.0
17				
	1	0.000002	-40.3931	0.0 0.0
	2	0.002009	137.4432	0.0 0.0
	4	0.012009	-35.5594	0.0 0.0
19				
	1	0.000001	-66.9141	0.0 0.0
	2	0.002573	120.6839	0.0 0.0
	4	0.011373	-53.8979	0.0 0.0
23				
	1	0.0	0.0	0.0 0.0
	2	0.00215	39.513	0.0 0.0
	4	0.00567	-136.22	0.0 0.0
25				
	1	0.0	0.0	0.0 0.0
	2	0.00122	19.0293	0.0 0.0
	4	0.00253	-156.22	0.0 0.0

Fig. C.2 Segunda Sección del archivo de entrada por el método de Heydt

D.3 ARCHIVO DE SALIDA

El archivo de salida consta de tres partes que se muestra en las figuras D.3, D.4 y D.5. La primer parte (figura D.3) es la reimpresión de los datos de la red, la segunda (figura D.4) la reimpresión de las mediciones armónicas y la ultima (figura D.5) las corrientes estimadas.

```

harm2.res - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
>> HORA : 21:38:49

---- D A T O S   D E   E N T R A D A ----

NUMERO DE NODOS = 5
NUMERO DE LINEAS = 7
NUMERO DE GENERADORES = 2
NUMERO DE TRANSFORMADORES = 0
NUMERO DE CARGAS = 3
NUMERO DE CAPACITORES = 1

---- D A T O S   D E   L I N E A S ----

      IMPEDANCIAS Y ADMITANCIAS PRIMITIVAS
LINEA  NR  NR  IMPEDANCIA SERIE      YPq/2
  1    1  2   .02000 +.06000j      .00000 +.03000j
  2    1  3   .08000 +.24000j      .00000 +.02500j
  3    2  3   .06000 +.18000j      .00000 +.02000j
  4    2  4   .06000 +.18000j      .00000 +.02000j
  5    2  5   .04000 +.12000j      .00000 +.01500j
  6    3  4   .01000 +.03000j      .00000 +.01000j
  7    4  5   .08000 +.24000j      .00000 +.02500j

---- D A T O S   D E   L   G E N E R A D O R ----

GENERADOR  NODO  IMPEDANCIA DEL GEN
  1         1    .00000 +.00010j
  2         2    .00000 +.00100j

---- D A T O S   D E   L A S   C A R G A S ----

CARGA  NODO  POTENCIA ACTIVA (HW)  POTENCIA REACTIVA (HVAR)  MAG. DEL VOLTAJE DE LA CARGA
  1     3     45.00000      20.00000      .97960
  2     4     80.00000      30.00000      .97760
  3     5     50.00000      25.00000      .99220
    
```

Fig. D.3 Primer Sección del archivo de salida por el método de Heydt

harm2.res - Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

---- D A T O S D E L A S M E D I C I O N E S ----

HARMONICA
5

NODO	MAG. DEL VOLTAJE	ANG. DEL VOLTAJE	MAG. DE CORRIENTE	ANG. DE LA CORRIENTE
1	.00007	103.12200	.00000	.00000
2	.00570	137.75600	.00000	.00000
4	.20602	103.58800	.00000	.00000

HARMONICA
7

NODO	MAG. DEL VOLTAJE	ANG. DEL VOLTAJE	MAG. DE CORRIENTE	ANG. DE LA CORRIENTE
1	.00005	58.54310	.00000	.00000
2	.00296	118.91500	.00000	.00000
4	.15059	55.32420	.00000	.00000

HARMONICA
11

NODO	MAG. DEL VOLTAJE	ANG. DEL VOLTAJE	MAG. DE CORRIENTE	ANG. DE LA CORRIENTE
1	.00001	-4.72870	.00000	.00000
2	.00153	147.36900	.00000	.00000
4	.03514	-6.19350	.00000	.00000

HARMONICA
13

NODO	MAG. DEL VOLTAJE	ANG. DEL VOLTAJE	MAG. DE CORRIENTE	ANG. DE LA CORRIENTE
1	.00000	-16.52700	.00000	.00000
2	.00159	148.11390	.00000	.00000
4	.02079	-16.89940	.00000	.00000

HARMONICA
17

NODO	MAG. DEL VOLTAJE	ANG. DEL VOLTAJE	MAG. DE CORRIENTE	ANG. DE LA CORRIENTE
1	.00000	.00000	.00000	.00000
2	.00159	148.11390	.00000	.00000
4	.02079	-16.89940	.00000	.00000

Fig. D.4 Segunda Sección del archivo de salida por el método de Heydt

harm2.res - Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

NODO	MAG. DEL VOLTAJE	ANG. DEL VOLTAJE	MAG. DE CORRIENTE	ANG. DE LA CORRIENTE
1	.00000	.00000	.00000	.00000
2	.00122	19.02930	.00000	.00000
4	.00253	-156.22000	.00000	.00000

R E S U L T A D O S

NODO	CORRIENTE (NUM COMPL.)	MAG. CORRIENTE	ANG. DE CORRIENTE
3	-.00206+1i	.00048	.00211
5	.13777+1i	1.16690	1.17501
3	-.00031+1i	.00058	.00066
5	.07004+1i	.59784	.60193
3	.00016+1i	.00031	.00035
5	.02834+1i	.24192	.24357
3	.00000+1i	.00000	.00001
5	.02036+1i	.17340	.17459
3	-.00001+1i	-.00002	.00002
5	.01194+1i	.10172	.10242
3	.00002+1i	.00001	.00002
5	.00950+1i	.08090	.08145
3	.00002+1i	-.00004	.00004
5	.00649+1i	.05536	.05574
3	.00003+1i	-.00006	.00007
5	.00539+1i	.04595	.04627

Fig. D.5 Tercera Sección del archivo de salida por el método de Heydt

D.4 MÉTODO DE NGUYEN

D.4.1 RUTINA PRINCIPAL HARM_EST

```

PROGRAM HARM_EST

USE mData01
USE mData02
USE mData03
USE mData04
USE mData05
USE mData06
USE mData07
USE mData08
USE MSIMSLMS
USE MSIMSLC

IMPLICIT NONE

INTEGER :: i

CALL PRESENTA

CALL LEEDATOS

CALL MEDERR

ALLOCATE (Zcap(NOcap), Zcar(NOcarga), R(NOcarga),
XL(NOcarga))
ALLOCATE (XS(NOcarga), Zlin(NOlin),Ylin(NOlin),Zgen(NOgen))
ALLOCATE (Yh(NOnodos,NOodos))
ALLOCATE (Z(NOnodos), VEH(NOnodos,descT), Vest(descT))
ALLOCATE (invH(NOnodos,NOodos))
ALLOCATE (angest(NOnodos), magest(NOnodos))
ALLOCATE (Iharm(NOnodos), Vharm(NOnodos),
invYh(NOnodos,NOodos))
ALLOCATE (angVharm(NOnodos), magVharm(NOnodos))
ALLOCATE (resV(NOmedVh), restotV(NOmedVh))
ALLOCATE (Aux1(descT,descT), invAUX1(descT,descT),
VEHT(descT,NOodos))
ALLOCATE (PinvH(descT,NOodos), THDI(descI),
Vharmon(NOnodos, NOharm))

DO h=1, NOharm

CALL CDATOS

CALL CYBUS

CALL VECTORZ

CALL VECTORH

```



```
CALL ESTIM

CALL VOLTHARM

END DO

CALL THD

END PROGRAM
```

D.4.2 SUBROUTINA LEEDATOS

```
!LEE LOS DATOS DEL ARCHIVO DE DATOS DADO
```

```
SUBROUTINE LEEDATOS
```

```
USE mData01
USE mData02
USE mData03
USE mData04
USE mData05
USE mData06
USE mData07
```

```
IMPLICIT NONE
```

```
INTEGER :: nod, ele, i, j, l, m
```

```
CHARACTER(40) :: FECHA
```

```
INTEGER(4) hora(3)
```

```
CALL ITIME (hora)
```

```
CALL DATE (FECHA)
```

```
READ(1,*)Nodos, Nolin, NOgen, NOcarga, NOcap, NOmedVh,
NOmedIh, NOharm, MVAbase, error
```

```
!!LECTURA DE LOS DATOS DE LAS LÍNEAS
```

```
ALLOCATE (p(Nolin), q(Nolin), tipoE(Nolin), rpq(Nolin),
ipq(Nolin), ypq2(Nolin), indtr(Nolin), zpq(Nolin))
```

```
zpq = (0.0,0.0)
ypq2 = (0.0,0.0)
```

```
!!ESCRIBE FECHA Y HORA EN EL ARCHIVO DE SALIDA
```

```
WRITE(2,18)archres
18 FORMAT( 3/,'>>NOMBRE DEL ARCHIVO DE SALIDA : ',A20)
```

```
WRITE (2,19)FECHA
19 FORMAT (3/,'>> FECHA : ',A40)
```

```

WRITE(2,20) hora
20 FORMAT (3/,'>> HORA : ',1X,I2,':',I2,':',I2)

!LEE DATOS DE CADA LINEA

DO ele=1, Nolin
    READ(1,*) p(ele), q(ele), rpq(ele), ipq(ele),
ypq2(ele) ,indtr(ele)

    zpq(ele) = rpq(ele) + ((0.0,1.0) * ipq(ele))

END DO

! IMPRIME LOS DATOS DE LA LINEAS

WRITE(2,01)
01 FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S D E E N T R A D
A ----')
WRITE(2,02) Nnodos, Nolin, NOgen, NOtrafo, Nocarga, Nocap
02 FORMAT(2/,'NUMERO DE NODOS = ',I3,1/,'NUMERO DE LINEAS =
',I3,1/,'NUMERO DE GENERADORES = ',I3,&
1/,'NUMERO DE TRANSFORMADORES = ',I3,1/,'NUMERO DE
CARGAS = ',I3, 1/,'NUMERO DE CAPACITORES = ',I3)
WRITE(2,03)
03 FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S D E L I N E A S
----')
WRITE(2,04)
04 FORMAT(2/,19X,'IMPEDANCIAS Y ADMITANCIAS PRIMITIVAS',&
1/,10X,'LINEA',2X,'NE',5X,'NR',4X,'IMPEDANCIA
SERIE',9X,'ypq/2', 9X, 'TIPO DE ELEM')

DO ele=1,Nolin

IF (indtr(ele) .EQ. 0) THEN

WRITE(2,05)ele, p(ele), q(ele), rpq(ele),
ipq(ele), ypq2(ele)
05
FORMAT(12X,I3,I6,I6,3X,F10.5,'+j',F8.5,3X,F8.5,5X,'LINEA')

ELSE IF (indtr(ele) .EQ. 1) THEN

WRITE(2,25)ele, p(ele), q(ele), rpq(ele),
ipq(ele), ypq2(ele)
25
FORMAT(12X,I3,I6,I6,3X,F10.5,'+j',F8.5,3X,F8.5,5X,'TRAFO')

END IF

```

```

END DO

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!LECTURA DE DATOS DE LOS GENERADORES

      PAUSE

      ALLOCATE( nodgen(NOgen), igen(NOgen))

      DO ele=1, NOgen

          READ(1,*)nodgen(ele), Igen(ele)

      END DO

!!IMPRIME LOS DATOS DE LOS GENERADORES

      WRITE(2,06)
06  FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S      D E L      G E N E R
A D O R ----')
      WRITE(2,07)
07  FORMAT(2/,10X,'GENERADOR',2X,'NODO',4X,'IMPEDANCIA DEL GEN')

      DO ele=1,NOgen

          WRITE(2,08)ele, nodgen(ele), Igen(ele)
08  FORMAT(12X,I3,3X,I6,2X,F10.5)

      END DO

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!LECTURA DE DATOS DE LAS CARGAS

      ALLOCATE(          nodcarga(NOcarga),          Qcarga(NOcarga),
Pcarga(NOcarga), magVcarga(NOcarga))

      DO ele=1, NOcarga

          READ(1,*)nodcarga(ele), Pcarga(ele), Qcarga(ele),
magVcarga(ele)

      END DO

!!IMPRIME LOS DATOS DE LA CARGA

      WRITE(2,12)
12  FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S      D E      L A S      C A
R G A S ----')
      WRITE(2,13)
13  FORMAT(2/,12X,'CARGA',4X,'NODO',4X,'POTENCIA      ACTIVA
(MW).',4X,'POTENCIA REACTIVA (MVAR)', 4X,'MAG. DEL VOLTAJE DE LA
CARGA')

```

```

DO ele=1,NOcarga

        WRITE(2,14)ele,          nodcarga(ele),          Pcarga(ele),
Qcarga(ele), magVcarga(ele)
        14 FORMAT(12X,I3,3X,I6,8X,F10.5,16X,F10.5,16X,F10.5)

END DO

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!LECTURA DE DATOS DE LOS CAPACITORES

ALLOCATE( nodcap(NOcap), Qcap(NOcap), magVcap(NOcap))

IF (NOcap .NE. 0) THEN

        DO ele=1, NOcap

                READ(1,*)nodcap(ele), Qcap(ele), magVcap(ele)

        END DO

!!IMPRIME LOS DATOS DE LOS CAPACITORES

        WRITE(2,15)
        15 FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S      D E      L O S
C A P A C I T O R E S ----')
        WRITE(2,16)
        16          FORMAT(2/,10X,'CAPACITOR',4X,'NODO',4X,'POTENCIA
REACTIVA (MVAR)',4X,'MAG. DE VOLTAJE DEL CAPACITOR')

        DO ele=1,NOcap

                WRITE(2,17)ele,          nodcap(ele),          Qcap(ele),
magVcap(ele)
                17 FORMAT(12X,I3,3X,I6,8X,F10.5,8X,F10.5)

        END DO

ELSE

        WRITE(*,*) 'EL SISTEMA NO TIENE CONECTADO NINGUN
CAPACITOR'

END IF

!!LECTURA DE LOS VOLTAJES DE FLUJOS

ALLOCATE (magV(NOnodos), angV(NOnodos), V(NOnodos))

DO nod=1, NOnodos

```

```

        READ (1,*) magV(nod), angV(nod)

        V(nod) = (magV(nod) * COSD(angV(nod))) + ((0.0,1.0) *
(magV(nod) * SIND(angV(nod))))

    END DO

!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!!
!!!!LEE LAS MEDICIONES DE LAS ARMÓNICAS (VOLTAJES Y CORRIENTES)

        ALLOCATE      (harm(NOharm),      nodVh(NOmedVh,NOharm),
nodIh(NOmedIh,NOharm), magVh(NOmedVh,NOharm))
        ALLOCATE      (thetah(NOmedVh,NOharm), magIh(NOmedIh,NOharm),
angIh(NOmedIh,NOharm))
        ALLOCATE      (Vh(NOmedVh,NOharm), Ih(NOmedIh,NOharm))

    DO i=1, NOharm

        READ (1,*) harm(i)

    END DO

    DO i=1, NOharm

        DO j=1, NOmedVh

            READ (1,*) nodVh(j,i), magVh(j,i), thetah(j,i)

        END DO

    END DO

    DO i=1, NOharm

        DO j=1, NOmedVh

            Vh(j,i)
magVh(j,i)*(COSD(thetah(j,i))+(0.0,1.0)*SIND(thetah(j,i))) =

        END DO

    END DO

    DO i=1, NOharm

        DO j=1, NOmedIh

            READ (1,*) nodIh(j,i), magIh(j,i), angIh(j,i)

        END DO

    END DO

```

```
DO i=1, NOharm
    DO j=1, NOmedIh
        Ih(j,i)
        magIh(j,i)*(COSD(angIh(j,i))+(0.0,1.0)*SIND(angIh(j,i))) =
    END DO
END DO

descV = NOnodos - NOmedVh
descI = NOnodos - NOmedIh
descT = descV + descI

ALLOCATE (nodesV(descV), nodesI(descI))

DO i=1, NOnodos
    l = 0
    DO j=1, NOmedVh
        IF (i .NE. nodVh(j,1)) THEN
            l=l+1
            IF (l .EQ. NOmedVh) THEN
                m = m+1
                nodesV(m) = i
            END IF
        END IF
    END DO
END DO

m = 0
DO i=1, NOnodos
    l = 0
    DO j=1, NOmedIh
        IF (i .NE. nodIh(j,1)) THEN
            l=l+1
            IF (l .EQ. NOmedIh) THEN
```

```

                                m = m+1

                                nodesI(m) = i

                                END IF

                                END IF

                                END DO

                                END DO

                                DO i=1, descI

                                    WRITE (*,*) i, nodesI(i)

                                    PAUSE

                                END DO

!IMPRIME LAS MEDICIONES

                                WRITE(2,30)
30  FORMAT(3/,9X,'---- D A T O S      D E      L A S
M E D I C I O N E S ----')

                                DO i=1, NOharm

                                    WRITE(2,31)
31  FORMAT(2/,10X,'HARMONICA')
                                    WRITE(2,32)harm(i)
32  FORMAT(12X,I3)
                                    WRITE(2,33)
33  FORMAT(2/,10X,'NODO',4X,'MAG. DEL VOLTAJE',4X,'ANG. DEL
VOLTAJE')

                                    DO j=1, NOmedVh

                                        WRITE(2,34)nodVh(j,i), magVh(j,i), thetah(j,i)
34  FORMAT(12X,I3,8X,F10.5,8X,F10.5)

                                    END DO

                                    WRITE(2,35)
35  FORMAT(2/,10X,'NODO',4X,'MAG. DE CORRIENTE',4X,'ANG. DE
CORRIENTE')

                                    DO j=1, NOmedIh

                                        WRITE(2,36)nodIh(j,i), magIh(j,i), angIh(j,i)
36  FORMAT(12X,I3,8X,F10.5,8X,F10.5)

                                    END DO

```

```
END DO
END SUBROUTINE
```

D.4.3 SUBROUTINA VECTORZ

```
SUBROUTINE VECTORZ

USE mData01
USE mData07
USE mData08

IMPLICIT NONE

INTEGER :: i, j

Z = (0.0,0.0)

DO i=1, NOmedIh
    Z(nodIh(i,h)) = Ih(i,h)
END DO

DO i=1, NOnodos
    DO j=1, NOmedVh
        Z(i) = Z(i) - (Vh(j,h) * Yh(i,nodVh(j,h)))
    END DO
END DO

END SUBROUTINE
```

D.4.4 SUBROUTINA VECTORH

```
SUBROUTINE VECTORH

USE mData01
USE mData07
USE mData08

IMPLICIT NONE

INTEGER :: i, j, k

VEH = (0.0, 0.0)

DO i=1, descI
```



```

        VEH(nodesI(i),i) = (-1.0,0.0)

    END DO

    DO i=1, NOnodos

        DO j=1, descV

            k = j + descI

            VEH(i, k) = Yh(i, nodesV(j))

        END DO

    END DO

!   DO i=1, NOnodos
!
!       DO j=1, descT
!
!           WRITE(2,35)i, j, REAL(VEH(i,j)), IMAG(VEH(i,j))
!           35 FORMAT('V(',I3',',I3,')=',8X,F10.5,'+',F10.5,'i')
!
!       END DO
!
!   END DO

    DO i=1, NOnodos

        DO j=1, descT

            VEHT(j,i) = REAL(VEH(i,j)) + ((0.0,-1.0) *
IMAG(VEH(i,j)))

        END DO

    END DO

!   DO i=1, NOnodos
!
!       DO j=1, descT
!
!           WRITE(*,*) i, j, VEH(4,7)
!
!           PAUSE
!
!       END DO
!
!   END DO

    CALL
MCRRCR(descT,NOnodos,VEHT,descT,NOnodos,descT,VEH,NOnodos,descT,d
escT,AUX1,descT)

```

```
CALL LINGG(descT,AUX1,descT,invAUX1, descT)
! CALL LINRG (desc,AUXI,desc,invAUXI,desc)

CALL
MCRCR(descT,descT,invAUX1,descT,descT,NOodos,VEHT,descT,descT,N
Onodos,PinvH,descT)

END SUBROUTINE
```

D.4.5 SUBROUTINA ESTIM

```
SUBROUTINE ESTIM

USE mData01
USE mData07
USE mData08

IMPLICIT NONE

INTEGER :: i, j

! CALL LINGG(NOodos,VEH,NOodos,invH,NOodos)

CALL
MCRCR(descT,NOodos,PinvH,descT,NOodos,1,Z,NOodos,descT,1,Vest
,descT)

!!! IMPRIMIENDO RESULTADOS

WRITE(2,10)harm(h)
10 FORMAT(/,'R E S U L T A D O S H A R M O N
I C A:',I3, /)

WRITE(2,11)
11 FORMAT(2/,10X,'NODO',4X,'CORRIENTE (NUM COMPL.)',4X,'MAG.
CORRIENTE',4X,'ANG. DE CORRIENTE',/)

DO i=1, NOodos

    magest(i) = sqrt(REAL(Vest(i))**2 + IMAG(Vest(i))**2)

END DO

DO i=1, NOodos

    IF ((REAL(Vest(i)) .GT. 0.0) .AND. (IMAG(Vest(i))
.GE. 0.0)) THEN

        angest(i) = ATAND(IMAG(Vest(i)) / REAL(Vest(i)))

    ELSE IF ((REAL(Vest(i)) .LT. 0.0) .AND.
(IMAG(Vest(i)) .GT. 0.0)) THEN
```

```

                                angest(i)      =      ATAND(IMAG(Vest(i))      /
REAL(Vest(i)))

                                angest(i) = angest(i) + 180

                                ELSE      IF      ((REAL(Vest(i))      .LT.      0.0)      .AND.
(IMAG(Vest(i)) .LT. 0.0)) THEN

                                angest(i)      =      ATAND(IMAG(Vest(i))      /
REAL(Vest(i)))

                                angest(i) = angest(i) - 180

                                ELSE      IF      ((REAL(Vest(i))      .GT.      0.0)      .AND.
(IMAG(Vest(i)) .LT. 0.0)) THEN

                                angest(i)      =      ATAND(IMAG(Vest(i))      /
REAL(Vest(i)))

                                angest(i) = angest(i)

                                ELSE IF (REAL(Vest(i)) .EQ. 0.0) THEN

                                angest(i) = 0.0

                                END IF

                                END DO

                                DO i=1, descI

                                WRITE(2,34)nodesI(i), REAL(Vest(i)), IMAG(Vest(i)),
magest(i), angest(i)
                                34 FORMAT(12X,I3,8X,F10.5,'+i',F10.5,8X,F10.5,8X,F10.5)

                                THDI(i) = THDI(i) + ABS(Vest(i)**2)

                                !      WRITE(*,*) Vest(i), THDI(i), i

                                !      PAUSE

                                END DO

                                WRITE(2,12)
                                12  FORMAT(2/,10X,'NODO',4X,'VOLTAJE      (NUM      COMPL.)',4X,'MAG.
VOLTAJE',4X,'ANG. DE VOLTAJE',/)

                                DO i=1, descV

                                j = i + descI

                                WRITE(2,35)nodesV(i), REAL(Vest(j)), IMAG(Vest(j)),
magest(j), angest(j)
                                35 FORMAT(12X,I3,8X,F10.5,'+i',F10.5,8X,F10.5,8X,F10.5)

```

```

END DO

END SUBROUTINE

```

D.4.6 SUBROUTINA VOLTHARM

```

SUBROUTINE VOLTHARM

USE mData01
USE mData07
USE mData08

IMPLICIT NONE

INTEGER :: i,j

Iharm = (0.0,0.0)
Vharm = (0.0,0.0)
magVharm = 0.0
angVharm = 0.0

DO i=1, descI

    Iharm(nodesI(i)) = Vest(i)

END DO

CALL LINGG(NOnodos,Yh,NOnodos,invYh,NOnodos)

CALL
MCRCR(NOnodos,NOnodos,invYh,NOnodos,NOnodos,1,Iharm,NOnodos,NOno
dos,1,Vharm,NOnodos)

DO i=1, NOnodos

    Vharmon(i,h) = Vharm(i)

END DO

DO i=1, NOnodos

    magVharm(i) = sqrt(REAL(Vharm(i))**2 +
IMAG(Vharm(i))**2)

END DO

DO i=1, NOnodos

    IF ((REAL(Vharm(i)) .GT. 0.0) .AND. (IMAG(Vharm(i))
.GE. 0.0)) THEN

```

```

                                angVharm(i)      =      ATAND(IMAG(Vharm(i))      /
REAL(Vharm(i)))

                                ELSE      IF      ((REAL(Vharm(i))      .LT.      0.0)      .AND.
(IMAG(Vharm(i))      .GT.      0.0))      THEN

                                angVharm(i)      =      ATAND(IMAG(Vharm(i))      /
REAL(Vharm(i)))

                                angVharm(i) = angVharm(i) + 180

                                ELSE      IF      ((REAL(Vharm(i))      .LT.      0.0)      .AND.
(IMAG(Vharm(i))      .LT.      0.0))      THEN

                                angVharm(i)      =      ATAND(IMAG(Vharm(i))      /
REAL(Vharm(i)))

                                angVharm(i) = angVharm(i) - 180

                                ELSE      IF      ((REAL(Vharm(i))      .GT.      0.0)      .AND.
(IMAG(Vharm(i))      .LT.      0.0))      THEN

                                angVharm(i)      =      ATAND(IMAG(Vharm(i))      /
REAL(Vharm(i)))

                                angVharm(i) = angVharm(i)

                                ELSE IF (REAL(Vharm(i)) .EQ. 0.0) THEN

                                angVharm(i) = 0.0

                                END IF

                                END DO

                                !      DO i=1, NOnodos

                                !      DO j=1, NOnodos

                                !      WRITE(2,36)i, j, REAL(Yh(i,j)), IMAG(Yh(i,j))
                                !      36
                                !      FORMAT(12X,'Yh(',I3,',',I3,')=',F10.5,'+',F10.5,'j')

                                !      END DO

                                !      END DO

                                !      DO i=1, NOnodos

                                !      WRITE(2,37)i, REAL(Iharm(i)), IMAG(Iharm(i))
                                !      37 FORMAT(12X,'Ih(',I3,',',1)=',F10.5,'+',F10.5,'j')

                                !      END DO

```

```
! DO i=1, NOnodos
!     WRITE(*,*) I, magVharm(i), angVharm(i)
!     PAUSE
! END DO

WRITE(2,12)
12  FORMAT(2/,10X,'NODO',4X,'VOLTAJE (NUM COMPL.)',4X,'MAG.
VOLTAJE',4X,'ANG. DE VOLTAJE',/)

DO i=1, NOnodos

WRITE(2,35)i, REAL(Vharm(i)), IMAG(Vharm(i)),
magVharm(i), angVharm(i)
35  FORMAT(12X,I3,8X,F10.5,'+i',F10.5,8X,F10.5,8X,F10.5)

END DO

! WRITE(2,13) harm(h), limconf
!13  FORMAT(2/'PARA LA ARMÓNICA',I3,'SE TIENE ESTE VALOR DE LIM.
DE CONF.',F10.5/)

END SUBROUTINE
```

D.4.7 SUBROUTINA THD

```
SUBROUTINE THD

USE mData01
USE mData02
USE mData07
USE mData08

IMPLICIT NONE

INTEGER :: i, j
REAL :: aux1, aux2

ALLOCATE (THDV(NOnodos))

THDV = 0.0

DO i=1, NOnodos

DO j=1, NOharm

THDV(i) = THDV(i) + (ABS(Vharmon(i,j))**2)

END DO

write(*,*) THDV(i), magVharm(i), i
```

```

PAUSE

      THDV(i) = SQRT(THDV(i))/ABS(magV(i))

      END DO

      WRITE(2,04)
04   FORMAT(3/,9X,'----- D I S T O R C I O N   A R M
O N I C A -----',&
           /,25X,' ----- T O T A L -----')
      WRITE(2,05)
05   FORMAT(2/,02X,'NODO',11X,'THD')

      DO i=1, NOnodos

           WRITE (2,06) i, THDV(i)
06   FORMAT (2X,I3, 4X,F13.6)

      END DO

      END SUBROUTINE

```

D.5 ARCHIVO DE ENTRADA

En las figuras D.6 y D.7, se muestra el archivo de entrada para el estimador. La estructura del archivo de entrada es:

Núm de nodo	Nú de línea	Núm de generador	Núm de carga	Núm de capacitó	Núm de nodos con medición de voltaje	Núm de nodos con medición de corriente	Núm. de armónicas	Potencia base	Error
-------------	-------------	------------------	--------------	-----------------	--------------------------------------	--	-------------------	---------------	-------

Nodo de envío	Nodo de recepción	Impedancia de la línea	Admitancia en paralelo	Diferenciador entre línea y transformador 0 = Trafo 1 = Linea
---------------	-------------------	------------------------	------------------------	---

Nodo del generador	Impedancia del generador
--------------------	--------------------------

Nodo de la carga	Potencia Activa demandada	Potencia Reactiva demandada	Magnitud de Voltaje en la carga
------------------	---------------------------	-----------------------------	---------------------------------

Nodo del capacitor	Potencia Reactiva del capacitor	Magnitud de Voltaje en el capacitor
--------------------	---------------------------------	-------------------------------------

Magnitud de voltaje	Ángulo de voltaje
---------------------	-------------------

Armónica

Nodo	Magnitud del Voltaje	Ángulo del Voltaje
------	----------------------	--------------------

Nodo	Magnitud de Corriente	Ángulo de Corriente
------	-----------------------	---------------------

```

5 7 2 3 1 3 2 8 100.0 5.0

1 2 0.02 0.06 0.03 0
1 3 0.08 0.24 0.025 0
2 3 0.06 0.18 0.02 0
2 4 0.06 0.18 0.02 0
2 5 0.04 0.12 0.015 0
3 4 0.01 0.03 0.01 0
4 5 0.08 0.24 0.025 0

1 0.0001
2 0.001

3 45.0 20.0 0.9796
4 80.0 30.0 0.9776
5 50.0 25.0 0.9922

4 30.0 0.9776

1.05 0.0
1.0 -2.6944
0.9796 -6.2114
0.9776 -6.9232
0.9922 -6.6963

5
7
11
13
17
19
23
25

1 0.00007 108.122
2 0.0057 137.756
3 0.16404 99.9193

1 0.00005 58.5431
2 0.00296 118.915
3 0.121 50.8093

1 0.00001 -4.7287
2 0.00153 147.369
    
```

Fig. D.6 Primera Sección del archivo de entrada para el método de Nguyen

The screenshot shows a text editor window with the following content:

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
1	0.00001		-4.7287	
2	0.00153		147.369	
3	0.02973		-11.688	
1	0.000005		-16.527	
2	0.001586		148.1139	
3	0.018437		-22.7313	
1	0.000002		-40.3931	
2	0.002009		137.4432	
3	0.012373		-42.1913	
1	0.000001		-66.9141	
2	0.002573		120.6839	
3	0.013101		-61.1692	
1	0.0		0.0	
2	0.00215		39.513	
3	0.00924		-146.11	
1	0.0		0.0	
2	0.00122		19.0293	
3	0.00457		-169.17	
2	0.0	0.0		
4	0.0	0.0		
2	0.0	0.0		
4	0.0	0.0		
2	0.0	0.0		
4	0.0	0.0		
2	0.0	0.0		
4	0.0	0.0		
2	0.0	0.0		
4	0.0	0.0		
2	0.0	0.0		
4	0.0	0.0		
2	0.0	0.0		
4	0.0	0.0		

Fig. D.7 Segunda Sección del archivo de entrada por el método de Nguyen

D.6 ARCHIVO DE SALIDA

El archivo de salida consta de tres partes que se muestra en las figuras D.8, D.9 y D.10 La primer parte (figura D.8) es la reimpresión de los datos de la red, la segunda (figura D.9) la reimpresión de las mediciones armónicas y la ultima (D.10) las corrientes y voltajes estimados.

```

harm1.res - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
---- D A T O S   D E   E N T R A D A ----

NUMERO DE NODOS = 5
NUMERO DE LINEAS = 7
NUMERO DE GENERADORES = 2
NUMERO DE TRANSFORMADORES = 0
NUMERO DE CARGAS = 3
NUMERO DE CAPACITORES = 1

---- D A T O S   D E   L I N E A S ----

      IMPEDANCIAS Y ADMITANCIAS PRIMITIVAS
LINEA  NR   NR  IMPEDANCIA SERIE  ypq/2      TIPO DE ELEM
  1     1   2   .02000+j .06000    .03000    LINEA
  2     1   3   .08000+j .24000    .02500    LINEA
  3     2   3   .06000+j .18000    .02000    LINEA
  4     2   4   .06000+j .18000    .02000    LINEA
  5     2   5   .04000+j .12000    .01500    LINEA
  6     3   4   .01000+j .03000    .01000    LINEA
  7     4   5   .08000+j .24000    .02500    LINEA

---- D A T O S   D E   L   G E N E R A D O R ----

GENERADOR  NODO  IMPEDANCIA DEL GEN
  1         1    .00010
  2         2    .00100

---- D A T O S   D E   L A S   C A R G A S ----

CARGA  NODO  POTENCIA ACTIVA (MW)  POTENCIA REACTIVA (MVAR)  MAG. DEL VOLTAJE DE LA CARGA
  1     3    45.00000        20.00000                .97960
  2     4    80.00000        30.00000                .97760
  3     5    50.00000        25.00000                .99220

---- D A T O S   D E   L O S   C A P A C I T O R E S ----

```

Fig. D.8 Primer Sección del archivo de salida por el método de Nguyen

```

harm1.res - Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
---- D A T O S   D E   L A S   M E D I C I O N E S ----

HARMONICA
5

NODO  MAG. DEL VOLTAJE  ANG. DEL VOLTAJE
  1     .00007          108.12200
  2     .00570          137.75600
  3     .16404          99.91930

NODO  MAG. DE CORRIENTE  ANG. DE CORRIENTE
  2     .00000            .00000
  4     .00000            .00000

HARMONICA
7

NODO  MAG. DEL VOLTAJE  ANG. DEL VOLTAJE
  1     .00005          58.54310
  2     .00296          118.91500
  3     .12100          50.80930

NODO  MAG. DE CORRIENTE  ANG. DE CORRIENTE
  2     .00000            .00000
  4     .00000            .00000

HARMONICA
11

NODO  MAG. DEL VOLTAJE  ANG. DEL VOLTAJE
  1     .00001          -4.72870
  2     .00153          147.36900
  3     .02973          -11.68800

NODO  MAG. DE CORRIENTE  ANG. DE CORRIENTE
  2     .00000            .00000
  4     .00000            .00000

```

Fig. D.9 Segunda Sección del archivo de salida por el método de Nguyen

harm1.res - Bloc de notas

Archivo Edición Formato Ver Ayuda

R E S U L T A D O S H A R M O N I C A : 5

NODO	CORRIENTE (NUM COMPL.)	MAG. CORRIENTE	ANG. DE CORRIENTE	
1	-.01097+i	-.00358	.01154	-161.91470
3	.00033+i	.00028	.00043	39.74204
5	.13652+i	1.16627	1.17423	83.32327

NODO	VOLTAJE (NUM COMPL.)	MAG. VOLTAJE	ANG. DE VOLTAJE	
4	-.04836+i	.20020	.20596	103.58130
5	-.44185+i	.26783	.51669	148.77730

NODO	VOLTAJE (NUM COMPL.)	MAG. VOLTAJE	ANG. DE VOLTAJE	
1	-.00002+i	.00007	.00007	108.12200
2	-.00422+i	.00383	.00570	137.75600
3	-.02826+i	.16159	.16404	99.91933
4	-.04836+i	.20020	.20596	103.58130
5	-.44185+i	.26783	.51669	148.77730

R E S U L T A D O S H A R M O N I C A : 7

NODO	CORRIENTE (NUM COMPL.)	MAG. CORRIENTE	ANG. DE CORRIENTE	
1	-.00281+i	.00173	.00330	148.39040
3	.00034+i	.00010	.00035	16.30129
5	.06977+i	.59808	.60213	83.34638

NODO	VOLTAJE (NUM COMPL.)	MAG. VOLTAJE	ANG. DE VOLTAJE	
4	-.08569+i	.12377	.15054	55.30322
5	-.27064+i	.18388	.32720	145.80670

NODO	VOLTAJE (NUM COMPL.)	MAG. VOLTAJE	ANG. DE VOLTAJE	
1	.00003+i	.00004	.00005	58.54309
2	-.00143+i	.00259	.00296	118.91500
3	.07646+i	.09378	.12100	50.80931
4	.08569+i	.12377	.15054	55.30325

Fig. D10 Tercera Sección del archivo de salida por el método de Nguyen