

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA MATPOWER PARA ESTUDIOS DE PENETRACIÓN ARMÓNICA ITERATIVA

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Josué Urbina
para optar al título
de Ingeniero Electricista.

Caracas, 2017

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA MATPOWER PARA ESTUDIOS DE PENETRACIÓN ARMÓNICA ITERATIVA

TUTOR ACADÉMICO: Dr. Ing. Julio Molina

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por el Br. Josué Urbina
para optar al título
de Ingeniero Electricista.

Caracas, 2017

CONSTANCIA DE APROBACIÓN

Caracas, 08 de noviembre de 2017

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Eléctrica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller **Josué A. Urbina V.**, titulado:

"UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA MATPOWER PARA ESTUDIOS DE PENETRACIÓN ARMÓNICA ITERATIVA"

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de **Ingeniero Electricista** en la **mención Potencia**, sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor y lo declaran **APROBADO**.


Prof. Dan El Montoya
Jurado
Prof. Alexis Barroso
Jurado
Prof. Julio Molina
Guia

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por siempre estar a mi lado y darme las fuerzas necesarias para seguir adelante en la lucha por alcanzar mis metas.

A mi familia, por el apoyo incondicional a lo largo de mi carrera universitaria.

A mi tutor, el Dr. Ing. Julio Molina, por su apoyo, entrega, paciencia, dedicación y orientación en el desarrollo de este trabajo de grado.

A todos los profesores de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y en general a toda la comunidad de la ilustre Universidad Central de Venezuela, por contribuir a mi formación profesional y educativa.

Urbina V., Josué A.

UTILIZACIÓN DEL PROGRAMA MATPOWER PARA ESTUDIOS DE PENETRACIÓN ARMÓNICA ITERATIVA

Tutor Académico: Dr. Ing. Julio Molina. Tesis. Caracas. UCV. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Eléctrica. Ingeniero Electricista. Opción: Potencia. Año 2017. 109 h.

Palabras claves: Sistemas eléctricos; Penetración armónica; Matpower; Cargas no lineales; Lámparas compactas fluorescentes.

Resumen. La conexión de cargas que introducen armónicos a los sistemas eléctricos de potencia, generan problemas en la calidad de la energía. Esto ha reforzado la necesidad de los estudios de penetración armónica, como un estándar en el análisis y posterior diseño de los sistemas eléctricos. Como solución a este problema, se modifica el código abierto de la herramienta de simulación Matpower, que permita estudiar la penetración armónica de cargas no lineales, mediante la metodología de análisis armónico iterativo. Se analiza la red de prueba de 13 barras del IEEE, incorporando como carga no lineal modelos matriciales de cargas de iluminación de bajo consumo energético. Se utilizan modelos de las lámparas compactas fluorescentes, bajo la filosofía de modelación que presenta Matpower. Finalmente, se valida el modelo obtenido mediante el programa de simulación en el dominio del tiempo PSpice.

ÍNDICE GENERAL

ACTA DE APROBACIÓN	III
RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN.	V
ÍNDICE GENERAL	VI
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS	XII
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO I	17
ESTUDIOS DE FLUJO DE POTENCIA CONVENCIONALES USANDO MATPOWER	17
1.1 Modelado de los elementos de un sistema de potencia	17
1.1.1 Formato de datos.....	18
1.1.2. Modelado de elementos del sistema de transporte o ramas	19
1.1.3 Modelado de los generadores.....	20
1.1.4 Modelado de las cargas	21
1.1.5 Elementos en paralelo (Shunt)	21
1.2 Funciones básicas en Matpower para la ejecución de un CPF.....	22
CAPÍTULO II	24
ANÁLISIS DE LA PENETRACIÓN ARMÓNICA EN MATPOWER	24
2.1 Modelación de los elementos de los sistemas de potencia para estudios de penetración armónica	24
2.1.1 Líneas de transporte aéreas y cables de potencia	25
2.1.2 Transformadores en el sistema de transporte	25
2.1.3 Generadores sincrónicos	26
2.1.4 Modelado de cargas lineales	27
2.1.5 Modelación de elementos shunt	29

2.1.6	Modelado de sistemas externos equivalentes.....	30
2.1.7	Representación de cargas no lineales.....	31
2.2	Adecuación de Matpower para estudios de penetración armónica no iterativa	32
2.2.1	Adecuación del campo o matriz de barras	33
2.2.2	Adecuación del campo o matriz de generadores.....	34
2.2.3	Espectro característico de las cargas no lineales. Modelo de fuente de corriente ideal.....	34
2.2.4	Adecuación de la función matriz de admitancias de barra MakeYbusH.m	36
2.3	Ecuaciones de red y proceso de solución de penetración armónica (HP).....	37
2.3.1.	Penetración armónica no iterativa o simple NIHA (No Iterative Harmonic Analysis)	37
2.3.2.	Penetración armónica iterativa IHA (Iterative Harmonic Analysis).....	38
2.4	Distorsión armónica total	42
2.5	Métodos numéricos para la solución de los estudios de penetración armónica iterativa.	42
CAPÍTULO III.....		45
MODELADO DE LAS LÁMPARAS COMPACTAS FLUORESCENTES (CFL)		45
3.1	Modelo completo de la CFL (modelo MF)	45
3.2	Modelo simplificado de las CFLs (modelo de admitancias acopladas)	49
CAPÍTULO IV.....		53
CASO DE ESTUDIO DE PENETRACIÓN ARMÓNICA NO ITERATIVA EN MATPOWER USANDO LA FUNCIÓN “runpfH.m”		53
4.1	Descripción de la función runpfH.m	53
4.2	Descripción de la metodología de penetración armónica bajo el método no iterativo	54
4.3	Caso de estudio de penetración armónica bajo la metodología no iterativa en Matpower	56
4.3.1	Ingreso de los datos al sistema	58
4.3.2	Ejecución del flujo de potencia convencional.....	59
4.3.3	Resolución de la penetración armónica simple	60
CAPÍTULO V		64
CASO DE ESTUDIO DE PENETRACIÓN ARMÓNICA ITERATIVA EN MATPOWER USANDO LA FUNCIÓN “runpfH2.m”		64

5.1	Descripción de la función <i>runpfH2.m</i>	64
5.2	Descripción de la función <i>Currents_Phase_CFL.m</i>	65
5.3	Descripción de la metodología de penetración armónica bajo el método iterativo	66
5.4	Caso de estudio de penetración armónica bajo la metodología iterativa en Matpower	68
5.5	Resolución de la penetración armónica iterativa	69
CAPÍTULO VI.....		75
VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA IHA		75
CONCLUSIONES		81
RECOMENDACIONES		82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		83
BIBLIOGRAFÍAS		85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Modelo de elementos de un SP en rama [8].	19
Figura 1.2. Parámetros del sistema de transporte o ramas.	20
Figura 1.3. Datos de los generadores.	20
Figura 1.4. Datos de barra, cargas.	21
Figura 1.5. Datos de barra, elementos en paralelo (shunt).	22
Figura 2.1 Modelo de una línea de transporte corta.	25
Figura 2.2. Modelo del transformador de potencia en el sistema de transporte.	26
Figura 2.3. Modelos del generador sincrónico.	27
Figura 2.4. Modelos de cargas lineales.	28
Figura 2.5. Modelos a frecuencia armónica de elementos shunt.	29
Figura 2.6. Modelos del sistema externo.	30
Figura 2.7. Fuentes de corriente ideal para el modelado de dispositivos no lineales.	31
Figura 2.8. Equivalentes de Norton para el modelado de dispositivos no lineales.	32
Figura 2.9. Índice agregado en la matriz de barras, para el caso de 13 barras IEEE.	33
Figura 2.11. Matriz del espectro característico para el caso de 13 barras IEEE	35
Figura 2.12. Diagrama de flujo para el análisis de penetración armónica.	40
Figura 2.13. Reducción del sistema en el IHA.	41
Figura 3.1. Modelado CFL. (a) Circuito equivalente de CFL. (b) Formas de onda de: tensión de alimentación v , corriente AC i y tensión DC V_C	46
Figura 3.2. Circuito equivalente del modelo MF.	49

Figura 4.1. Diagrama de flujo en base a la metodología NIHA, empleada para la obtención de HP en Matpower.	55
Figura 4.2. Diagrama unifilar del sistema de 13 barras del IEEE.	56
Figura 4.3. Comparación de la distorsión armónica, resultados experimentales vs resultados de la referencia [7].	63
Figura 5.1. Diagrama de flujo en base a la metodología IHA, empleada para la obtención de HP en Matpower.	67
Figura 5.2. Sistema industrial de 13 barras del IEEE con carga no lineal CFL.	68
Figura 5.3. Corriente en la barra de carga no lineal CFL - L1P11W.	71
Figura 5.4. Tensiones en la barra de carga no lineal CFL - L1P11W.	71
Figura 5.5. Corriente en la barra de carga no lineal CFL – L2P14W.	73
Figura 5.6. Tensiones en la barra de carga no lineal CFL – L2P14W.	73
Figura 6.1. Circuito modelado en PSpice – Carga no lineal CFLs.	76
Figura 6.2. Fichero fuente que describe el circuito en PSpice.	77
Figura 6.3. Comparación de la corriente armónica en la barra de carga no lineal, resultados con Matpower vs resultados con PSpice.	78
Figura 6.4. Comparación de la corriente en la carga no lineal, resultados con Matpower vs resultados con PSpice.	79

LISTA DE TABLAS

Tabla 3.1. Modelos CFL.	52
Tabla 4.1. Datos de las líneas (en bases de 13.8kV, 69kV y 10MVA).....	57
Tabla 4.2. Datos de transformadores (en bases a valores nominales).....	57
Tabla 4.3. Espectro del ASD de corrientes en magnitud y ángulo	58
Tabla 4.4. Datos de transformadores en por unidad (en las bases de estudio).....	59
Tabla 4.5. Resultados obtenidos en Matpower del estudio de flujo de potencia convencional.	59
Tabla 4.6. Corrientes armónicas de la carga no lineal (ASD).....	61
Tabla 4.7. Resultados obtenidos de tensiones armónicas.	62
Tabla 5.1. Resultados del CPF. Carga monofásica de 16.5kW CFL - L1P11W.	69
Tabla 5.2. Tensiones armónicas. Carga monofásica de 16.5kW CFL - L1P11W.	70
Tabla 5.3. Resultados del CPF. Carga monofásica de 21kW CFL - L2P14W.	72
Tabla 5.4. Tensiones armónicas. Carga monofásica de 21kW CFL - L2P14W.	72
Tabla 5.5. Factor de potencia, potencia aparente, activa y reactiva de las CFLs.....	74

LISTA DE SIGLAS Y ACRÓNIMOS

AC: Alternating Current “Corriente Alterna”.

CDF: Common Data Format “Formato de Datos Común”.

CFLs: Compact Fluorescent Lamps “Lámparas Fluorescentes Compactas”.

CIM: Common Information Model “Modelo de Información Común”.

CPF: Conventional Power Flow “Flujo de Potencia Convencional”.

DC: Direct Current “Corriente Directa”.

HP: Harmonic Penetration “Penetración Armónica”.

IEC: International Electrotechnical Commission “Comisión Electrotécnica Internacional”.

IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers “Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electricistas”.

IHA: Iterative Harmonic Analysis “Análisis Armónico Iterativo”.

kV: Kilo Voltio.

MVA: Mega Voltio Amper.

Mvar: Mega Voltio Amper Reactivo.

NIHA: No Iterative Harmonic Analysis “Análisis Armónico No Iterativo”.

OPF: Optimal Power Flow “Flujo de Potencia Óptimo”.

OSS: Open Source Software “Software de Código Abierto”

PTI: Power Technologies Inc.

p.u.: Por Unidad.

SP: Sistema de Potencia.

THD: Total Harmonic Distortion “Distorsión Armónica Total”.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos idealmente están diseñados para suministrar una tensión con forma de onda sinusoidal perfecta. Sin embargo, en la práctica, las condiciones nunca son ideales, así que esta forma de onda suele presentarse distorsionada. Esta desviación es expresada en términos de la distorsión armónica de las formas de onda de corriente y tensión. Los problemas de distorsión armónica son provocados principalmente por cargas no lineales conectadas a los sistemas de distribución de energía eléctrica. El aumento de la conexión de cargas que introducen armónicos en los sistemas de potencia (SP) de media y baja tensión crece cada día, entre estas se destacan las cargas de iluminación de bajo consumo energético, como las lámparas compactas fluorescentes (CFLs, **C**ompact **F**luorescent **L**amps).

El estudio de penetración de armónicos (HP, **H**armonic **P**enetration), es fundamental en los análisis y posterior diseño de los sistemas eléctricos. Para el análisis de HP se pueden utilizar herramientas computacionales y algoritmos iterativos y no iterativos. El análisis de penetración armónica no iterativo (NIHA, **N**o **I**terative **H**armonic **A**nalysis), representa los dispositivos generadores de armónicos mediante fuentes de corriente ideales, usando espectros típicos de magnitud y fase que dependen de la tensión a frecuencia nominal. Los análisis de penetración armónica iterativa (IHA, **I**terative **H**armonic **A**nalysis), dependen de disponer de modelos que representen la relación no lineal tensión-corriente del dispositivo, los cuales se pueden representar en el dominio del tiempo o de la frecuencia.

Debido al incremento del uso de las lámparas de bajo consumo energético del tipo CFLs, es de interés analizar sus posibles efectos sobre la calidad de la onda de tensión del sistema eléctrico de potencia considerando el comportamiento no lineal de este tipo de cargas. Por ello, es necesario contar con

herramientas computacionales como el paquete de simulación basado en Matlab bajo la filosofía de código fuente abierto Matpower [1], en donde se pueden implementar algoritmos capaces de determinar la penetración armónica en redes de distribución de media y baja tensión con cargas de naturaleza armónica [2], [3].

Existen diferentes investigaciones en relación a los estudios armónicos, pero como antecedente principal, se tiene el trabajo de grado *Evaluación del programa de código abierto Matpower para estudios de flujo de potencia con armónicos*, presentado en el mes de octubre de 2015, en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Central de Venezuela por Francismar Suárez, como requisito para optar por el título de Ingeniero Electricista. La investigación se enfoca en la evaluación del programa Matpower para desarrollar estudios de flujo de potencia con armónicos (HPF, **H**armonic **P**ower **F**lows). En este trabajo se formulan modificaciones al programa de simulación para desarrollar el estudio de HP, bajo la metodología de análisis armónico no iterativo, analizando una red de prueba del IEEE y se plantea una posible adaptación en Matpower del análisis armónico iterativo (IHA).

En este sentido, el trabajo de grado que se presenta a continuación, pretende desarrollar los módulos necesarios y llevar a cabo las modificaciones de la herramienta Matpower para estudiar la penetración armónica de cargas no lineales, usando una metodología iterativa similar al método iterativo de Jacobi, disponiendo de modelos matriciales de las CFLs que serán incorporados en estudios de HP [4], bajo la filosofía de modelación que presenta Matpower.

Por consiguiente, se plantea como objetivo general “desarrollar e implementar un programa para incorporarlo al código abierto de Matpower, para realizar estudios de penetración armónica iterativa”. Para lograr este objetivo, se formulan los siguientes objetivos específicos:

- 1.- Describir los modelos de los elementos de un sistema de potencia (SP), para estudios de flujo de potencia convencionales, implementados bajo el formato de matrices en Matpower.

- 2.- Describir los modelos de los elementos de un SP para estudios de penetración armónica.
- 3.- Adaptar los modelos armónicos de los elementos de un SP al formato de matrices que usa Matpower.
- 4.- Describir las ecuaciones de red y el proceso de solución para los estudios de penetración armónica iterativa.
- 5.- Describir los métodos numéricos para la solución de los estudios de penetración armónica iterativa, dando mayor énfasis al método de Jacobi, bajo un enfoque híbrido.
- 6.- Describir los modelos de las lámparas compactas fluorescentes bajo el formato de matrices desarrollado en [4], [5].
- 7.- Analizar un caso de estudio de penetración armónica no iterativa usando la función runpfH.m de Matpower¹ [6].
- 8.- Implementar el nuevo módulo (subprograma), para la realización de estudios de penetración armónica iterativa.
- 9.- Analizar un caso de estudio de penetración armónica iterativa usando las nuevas funciones desarrolladas en Matpower².
- 10.- Validación del modelo obtenido respecto a un programa de simulación en el dominio del tiempo (i.e. PSpice o ATP).

Los capítulos que se desarrollan a continuación, se estructuran de la siguiente manera:

- Capítulo I: se presenta el flujo de potencia convencional (CPF, **C**onventional **P**ower **F**lows) en Matpower, así como las funciones que posee el software para el desarrollo

de un CPF. Se indica cómo se modelan los elementos de un SP en dicha herramienta y se explican algunos módulos elementales para la ejecución de un caso de estudio.

- Capítulo II: se desarrolla la metodología para el análisis de penetración armónica. Se describe el modelado de los elementos de un sistema de potencia para estudios de HP. Se indica la adecuación de Matpower para estudios de penetración armónica no iterativa. Se describen las ecuaciones de red y el proceso de solución en los estudios de HP. Se define el total de distorsión armónica (THD, **T**otal **H**armonic **D**istortion), y se presentan los métodos numéricos para la solución de penetración armónica iterativa.

- Capítulo III: en este capítulo se describe el modelado de las lámparas compactas fluorescentes, bajo un esquema matricial.

- Capítulo IV: se presenta la ejecución de un caso de estudio de penetración armónica no iterativa, usando la función “*runpfH.m*” desarrollada e incorporada al Matpower en [6]. Para ello, se analiza un sistema de 13 barras extraído de una red de prueba del IEEE [7].

- Capítulo V: se desarrolla el módulo diseñado en Matpower para la realización de estudios de penetración armónica iterativa, analizando el caso de estudio de 13 barras del IEEE, pero esta vez agregando como carga no lineal el modelo de las CFLs.

- Capítulo VI: este capítulo contiene la validación del modelo obtenido mediante un programa de simulación en el dominio del tiempo denominado PSpice, analizando caso equivalente presentado en el capítulo V.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones que se establecen como mejoras para posibles trabajos a futuro relacionados con esta investigación.

¹Caso de estudios de trece (13) barras tomado de la referencia [7]

²Caso de estudios de trece (13) barras tomado de la referencia [7]

CAPÍTULO I

ESTUDIOS DE FLUJO DE POTENCIA CONVENCIONALES USANDO MATPOWER

En primer lugar, es relevante describir qué es el Matpower y cómo funciona. Matpower es un paquete de simulación de código abierto para el análisis de sistemas de potencia que trabaja sobre la plataforma y lenguaje de Matlab. Fue desarrollado por Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo Sánchez y Deqiang Gan [1] de la PSERC (Power System Engineering Research Center). Está orientado a la solución de flujo de potencia convencional y flujo de potencia óptimo.

Matpower, es un paquete de simulación de gran utilidad, con una biblioteca que dispone de un alto rango de funciones modificables y de fácil manejo. Entre sus funciones fundamentales se distinguen “*MakeYbus*” y “*MakeBdc*” para la construcción de la matriz de admitancias estándar de los sistemas. La función “*MakeYbus*” contiene el algoritmo para construir la matriz de admitancias $[Y_{bus}]$ del sistema en estudio, mientras que la función “*MakeBdc*” tiene como finalidad la construcción de la matriz de susceptancias B , en la cual se ignoran las pérdidas (la parte real de todas las admitancias de la matriz $[Y_{bus}]$ son nulas) y es usada para realizar flujos de potencia óptimos. Ambas matrices son modificables para ser empleadas en otros subprogramas.

1.1 Modelado de los elementos de un sistema de potencia.

En Matpower, debido al alto nivel que ofrece Matlab en el entorno matricial, todas las ecuaciones y modelos de los componentes de un SP se presentan bajo la

estructura de matrices y vectores. Emplea modelos en AC en estado estacionario que normalmente se usan en los análisis de flujo de potencia convencional. Internamente, las magnitudes de las tensiones e impedancias se expresan en por unidad y los ángulos de las cantidades complejas se expresan en radianes. Las potencias y elementos en paralelo (shunt) se expresan en MW y MVar.

Matpower elige una sola barra de generación para cumplir los roles de compensación de pérdidas y referencia del ángulo de la tensión, conocida como barra *Slack*. El ángulo y la magnitud de la tensión de la barra *Slack* se toman como valores conocidos. Las barras de generación restantes se toman como barras del tipo *PV* con valores conocidos de magnitud de tensión y potencia real inyectada. Todas las demás barras son modeladas como tipo *PQ* con valores de potencia activa y reactiva especificados.

1.1.1 Formato de datos

Los datos de entrada para Matpower son especificados en un archivo Matlab de extensión *.m* denominado “*Mat Power case*”, convencionalmente denotado por la variable “*mpc*”. La estructura “*mpc*” para los estudios de flujos de carga convencional y óptimos se encuentra conformada por cinco campos: el campo “*system MVA base*” corresponde a un escalar y los campos “*bus data*”, “*branch data*”, “*generator data*” y “*generatorcost data*” corresponden a matrices.

En el campo “*system MVA base*” se define la potencia base en MVA del sistema utilizada para la conversión a por unidad de las potencias. Los demás campos, las filas de cada uno corresponden a una barra, rama o generador. Las columnas son similares de los formatos estándar IEEE, CDF y PTI, representando los atributos o valores de los diversos elementos del SP.

1.1.2. Modelado de elementos del sistema de transporte o ramas

El programa Matpower incorpora los elementos en rama a través de un modelo común para representar las líneas de transmisión, transformadores y cambiadores de fase, que consiste de un modelo de parámetros concentrados tipo π en serie con un transformador ideal (figura 1.1). El transformador, cuya relación de tap tiene magnitud τ y ángulo de cambiador de fase θ_{shift} , está situado en el extremo de la rama. La r_s y x_s son la resistencia y reactancia series de las ramas del sistema, b_c es la capacidad total de la rama.

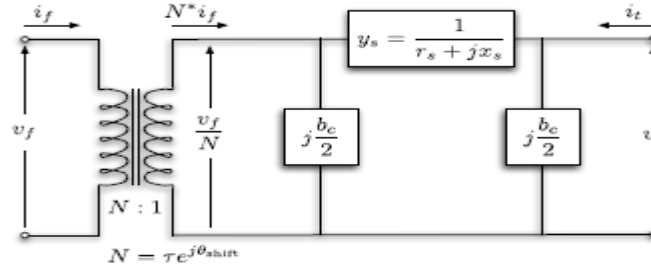


Figura 1.1. Modelo de elementos de un SP en rama [8].

Las inyecciones de corriente en el inicio (i_f) y final de la rama (i_t), son expresadas en términos de una matriz de admitancia de rama (Y_{br}) con la impedancia serie del modelo π denotada por $y_s = 1/z_s$, la cual se estructura de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} i_f \\ i_t \end{bmatrix} = Y_{br} * \begin{bmatrix} v_f \\ v_t \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

$$[Y_{br}] = \begin{bmatrix} \left(y_s + j\frac{b_c}{2}\right)\frac{1}{T^2} & -y_s \frac{1}{Te^{-j\theta_{shift}}} \\ y_s \frac{1}{Te^{j\theta_{shift}}} & y_s + j\frac{b_c}{2} \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

Los parámetros r_s , x_s , b_c , τ y θ_{shift} , son especificados en las columnas del campo “*branch data*” como r , x , b , $ratio$ y $angle$, respectivamente.

```
%% branch data
%   fbus   tbus   r       x       b       rateA   rateB   rateC   ratio   angle   status   angmin   angmax
mpc.branch = [
    1       4   0.00139   0.00296   0       150     0       0       0       0       1     -360    360;
    2       3   0.06391   0.37797   0       150     0       0       0.975   0       1     -360    360;];
```

Figura 1.2. Parámetros del sistema de transporte o ramas.

1.1.3 Modelado de los generadores

Los generadores son modelados como inyecciones de potencia compleja (MW y Mvar equivalentes) cuando se especifica la barra de conexión tipo PQ , en este caso un generador i se especifica su potencia en las columnas P_g y Q_g del campo “*generator data*”. La inyección de potencia es de la forma:

$$\underline{s}_g^i = p_g^i + jq_g^i \quad (1.3)$$

Por otra parte, se especifica la magnitud de la tensión cuando la barra de conexión es tipo PV .

```
%% generator data
%   bus   Pg   Qg   Qmax   Qmin   Vg   mBase   status   Pmax   Pmin   Pc1   Pc2   Qc1min   Qc1max   Qc2min   Qc2max   ramp_agc
mpc.gen = [
    1     0   0    50     0     1     10     1     100     0     0     0     0     0     0     0     0
    2     2   0    50     0   0.995    10     1     100     0     0     0     0     0     0     0     0
];
```

Figura 1.3. Datos de los generadores.

1.1.4 Modelado de las cargas

Las cargas se modelan a potencia constante, representándose como una cantidad de potencia real y reactiva consumida (MW y MVar equivalentes). Para una barra i es especificada la potencia consumida en las columnas P_d y Q_d del campo “bus data” y es de la forma:

$$\underline{s}_d^i = p_d^i + jq_d^i \quad (1.4)$$

```
%% bus data
```

%	bus_i	type	Pd	Qd	Gs	Bs	area	Vm	Va	baseKV	zone	Vmax	Vmin	nonl_load
mpc.bus = [														
	1	3	0	0	0	0	1	1	0	69	1	1.05	0.95	0;
	2	2	0	0	0	0	1	1	0	13.8	2	1.05	0.95	0;
	3	1	0.6	0.53	0	0	1	1	0	0.48	4	1.05	0.95	0;];

Figura 1.4. Datos de barra, cargas.

1.1.5 Elementos en paralelo (Shunt)

Los elementos como capacitores e inductores son modelados como fuentes de potencia conectadas en un nodo i . La admitancia del elemento shunt de impedancia constante es especificada por su potencia activa consumida p_{sh}^i (en MW) y su potencia reactiva inyectada o consumida q_{sh}^i (en Mvar) a tensión nominal (1 p.u.), las cuales se incorporan en las columnas G_s y B_s del campo “bus data”.

$$\underline{y}_{sh}^i = \frac{p_{sh}^i + jq_{sh}^i}{S_{base}} \quad (1.5)$$

La inyección de potencia reactiva se denota con signo “+” (caso capacitor) y el consumo con signo “-” (caso inductor). La potencia activa (MW) representa en el inductor las pérdidas Joule y para el caso capacitor las pérdidas por el aislamiento.

```
%% bus data
```

%	bus_i	type	Pd	Qd	Gs	Bs	area	Vm	Va	baseKV	zone	Vmax	Vmin	nonl_load
mpc.bus = [														
	1	3	0	0	0	0	1	1	0	69	1	1.05	0.95	0;
	2	2	0	0	0	0	1	1	0	13.8	2	1.05	0.95	0;
	3	1	0.6	0.53	0	0	1	1	0	0.48	4	1.05	0.95	0;
	4	1	0	0	0	0	1	1	0	69	1	1.05	0.95	0;
	5	1	2.24	2	0	6	1	1	0	13.8	3	1.05	0.95	0;];

Figura 1.5. Datos de barra, elementos en paralelo (shunt).

1.2 Funciones básicas en Matpower para la ejecución de un CPF

Para la ejecución de un caso de flujo de potencia, el código de Matpower requiere del uso de la función “*runpf*”, la cual contiene como principal argumento de entrada el nombre del caso o la estructura “*mpc*”. La solución del flujo de potencia se archiva en una estructura denominada “*results*” y se muestra por defecto en pantalla. La estructura “*results*” es un gran conjunto de datos que resulta del argumento de entrada “*mpc*”, y almacena los resultados del flujo de potencia como se muestra en la referencia [6].

La función “*runpf*” genera información detallada sobre un caso Matpower, almacenados en forma de columnas. Éste incluye información de conectividad entre las ramas, un resumen de generación y demanda, los perfiles de tensiones con sus respectivos ángulos, barras donde se obtienen los valores mínimos y máximos, entre

otros. Internamente la función “*runpf*”, utiliza una estructura de opciones denominada “*mpopt*”, para el control de muchas opciones disponibles, es decir, establece los detalles de la impresión de la salida de los resultados, el algoritmo para la solución del CPF, criterio para la terminación de CPF, entre otros.

CAPÍTULO II

ANÁLISIS DE LA PENETRACIÓN ARMÓNICA EN MATPOWER

Actualmente, debido al creciente uso de dispositivos no lineales en las redes eléctricas de potencia, tal es el caso del uso de lámparas CFLs en sistemas de media y baja tensión, se ha incrementado la distorsión armónica de las tensiones. Esto último ha dado origen al fenómeno que se conoce como “contaminación armónica”, afectando la calidad de la energía.

Este hecho, lleva a la necesidad de realizar estudios de penetración armónica (HP). La aplicación de HP en los sistemas eléctricos permite determinar y cuantificar los niveles de contaminación por armónicos que se producen en una barra, debido a cargas que introducen distorsiones en las formas de onda de la tensión y corriente. También, permite determinar condiciones peligrosas de resonancia y constatar violaciones en los límites de distorsión armónica (IEEE 519-2014).

Los estudios de HP planteados en el dominio de la frecuencia son una extensión del flujo de potencia convencional y tienen dos enfoques: no iterativo e iterativo. A continuación, se describen los modelos de los elementos de un sistema de potencia para estudios de penetración armónica, así como su adecuación al formato de trabajo en Matpower.

2.1 Modelación de los elementos de los sistemas de potencia para estudios de penetración armónica

Los modelos de los elementos de un SP que se describen se toman considerando los modelos propuestos en la referencia [1], tomando en cuenta su dependencia con la frecuencia.

2.1.1 Líneas de transporte aéreas y cables de potencia

Se representan mediante el modelo de parámetros concentrados usando el circuito equivalente π , en el cual los efectos de líneas largas, desbalanceadas y transposiciones no son tomados en cuenta. Un circuito π nominal afectado sólo por el orden del armónico es usado en los casos de líneas cortas y de bajo orden armónico.

Para efectos de este trabajo se considerará el modelo π nominal para líneas cortas. La reactancia X se multiplica por el armónico “ h ” (figura 2.1).

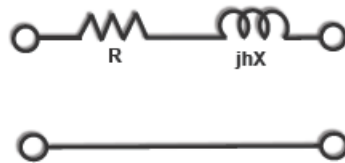


Figura 2.1 Modelo de una línea de transporte corta.

La impedancia $\underline{Z}$ de la línea corta viene dada por la siguiente expresión:

$$Z = R + jhX \quad (2.1)$$

2.1.2 Transformadores en el sistema de transporte

El modelo para representar el transformador, está compuesto por la resistencia de pérdidas en serie con la inductancia de dispersión de los devanados y la rama de magnetización en paralelo con la resistencia de pérdidas en el núcleo. No

obstante, generalmente se desprecia la rama de magnetización. En esta investigación, se empleará un modelo simple compuesto por la resistencia R_T e inductancia de dispersión en serie. La reactancia resultante X_T debe ser multiplicada por el armónico (h).

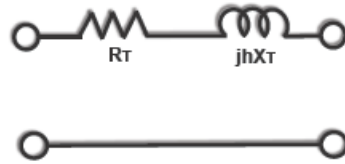


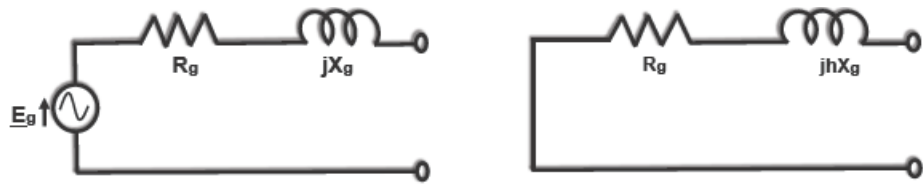
Figura 2.2. Modelo del transformador de potencia en el sistema de transporte.

La impedancia Z_T del transformador viene dada por la expresión:

$$Z_T = R_T + jhX_T \quad (2.2)$$

2.1.3 Generadores sincrónicos

Los generadores poseen dos modelos para ser representados. El primero es utilizado a frecuencia fundamental (figura 2.3a), en el cual se modela como un simple circuito RL serie. El segundo, es el modelo a frecuencias armónicas (figura 2.3b), donde el circuito RL serie es válido con la fuente de tensión interna cortocircuitada y la reactancia X_g resultante debe ser multiplicada por el armónico (h).



(a) Modelo a frecuencia fundamental (b) Modelo a frecuencia armónica

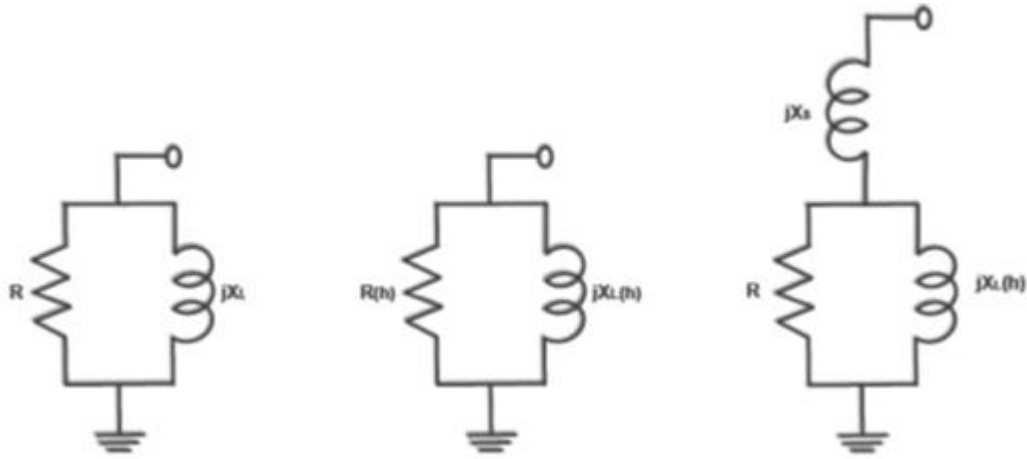
Figura 2.3. Modelos del generador sincrónico.

La impedancia del generador Z_g a frecuencia armónica viene dada por la expresión:

$$Z_g = R_g + jhX_g \quad (2.3)$$

2.1.4 Modelado de cargas lineales

Se especifican modelos de combinación serie – paralelo de resistencia y reactancias, estimados a partir de la frecuencia fundamental. Estos modelos pueden ser utilizados para representar un agregado de cargas pasivas o motores. Se plantean tres diferentes modelos de carga:



(a) Modelo R, L en paralelo. (b) Modelo R(h), L en paralelo. (c) Modelo R, L en paralelo, con reactancia del transformador X_s en serie.

Figura 2.4. Modelos de cargas lineales.

a) Modelo R, L en paralelo:

$$R = \frac{V_{LL}^2}{P_{3\phi}} ; \quad X_L = jh \frac{V_{LL}^2}{Q_{3\phi}} \quad (2.4)$$

b) Modelo R(h), L en paralelo:

$$R(h) = \frac{V_{LL}^2}{(0.1h+0.9)P_{3\phi}} ; \quad X_L(h) = j \frac{V_{LL}^2}{(0.1h+0.9)Q_{3\phi}} \quad (2.5)$$

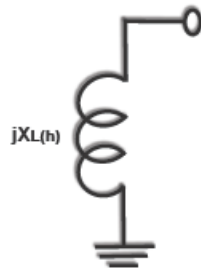
c) Modelo R, L en paralelo, con la reactancia resultante del transformador X_s en serie:

$$R = \frac{V_{LL}^2}{P_{3\phi}} ; \quad X_L(h) = j \frac{hV_{LL}^2}{6.7(\frac{Q_{3\phi}}{P_{3\phi}} - 0.74)} ; \quad X_s = j0.073hR \quad (2.6)$$

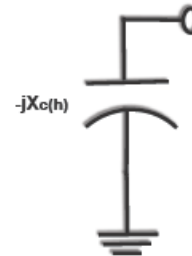
Donde V_{LL} es la tensión de línea obtenida a partir del CPF y $P_{3\phi}$, $Q_{3\phi}$ son las potencias activa y reactiva a frecuencia fundamental. El modelo 2.4b considera la total dependencia del armónico (h) y resulta apropiado para altas frecuencias. El modelo 2.4c es derivado de mediciones en cargas de media tensión, utilizando generadores de ondas a frecuencias de audio. Considerando la simplicidad y las referencias utilizadas, el modelo usado en este trabajo de grado es el 2.4a, el cual se asemeja al modelo 2.4c, pero sin incluir el transformador. Este modelo resulta una buena representación de cargas ya sean pasivas, rotativas, etc.

2.1.5 Modelación de elementos shunt

Todos los elementos pasivos, ya sea el caso de capacitores e inductores, son representados como dependientes de la frecuencia y se modelan con una reactancia capacitiva X_C o inductiva X_L a tierra. En este trabajo se modelará los bancos de condensadores mediante una capacitancia o inductancia simple, donde se desprecia la resistencia de fuga (pérdidas de aislamiento) o en serie (pérdidas óhmicas). Serán considerados como se muestra en la figura 2.5 y en la ecuación 2.7



(a) Modelo del inductor.



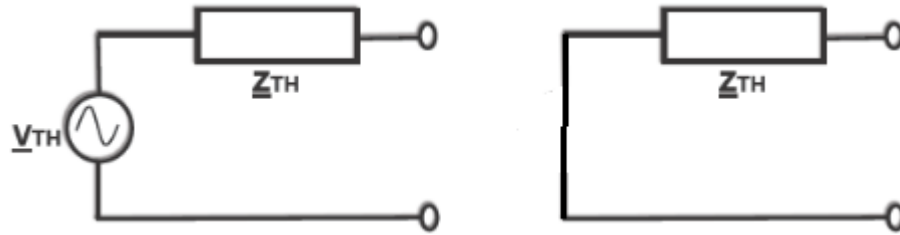
(b) Modelo del banco de condensadores.

Figura 2.5. Modelos a frecuencia armónica de elementos shunt.

$$X_L(h) = jh \frac{V_{LL}^2}{Q_{3\phi}}; \quad X_C(h) = -j \frac{V_{LL}^2}{hQ_{3\phi}} \quad (2.7)$$

2.1.6 Modelado de sistemas externos equivalentes

Se representa mediante un equivalente de Thevenin, donde la impedancia $\underline{Z}_{TH}$ corresponde a la impedancia de cortocircuito trifásica. La resistencia R_{TH} y reactancia X_{TH} de Thevenin son parámetros calculados a frecuencia fundamental.



(a) Modelo a frecuencia fundamental (b) Modelo a frecuencia armónica

Figura 2.6. Modelos del sistema externo.

El modelo del sistema externo a frecuencia armónica es similar al generador sincrónico, donde la fuente de tensión V_{TH} es cortocircuitada y el valor de la impedancia $\underline{Z}_{TH}$ varía de acuerdo al orden del armónico “ h ”,

$$\underline{Z}_{TH} = R_{TH} + jhX_{TH} \quad (2.8)$$

2.1.7 Representación de cargas no lineales

Para representar dispositivos de comportamiento no lineal, es decir, aquellos que involucran de alguna manera la conmutación electrónica, se utilizan fuentes de corriente armónicas que se inyectan a las barras donde están conectados físicamente. Son modeladas las inyecciones de corriente para cada armónico a partir de la corriente a frecuencia fundamental. Algunos de los dispositivos no lineales más comunes en las redes eléctricas son los compensadores estáticos de potencia reactiva (SVC, Static Var Compensator), variadores de velocidad de motores eléctricos (Drives), rectificadores, lámparas compactas fluorescentes (CFLs – caso de estudio), hornos de arco, entre otros.

En un primer modelo simple estas cargas se representan como fuentes de corriente ideal, independiente de las tensiones armónicas de la red (figura 2.7). En este caso se disponen de espectros armónicos típicos o característicos, en los cuales se indican la magnitud y el ángulo de la corriente como dependientes de la corriente a frecuencia fundamental.

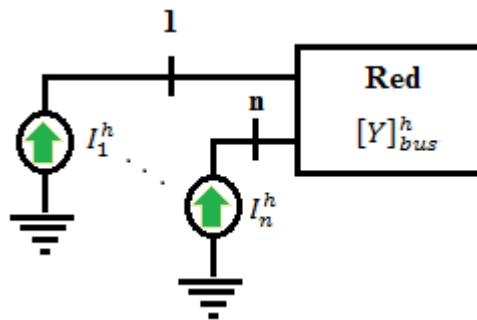


Figura 2.7. Fuentes de corriente ideal para el modelado de dispositivos no lineales.

Otra forma de representar estas cargas es mediante equivalentes de Norton (figura 2.8), las cuales sustituyen las fuentes de corrientes que modelan a los dispositivos no lineales y modifican la matriz de admitancia armónica de barra $[Y]_{bus}^h$, sumando a la posición de la admitancia del elemento no lineal, una nueva admitancia resultante de la fuente de Norton. Las corrientes resultantes del equivalente Norton dependen tanto de la tensión de barra donde está conectado el dispositivo, así como de las variables de control del mismo.

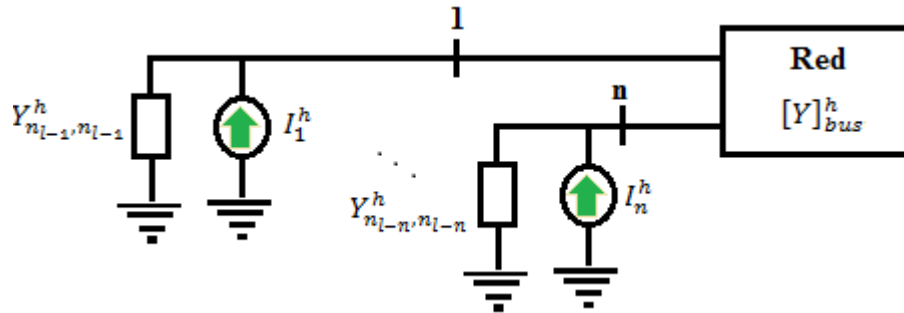


Figura 2.8. Equivalentes de Norton para el modelado de dispositivos no lineales.

2.2 Adecuación de Matpower para estudios de penetración armónica no iterativa

Para realizar análisis armónicos en Matpower es necesaria la modificación de su código fuente. Todas las modificaciones desarrolladas en este trabajo se realizaron bajo la plataforma de Matlab. En relación al formato de datos para realizar la HP, se utilizan los mismos formatos de datos implementados por Matpower, incluyendo nueva información en la estructura “mpc” para realizar la adecuación.

2.2.1 Adecuación del campo o matriz de barras

El campo “*bus data*”, se modifica al incluir una nueva columna para especificar las barras donde esté conectado algún dispositivo no lineal y es denominado con el índice “*nonl_load*” (figura 2.9). El índice “*nonl_load*” igual a 1 denota que hay un dispositivo no lineal conectado a esa barra, por el contrario, el 0 supone que no hay dispositivo conectado.

Adicionalmente se reestructura la función “*idx_bus*”, la cual define la estructura de las columnas y nombres de los índices del campo “*bus data*”. El código correspondiente a esta modificación se muestra en [6].

```
%% bus data
```

%	bus_i	type	Pd	Qd	Gs	Bs	area	Vm	Va	baseKV	zone	Vmax	Vmin	nonl_load
mpc.bus = [														
	1	3	0	0	0	0	1	1	0	69	1	1.05	0.95	0;
	2	2	0	0	0	0	1	1	0	13.8	2	1.05	0.95	0;
	3	1	0.6	0.53	0	0	1	1	0	0.48	4	1.05	0.95	0;
	4	1	0	0	0	0	1	1	0	69	1	1.05	0.95	0;
	5	1	2.24	2	0	6	1	1	0	13.8	3	1.05	0.95	0;
	6	1	0	0	0	0	1	1	0	13.8	3	1.05	0.95	0;
	7	1	1.15	0.29	0	0	1	1	0	0.48	5	1.05	0.95	1;
	8	1	1.31	1.13	0	0	1	1	0	4.16	6	1.05	0.95	0;
	9	1	0	0	0	0	1	1	0	13.8	3	1.05	0.95	0;
	10	1	0.81	0.8	0	0	1	1	0	0.48	7	1.05	0.95	0;
	11	1	0	0	0	0	1	1	0	13.8	3	1.05	0.95	0;
	12	1	0.37	0.33	0	0	1	1	0	0.48	8	1.05	0.95	0;
	13	1	2.8	2.5	0	0	1	1	0	2.4	9	1.05	0.95	0;
];														

Figura 2.9. Índice agregado en la matriz de barras, para el caso de 13 barras IEEE.

2.2.2 Adecuación del campo o matriz de generadores

Los variables " R_g " y " X_g " son agregados en forma de columna al campo "*generator data*". Estos corresponden a la resistencia y reactancia en el eje directo de los generadores sincrónicos, mientras si se trata de un sistema equivalente externo representa la impedancia de cortocircuito trifásica (figura 2.10). Estas impedancias se expresan en por unidad en la base de la cantidad definida en el campo "*system MVA base*". Se modifica la función "*idx_gen*" de Matpower, la cual especifica la nueva estructura e índices de las columnas del campo "*generator data*". El código correspondiente a esta modificación se muestra [6].

% generator data												
%	bus	Pg	Qg	Qmax	Qmin	Vg	mBase	status	Pmax	Pmin	Rg	Xg
mpc.gen = [												
1	0	0	50	0	1	10	1	100	0		0.00045	0.00990;
2	2	0	50	0	0.995	10	1	100	0		0.00192	0.07168;
];												

Figura 2.10. Índices agregados en la matriz de generadores, para el caso de 13 barras IEEE.

2.2.3 Espectro característico de las cargas no lineales. Modelo de fuente de corriente ideal

Se define un nuevo campo en la estructura "*mpc*" para asignar la información correspondiente al espectro armónico característico del dispositivo no lineal, denominado "*Harmonic Source Data*", (figura 2.11). Los índices de este campo están definidos en una nueva función "*idx_HSDData*", de estructura similar a las funciones "*idx_bus*" y "*idx_gen*" utilizadas por Matpower. El código correspondiente a esta nueva función se presenta en la referencia [6].

Toda la información del espectro es organizada en una matriz y cada fila representa un armónico h . Para cada h son especificados en las columnas los índices “ H ”, “ $percent$ ” y “ $angle$ ”; orden del armónico, porcentaje de la corriente inyectada en función de la corriente fundamental y el ángulo de fase, respectivamente. El índice “ $angle$ ”, representa los valores en formato de grados e internamente se llevan a formato de radianes.

La implementación de este nuevo campo está orientada al análisis armónico no iterativo.

```
%% Harmonic Source Data
% #H      percent  angle
mpc.HSData=[

    1      100.00    0.00
    3       0.00    0.00
    5      18.24   -55.68
    7      11.90   -84.11
    9       0.00    0.00
   11       5.73  -143.56
   13       4.01  -175.58
   15       0.00    0.00
   17       1.93   111.39
   19       1.39    68.30
   21       0.00    0.00
   23       0.94   -24.61
   25       0.86   -67.64
   27       0.00    0.00
   29       0.71  -145.46
   31       0.62   176.83
   33       0.00    0.00
   35       0.44    97.40
   37       0.38    54.36

];
```

Figura 2.11. Matriz del espectro característico para el caso de 13 barras IEEE.

2.2.4 Adecuación de la función matriz de admitancias de barra *MakeYbusH.m*

Esta función crea la matriz de admitancia de barra del caso de estudio. Recibe como parámetros de entrada la estructura “*mpc*” y su adecuación consiste en calcular para cada frecuencia armónica h , la matriz $[Y_{bus}^h]$ usando los modelos descritos en la sección 2.1.

La nueva función *MakeYbusH* se basa en la función *MakeYbus.m* de Matpower, en la cual para un sistema con n_l ramas se determinan las matrices primitivas $[Y_f]$ y $[Y_t]$ con las admitancias equivalentes vistas desde el inicio y final de cada rama. Usando las matrices de conexión transpuestas $[C_f^T]$, $[C_t^T]$ y el vector de admitancia shunt $[Y_{sh}]$, se obtiene la matriz de admitancia del sistema $[Y_{bus}]$ como:

$$[Y_{bus}] = [C_f]^T [Y_f] + [C_t]^T [Y_t] + [Y_{sh}] \quad (2.9)$$

De forma similar se construye la matriz de admitancias armónicas $[Y_{bus}^h]$, a partir de las matrices de admitancia de rama, elementos en paralelo (shunt), las nuevas matrices de cargas y los generadores sincrónicos (o sistema equivalente externo). El código correspondiente a esta función se muestra en [6]. La suma de estas matrices forman $[Y_{bus}^h]$ como:

$$[Y_{bus}^h] = [Y_{ramas}^h] + [Y_{carga}^h] + [Y_{shunt}^h] + [Y_g^h] \quad (2.10)$$

2.3 Ecuaciones de red y proceso de solución de penetración armónica (HP)

La metodología para la solución de penetración armónica se desarrolla de dos maneras: método iterativo y no iterativo. En ambas metodologías, para una red con n barras, todos los elementos del sistema de potencia son incorporados en una matriz $n \times n$ de admitancias armónicas del sistema, la cual relaciona el vector de fasores de corriente $\underline{I}^h$, con el vector de fasores de tensiones de las barras $\underline{V}^h$ para cada armónico (h).

$$[\underline{I}^h] = [\underline{Y}^h][\underline{V}^h] \quad (2.11)$$

En la solución de la ecuación 2.11, los dispositivos no lineales se pueden modelar de dos maneras: considerando la dependencia de la corriente con relación a las tensiones armónicas (caso de estudio en esta investigación a través de la metodología iterativa) o modelando los dispositivos no lineales por fuentes armónicas de corriente constante (caso de estudio para la metodología no iterativa, referencia [6]).

2.3.1. Penetración armónica no iterativa o simple NIHA (No Iterative Harmonic Analysis)

El método de análisis armónico no iterativo asume que las corrientes inyectadas por las cargas no lineales son independientes de las tensiones armónicas de la red, es decir, no considera la interacción entre la red y los dispositivos no lineales. El comportamiento de estos dispositivos sólo depende de las tensiones fundamentales en las barras. El procedimiento no iterativo al usar una fuente de corriente tipo Noton, se resume:

1. A partir de un flujo de cargas convencional, se obtienen las tensiones fundamentales ($h = 1$) en cada barra del sistema $[V_{bus}^h]^{k=0}$. Se estructura el vector de tensiones en el nodo de carga no lineal ($bus = n_l$), $[V_{bus=n_l}^h]^{k=0}$ donde las tensiones de frecuencia diferente a la fundamental (armónicas) son cero.
2. En el caso de existir otras variables φ de la carga no lineal (por ejemplo, los ángulos de conmutación de una CFL), a partir de su relación $\varphi_i = f(V^h)$ se obtienen. En términos generales estas variables se les conoce como variables de control.
3. Considerando el modelo del dispositivo no lineal como una fuente de corriente tipo Norton, a través de su relación $I^h = f(V^h, \varphi_1, \varphi_2)$, se obtienen las corrientes armónicas $[I_{bus=n_l}^h]^{k=0}$ y admitancias propias armónicas de la carga no lineal $[Y_{n_l, n_l}^h]$.
4. La matriz de admitancia de barra se estructura a partir de la matriz de admitancia del sistema y la matriz diagonal de admitancia armónica de la carga no lineal, como:

$$[Y_{bus}^h]^{k=0} = [Y_{sys}^h]^{k=0} + [Y_{n_l, n_l}^h]^{k=0} \quad (2.12)$$

5. Finalmente, las tensiones de barra para cada armónico h se obtienen mediante la solución del sistema lineal (ecuación 2.13):

$$[I_{bus}^h]^{k=0} = [Y_{bus-R}^h]^{k=0} x [V_{bus}^h]^{k=1} \quad (2.13)$$

Este paso se repite hasta alcanzar el armónico máximo de tensión.

2.3.2. Penetración armónica iterativa IHA (Iterative Harmonic Analysis)

La metodología iterativa es una extensión del NIHA, en la cual los dispositivos no lineales toman en cuenta la interacción armónica, es decir, se modelan

como fuentes de corrientes controladas por las tensiones armónicas y otras variables de control.

En la penetración armónica iterativa existen dos aspectos fundamentales. Primero, las corrientes $I_{bus=n_l}^h$ de los dispositivos no lineales deben ser modificadas para cada armónico $h = 3, 5, 7 \dots$. Además, las ecuaciones que caracterizan el comportamiento de estos dispositivos deben reflejar la dependencia con las tensiones armónicas [9]. La metodología IHA puede resumirse de la siguiente manera:

1. A partir del método no iterativo y mediante la ecuación 2.13, se conoce el vector de tensiones armónicas en el nodo de carga no lineal $[V_{bus=n_l}^h]^{k=1}$, en su primera iteración ($k = 1$).
2. Utilizando como criterio de convergencia la distorsión armónica total THD, se determina en el nodo de carga no lineal:

$$THD^k = \frac{\sqrt{\left(\sum_{h=3}^{h_{max}} [V_{bus=n_l}^h]^k\right)^2}}{V_{bus=n_l}^1} \quad (2.14)$$

3. Se repiten los pasos del 2 al 5 del método no iterativo.
4. A través de la ecuación 2.14 se calcula la distorsión armónica total para la iteración $k + 1$ y se evalúa el criterio de convergencia.
5. En caso de no cumplir el criterio de convergencia se repite el procedimiento.

En la figura 2.12, se presenta un diagrama de flujo que resume ambas metodologías.

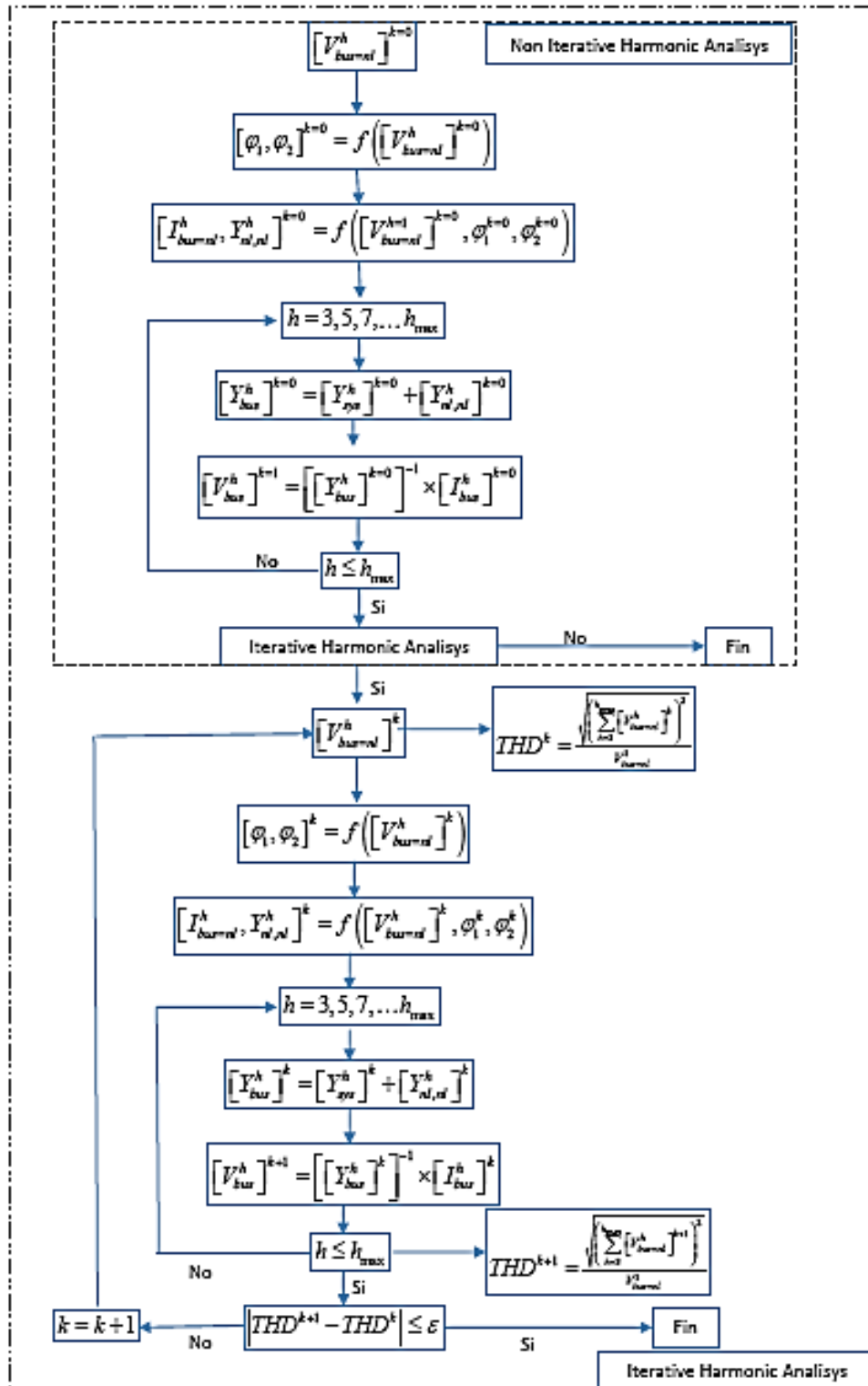


Figura 2.12. Diagrama de flujo para el análisis de penetración armónica.

Cuando se estudian grandes redes de potencia, el hecho de considerar todas las barras del sistema en el proceso iterativo, puede aparecer problemas de velocidad de convergencia y grandes demandas de memoria computacional. Por tal motivo, una forma de agilizar el IHA, es reducir el sistema únicamente a las barras donde se encuentran conectados los dispositivos no lineales, mediante la técnica de eliminación Gaussiana o método de Kron, obteniéndose una nueva matriz armónica reducida $[Y_R^h]$.

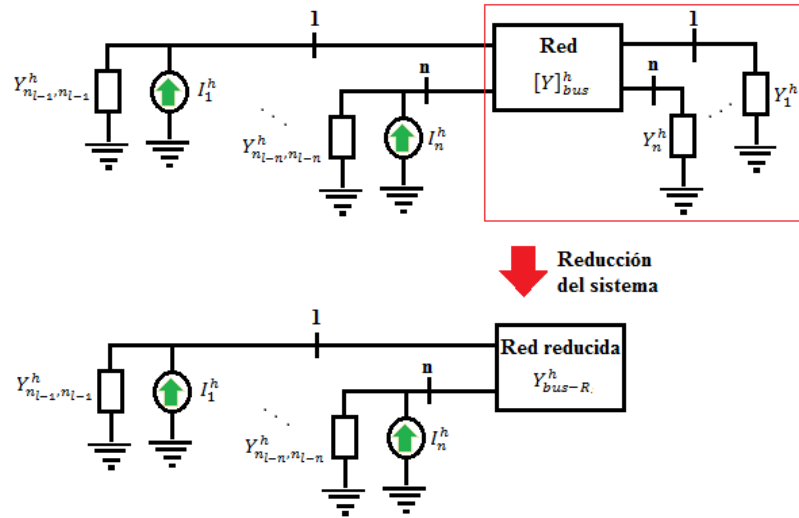


Figura 2.13. Reducción del sistema en el IHA.

En el caso de estudio a desarrollar en el capítulo V, se modelará la carga no lineal como una fuente de Norton y el sistema no será reducido a través de la eliminación Gaussiana, ya que se trata de un sistema de pequeñas dimensiones con tan sólo 13 barras y una carga no lineal. Se trabajará el sistema de 13 barras del IEEE a través de sus representaciones matriciales completas, mediante el análisis de penetración armónica iterativa descrito anteriormente.

2.4 Distorsión armónica total

La distorsión armónica total (THD) es un indicador del contenido armónico de una onda sinusoidal distorsionada. Según el estándar IEEE Std. 519-2014, es “usado para definir los efectos de los armónicos en las tensiones de los sistemas de potencias”, y es expresado como porcentaje de la tensión fundamental

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{h=2}^{50} (V^h)^2}{V_1^2}} * 100\% \quad (2.15)$$

Donde $\sum_{h=2}^{50} (V^h)^2$ es la suma al cuadrado de las magnitudes de todas las tensiones armónicas en valor eficaz y por lo general, la suma se realiza hasta el orden armónico 50 y V_1 es el valor *rms* de la tensión fundamental. En sistemas de 69 kV o de menor tensión, el límite de distorsión corresponde con el percentil 95 y deberá ser menor o igual a 8% [10].

2.5 Métodos numéricos para la solución de los estudios de penetración armónica iterativa.

El análisis armónico iterativo (IHA), determina la inyección armónica de los dispositivos no lineales a través de las expresiones que caracterizan su funcionamiento. Una vez obtenida dicha inyección armónica, se calculan las tensiones en los nodos del sistema. Por consiguiente, la metodología IHA permite estudiar el dispositivo no lineal de forma independiente a la red y poder combinar, por ejemplo, los métodos en el dominio del tiempo o en el dominio de la frecuencia, combinando las ventajas de ambos métodos [11]. Para efectos del presente trabajo de

grado, se representan todos los elementos del sistema de potencia incluyendo la carga no lineal en el dominio de la frecuencia.

Las ecuaciones de red que describen la metodología de solución de penetración armónica iterativa pueden ser resueltas mediante los métodos numéricos de Jacobi o Newton.

El método iterativo de Jacobi parte en el hecho de utilizar para el cálculo de las variables, un vector de arranque aproximado para proceder a la sustitución en las ecuaciones de recurrencia y obtener una nueva aproximación, hasta lograr una convergencia que se alcanza una vez que el error entre dos iteraciones consecutivas sea menor a una cota superior. En el análisis armónico iterativo, la metodología de Jacobi plantea la solución de la siguiente manera:

$$\left[\underline{V}_h^{m+1} \right] = \left[\underline{Y}_h^m \right]^{-1} * \left[\underline{I}_h^m \right] \quad (2.16)$$

Donde el vector de tensiones armónicas es actualizado, mediante el proceso iterativo que involucra las corrientes y la matriz de admitancias armónicas, para cada iteración m .

Por otro lado, el método iterativo de Newton suele aplicarse cuando el estudio de penetración armónica iterativa es planteado como un sistema de ecuaciones no lineales igualado a cero, es decir:

$$F(x) = 0 \quad (2.17)$$

Este sistema puede presentar múltiples soluciones matemáticamente posibles y su resolución numérica debe proporcionar la solución $X^{(s)}$. Ahora bien, a diferencia del método de Jacobi, el método de Newton permite una rápida convergencia y una

solución correcta, siempre y cuando los valores iniciales de las incógnitas estén lo suficientemente cerca de la solución.

El método de Newton partiendo de unas condiciones iniciales $X^{(0)}$ genera una secuencia de valores $X^{(1)}, \dots, X^{(i)}, \dots, X^{(m)}$ que convergen a la solución $X^{(s)}$ si las condiciones iniciales $X^{(0)}$, están suficientemente próximas a ella. En fin, consiste en la aplicación iterativa del siguiente algoritmo:

$$x^{(i+1)} = x^{(i)} - DF(x^{(i)})^{-1} * F(x^{(i)}) \quad (2.18)$$

Desde el valor inicial $x^{(0)}$, donde $DF(x)$ es el jacobiano de la función $F(x)$. El proceso iterativo finaliza cuando $\| F(x) \|_2 < \epsilon$

CAPÍTULO III

MODELADO DE LAS LÁMPARAS COMPACTAS FLUORESCENTES (CFL)

El uso de las lámparas compactas fluorescentes en los sistemas de distribución de energía eléctrica se ha incrementado en las últimas décadas debido a su bajo consumo de potencia. Sin embargo, su comportamiento no lineal afecta negativamente la calidad del servicio de energía eléctrica. Por esta razón, es importante analizar las características no lineales y el modelado de las CFLs para evaluar las emisiones de corrientes armónicas que éstas generan. En base a las referencias [4] y [5], se proponen modelos armónicos en el dominio de la frecuencia, mediante formatos de matrices de admitancias acopladas, basados en el circuito equivalente de las CFLs. A continuación, se presenta un resumen del modelo de las CFLs basados en [4] y [5].

3.1 Modelo completo de la CFL (modelo MF)

Debido al compromiso entre la distorsión armónica, el costo, la vida útil y el control del factor de potencia de una CFL, existen cuatro categorías principales de balasto electrónico: circuito simple, circuito de filtrado pasivo, circuito de llenado del valle y circuito de filtrado activo. Estos circuitos están asociados con cuatro categorías de calidad en cuanto a sus espectros armónicos: bajo, promedio, bueno y excelente, respectivamente. La discusión entre los fabricantes y las compañías de electricidad, se centra en la elección entre la calidad y el costo aceptable de las CFLs, resolviéndose finalmente por medio de reglamentos. Por lo tanto, las categorías de espectros "bajo" y "promedio" cubren la mayor parte de la cuota del mercado de CFL de baja potencia (<25 W), ya que el único requisito que fijan las normativas (por

ejemplo, ANSI C82.77-2002 y ENERGY STAR CFL) es un factor de potencia mínimo de 0,5. Las lámparas fluorescentes compactas por encima de 25 W son menos contaminantes debido a que deben cumplir con los requisitos de emisión de corriente armónica para equipos de clase C de la norma IEC 61000-3-2 (equipos de iluminación con potencia de entrada superior a 25 W).

El modelo de la CFL que se presenta a continuación, corresponde a la categoría de espectros "promedio y bajo". En la figura 3.1a y 3.1b, se ilustra la forma de onda de la corriente alterna típica y el circuito equivalente.

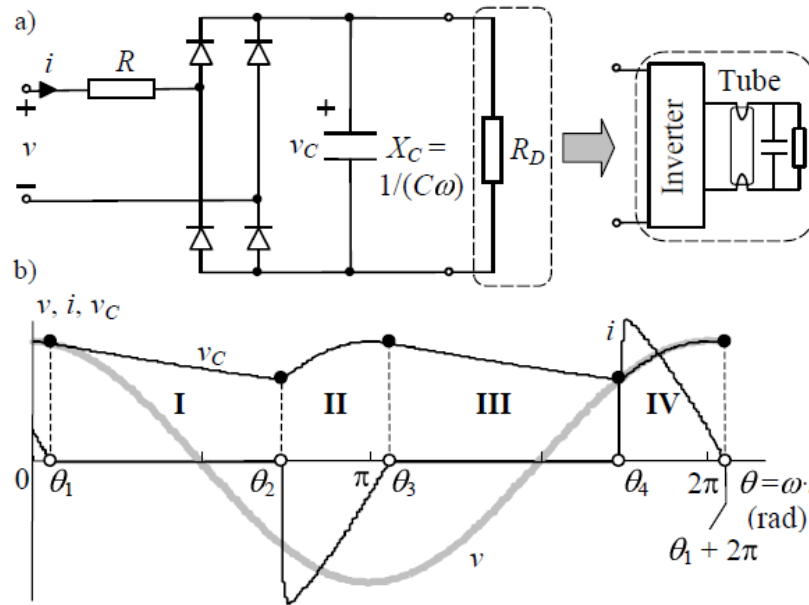


Figura 3.1. Modelado CFL. (a) Circuito equivalente de CFL. (b) Formas de onda de: tensión de alimentación v , corriente AC i y tensión DC V_C .

La tensión de alimentación “ v ” en los terminales de la CFL se caracteriza a través de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
v(\theta) &= \sqrt{2} * \sum_{k \geq 1} V_k * \cos(k * \theta + \phi_{V_k}) \\
&= \sqrt{2} V_1 \left(\cos(\theta + \phi_{V_1}) + \sum_{k \geq 1} m_k * \cos(k * \theta + \phi_{V_k}) \right) \quad (3.1)
\end{aligned}$$

Donde $m_k = V_k/V_1$ es la distorsión de tensión armónica individual.

Para caracterizar el comportamiento armónico de las CFLs en el dominio de la frecuencia, se utiliza el modelo de *matriz de admitancia acoplada*, que puede expresarse de la siguiente manera:

$$\underline{I} = \underline{Y}_F * \underline{V} \rightarrow \begin{bmatrix} \underline{I}_1 \\ \underline{I}_3 \\ \vdots \\ \underline{I}_h \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11} & \underline{Y}_{13} & \dots & \underline{Y}_{1k} & \dots \\ \underline{Y}_{31} & \underline{Y}_{33} & \dots & \underline{Y}_{3k} & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \\ \underline{Y}_{h1} & \underline{Y}_{h3} & & \underline{Y}_{hk} & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \underline{V}_1 \\ \underline{V}_3 \\ \vdots \\ \underline{V}_k \\ \vdots \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Donde $\underline{I}_h = I_h \angle \phi_{I_h}$ y $\underline{V}_k = V_k \angle \phi_{V_k}$ son los fasores de la corriente alterna h^{th} y la tensión armónica de alimentación K^{th} ($h = 1, 3, 5 \dots H$ y $k = 1, 3, 5 \dots K$). H y K son los armónicos más altos generados por la corriente alterna y la tensión de alimentación. Las admitancias del modelo son:

$$\underline{Y}_F = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11}^+ & \underline{Y}_{13}^+ & \dots & \underline{Y}_{1k}^+ & \dots \\ \underline{Y}_{31}^+ & \underline{Y}_{33}^+ & \dots & \underline{Y}_{3k}^+ & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \\ \underline{Y}_{h1}^+ & \underline{Y}_{h3}^+ & & \underline{Y}_{hk}^+ & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11}^- & \underline{Y}_{13}^- & \dots & \underline{Y}_{1k}^- & \dots \\ \underline{Y}_{31}^- & \underline{Y}_{33}^- & \dots & \underline{Y}_{3k}^- & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \\ \underline{Y}_{h1}^- & \underline{Y}_{h3}^- & & \underline{Y}_{hk}^- & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} * \underline{D} \quad (3.3)$$

Dónde: $\underline{D} = \text{diag } e^{-j2\phi_{V_1}}, e^{-j2\phi_{V_3}}, \dots, e^{-j2\phi_{V_k}}, \dots$

Los ángulos de conmutación θ_1 y θ_2 , importantes en la caracterización de las admitancias del modelo, son los ángulos de extinción y de disparo del puente de

diodos, correspondientes a los segmentos I y II respectivamente (figura 3.1b), se obtienen resolviendo la función de error del sistema no lineal:

$$F(\theta_1, \theta_2) = (f_1, f_2) = 0$$

$$f_1(\theta_1, \theta_2) = V_C^{(I)}(\theta_2) + v(\theta_2) = \sum_{k=1}^K \text{Re}(\underline{V}_k \cdot e^{jk\theta_1} \cdot e^{\frac{-X_C}{R_D}\theta_2 - \theta_1}) + \sum_{k=1}^K \text{Re}(\underline{V}_k \cdot e^{jk\theta_2}) = 0$$

$$f_2(\theta_1, \theta_2) = i^{II}(\theta_1 + \pi) = \sum_{k=1}^K \text{Re}(\underline{\gamma}_k \cdot \underline{V}_k \cdot e^{jk\theta_1}) + \sum_{k=1}^K \text{Re}(\underline{\gamma}_k \underline{V}_k \cdot e^{jk\theta_2} \cdot e^{-X_C \frac{1}{R_D} + \frac{1}{R}(\theta_1 - \theta_2 + \pi)}) = 0 \quad (3.4)$$

Donde $V_C^{(I)}(\theta_2)$ es la tensión continua del segmento I en el ángulo de disparo θ_2 e $i^{II}(\theta_1 + \pi)$ es la corriente alterna del segmento II en el ángulo de extinción $\theta_3 = \theta_1 + \pi$.

$$\text{Con: } \underline{\gamma}_k = \left(\frac{k}{X_C} - j \frac{1}{R_D} \right) \frac{X_C}{k \cdot R - j X_C \left(\frac{R}{R_D} + 1 \right)}$$

En la figura 3.2, se muestra el circuito equivalente denominado modelo armónico completo o modelo MF. La función de error de los ángulos de conmutación y el modelo de matriz de admitancia acoplada, se representan por separado.

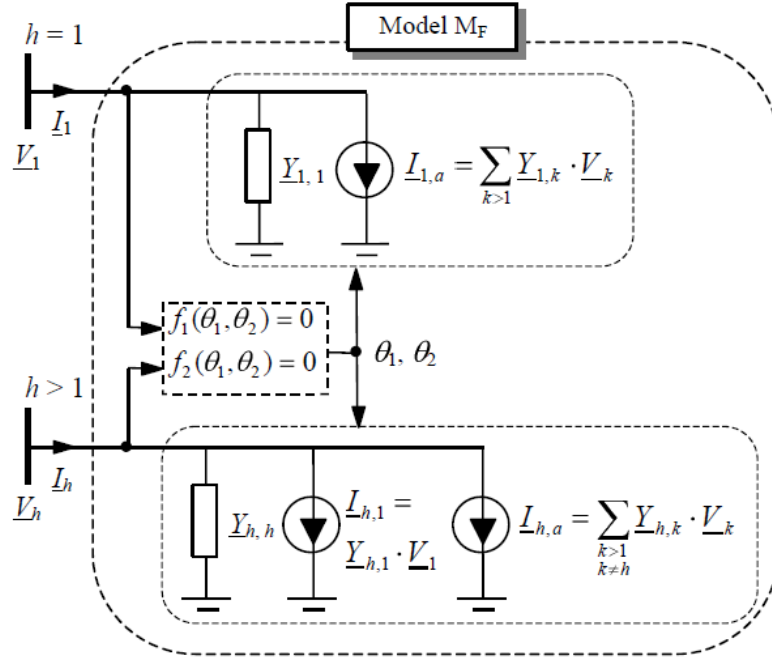


Figura 3.2. Circuito equivalente del modelo MF.

3.2 Modelo simplificado de las CFLs (modelo de admitancias acopladas)

Las corrientes armónicas inyectadas por las CFLs de espectro “promedio y bajo”, pueden determinarse con precisión a partir del modelo MF. Sin embargo, la determinación de las tensiones y corrientes armónicas de la red a partir de dicho modelo requiere un alto esfuerzo computacional en estudios a gran escala de penetración armónica. Por esta razón, se presentan modelos simplificados que requieren menos esfuerzos computacionales de cálculo y pueden adecuarse con más facilidad a programas de análisis de penetración armónica.

El análisis de las matrices de admitancias acopladas permite derivar varios modelos de CFL en base a las admitancias $\underline{Y}_{h,k}^+$ y $\underline{Y}_{h,k}^-$ de la matriz $\underline{Y}_F$.

Los modelos derivados del estudio de las admitancias acopladas [12], suponen despreciar ciertas admitancias ya que algunas son menos dominantes que otras. Por tal motivo, con el fin de determinar cuáles admitancias $\underline{Y}_{h,k}^+$ y $\underline{Y}_{h,k}^-$, pueden ser despreciadas a partir de un estudio de Montecarlo descrito en [4], los modelos que se obtienen son los siguientes:

- **Modelo #1:** se desprecian las admitancias $\underline{Y}_{1,k>1}^-$, ya que los valores medios son aproximadamente iguales a 0,04 veces las admitancias: $\underline{Y}_{1,1}^+$ y $\underline{Y}_{1,1}^-$, y a 0,6 veces las admitancias $\underline{Y}_{1,k>1}^+$, con lo cual se tiene:

$$\underline{Y}_{A1} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11}^+ & \underline{Y}_{13}^+ & \dots & \underline{Y}_{1k}^+ & \dots \\ \underline{Y}_{31}^+ & \underline{Y}_{33}^+ & \dots & \underline{Y}_{3k}^+ & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \\ \underline{Y}_{h1}^+ & \underline{Y}_{h3}^+ & & \underline{Y}_{hk}^+ & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11}^- & 0 & \dots & 0 & \dots \\ \underline{Y}_{31}^- & \underline{Y}_{33}^- & \dots & \underline{Y}_{3k}^- & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \\ \underline{Y}_{h1}^- & \underline{Y}_{h3}^- & & \underline{Y}_{hk}^- & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} * \underline{D} \quad (3.5)$$

- **Modelo #2:** se desprecian las admitancias $\underline{Y}_{h>1,k>1}^-$, debido a que sus valores medios son aproximadamente iguales a 0,05 veces las admitancias: $\underline{Y}_{h>1,1}^+$ y $\underline{Y}_{h>1,1}^-$, y a 0,15 veces la admitancia $\underline{Y}_{h>1,k>1}^+$. La matriz resultante es la siguiente:

$$\underline{Y}_{A2} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11}^+ + \underline{Y}_{11}^- \cdot e^{-j2\phi_{V1}} & \underline{Y}_{13}^+ & \dots & \underline{Y}_{1k}^+ & \dots \\ \underline{Y}_{31}^+ + \underline{Y}_{31}^- \cdot e^{-j2\phi_{V1}} & \underline{Y}_{33}^+ & \dots & \underline{Y}_{3k}^+ & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \\ \underline{Y}_{h1}^+ + \underline{Y}_{h1}^- \cdot e^{-j2\phi_{V1}} & \underline{Y}_{h3}^+ & & \underline{Y}_{hk}^+ & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

- **Modelo #3:** las admitancias $\underline{Y}_{1,k>1}^+$ se desprecian, ya que los valores medios son aproximadamente iguales a 0,06 veces las admitancias: $\underline{Y}_{1,1}^+$ y $\underline{Y}_{1,1}^-$. La matriz resultante es la siguiente:

$$\underline{Y}_{A3} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11}^+ + \underline{Y}_{11}^- \cdot e^{-j2\phi_{V1}} & 0 & \dots & 0 & \dots \\ \underline{Y}_{31}^+ + \underline{Y}_{31}^- \cdot e^{-j2\phi_{V1}} & \underline{Y}_{33}^+ & \dots & \underline{Y}_{3k}^+ & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \\ \underline{Y}_{h1}^+ + \underline{Y}_{h1}^- \cdot e^{-j2\phi_{V1}} & \underline{Y}_{h3}^+ & & \underline{Y}_{hk}^+ & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

- **Modelo #4:** las admitancias $\underline{Y}_{h>1,k \neq h}^+$ se desprecian, debido a que los valores medios son aproximadamente iguales a 0,33 veces las admitancias: $\underline{Y}_{h>1,1}^+$ y $\underline{Y}_{h>1,1}^-$, y a 0,5 veces las admitancias de $\underline{Y}_{h>1,k=h}^+$, con lo cual se tiene:

$$\underline{Y}_{A4} = \begin{bmatrix} \underline{Y}_{11}^+ + \underline{Y}_{11}^- \cdot e^{-j2\phi_{V1}} & 0 & \dots & 0 & \dots \\ \underline{Y}_{31}^+ + \underline{Y}_{31}^- \cdot e^{-j2\phi_{V1}} & \underline{Y}_{33}^+ & \dots & 0 & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \\ \underline{Y}_{h1}^+ + \underline{Y}_{h1}^- \cdot e^{-j2\phi_{V1}} & 0 & & \underline{Y}_{hh}^+ & \dots \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Cabe destacar, la importancia de la función de error aproximada que surge del modelo simplificado de las CFLs, ya que a diferencia de la expresión 3.4, permite determinar los ángulos de conmutación (θ_1 y θ_2) sin considerar la tensión de alimentación sinusoidal, es decir, $m_k = \frac{V_k}{V_1} = 0$, para $k > 1$.

$$F_{aprox}(\theta_1, \theta_2) = (f_{1,aprox}, f_{2,aprox}) = 0$$

$$f_{1,aprox}(\theta_1, \theta_2) = \text{Re} \left(\underline{V}_1 \cdot e^{j\theta_1} \cdot e^{\frac{-X_C}{R_D} \theta_2 - \theta_1} \right) + \text{Re} \left(\underline{V}_1 \cdot e^{j\theta_2} \right) = 0$$

$$f_{2,aprox}(\theta_1, \theta_2) = \text{Re} \left(\underline{\gamma}_1 \cdot \underline{V}_1 \cdot e^{j\theta_1} \right) + \text{Re} \left(\underline{\gamma}_1 \underline{V}_1 \cdot e^{j\theta_2} \cdot e^{-X_C \frac{1}{R_D} + \frac{1}{R} (\theta_1 - \theta_2 + \pi)} \right) = 0 \quad (3.9)$$

Finalmente, los modelos simplificados descritos anteriormente y su ámbito de aplicación se muestran en la tabla 3.1, en función de la distorsión armónica total (THD) de la tensión de alimentación.

Tabla 3.1. Modelos CFL.

THD (%)	Modelo CFL	Matriz de admitancia acoplada	Sistema de funciones de error
8	M_F	$\underline{Y}_F$	$f_i(\theta_1, \theta_2)$
6	M_{A1}	$\underline{Y}_{A1}$	
4	M_{A2}	$\underline{Y}_{A2}$	
2	M_{A3}	$\underline{Y}_{A3}$	
1	M_{A4}	$\underline{Y}_{A4}$	$f_{i,apx}(\theta_1, \theta_2)$
	M_{A5}		

CAPÍTULO IV

CASO DE ESTUDIO DE PENETRACIÓN ARMÓNICA NO ITERATIVA EN MATPOWER USANDO LA FUNCIÓN “*runpfH.m*”

Para llevar a cabo estudios de penetración armónica no iterativa en Matpower, es necesario adecuar e implementar algunas funciones como se mencionó en el capítulo II. En base a la referencia [6] se describe la implementación de la función *runpfH*.

4.1 Descripción de la función *runpfH.m*

Esta función permite realizar la penetración armónica (HP) bajo el método no iterativo (NIHA) e imprime los resultados en pantalla. El programa es ejecutado escribiendo el comando:

» *runpfH(nombre del archivo)*

La función recibe como parámetros de entrada los datos del caso de estudio (estructura “*mpc*”) y hace un llamado de la función *MakeYbusH* (descrita en el capítulo II). Su implementación se puede dividir en dos etapas: lectura-adecuación de datos y procesamiento e impresión en pantalla de los resultados.

En primer lugar, la lectura y adecuación de datos le permite a la función, ordenar de una forma más simple todos los datos de las barras, ramas y generadores. Se utilizan funciones propias de MATPOWER, como por ejemplo, “*loadcase*” y

“*ext2int*”, las cuales permiten que un caso de estudio sea cargado y se eliminen de forma momentánea todos los componentes aislados.

Por último, una vez ordenados los datos en la etapa de procesamiento del NIHA, la función establece un resumen del sistema por medio de un arreglo basado en el comando *fprintf* de MATLAB. El código correspondiente a esta función se muestra en la referencia [6].

4.2 Descripción de la metodología de penetración armónica bajo el método no iterativo

La metodología según la referencia [6], para resolver un caso de estudio de HP bajo NIHA empleando Matpower, se muestra en el diagrama de la figura 4.1

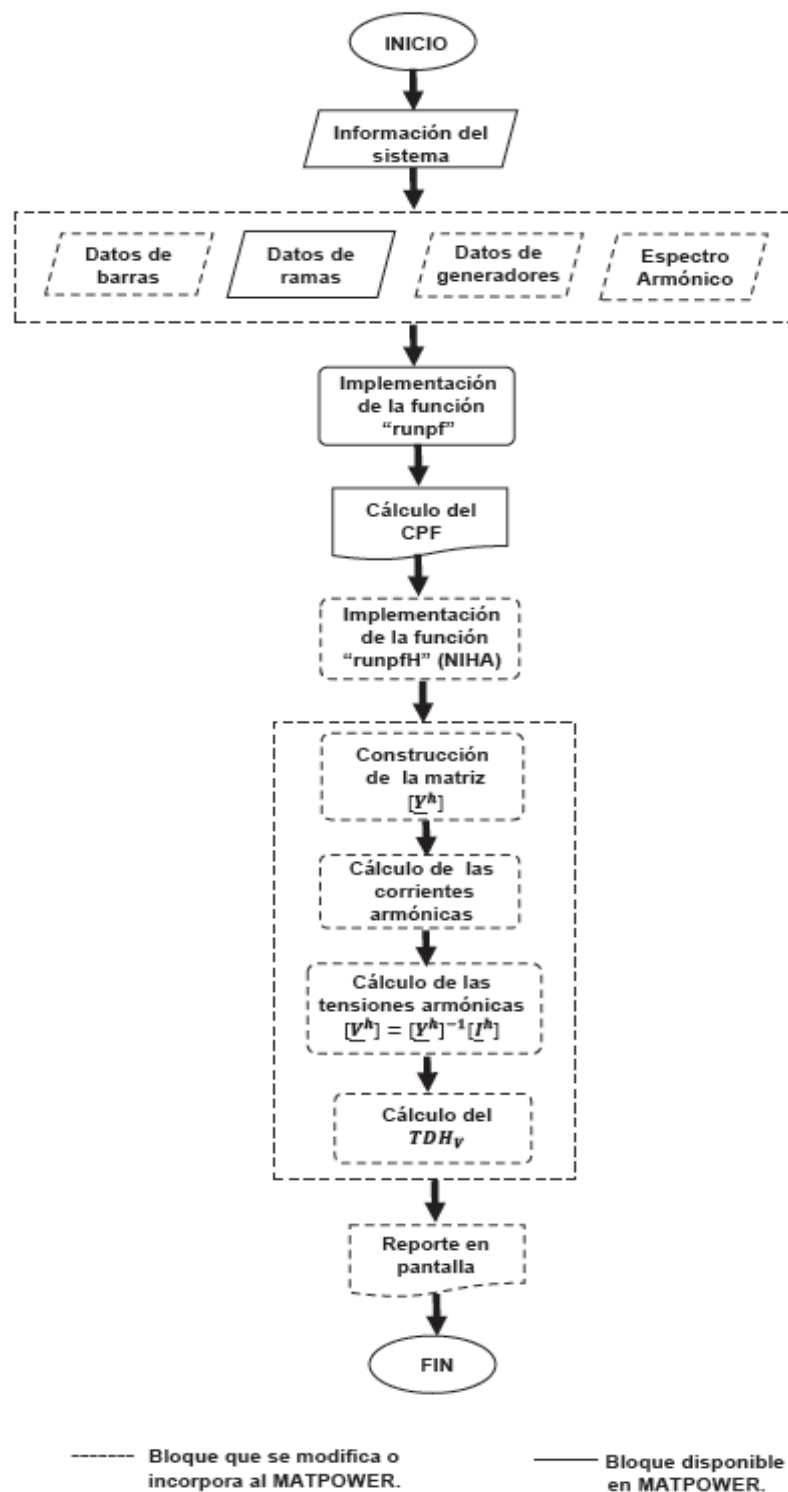


Figura 4.1. Diagrama de flujo en base a la metodología NIHA, empleada para la obtención de HP en Matpower.

4.3 Caso de estudio de penetración armónica bajo la metodología no iterativa en Matpower

Se analiza un sistema de trece barras tomado de la referencia [7], el cual es representativo de una planta industrial de tamaño mediano.

El sistema de la figura 4.2 es descrito por los datos a frecuencia fundamental de las tablas 4.1 y 4.2. Este caso de estudio consta de 13 barras alimentadas desde un sistema externo en 69kV y una planta local que opera en 13.8kV. Los valores base del sistema corresponden a 13.8kV y 10MVA respectivamente. Las capacitancias de los conductores de potencia (líneas cortas) se desprecian. Se considera un sistema balanceado, con lo cual sólo se proporcionan los datos de secuencia positiva.

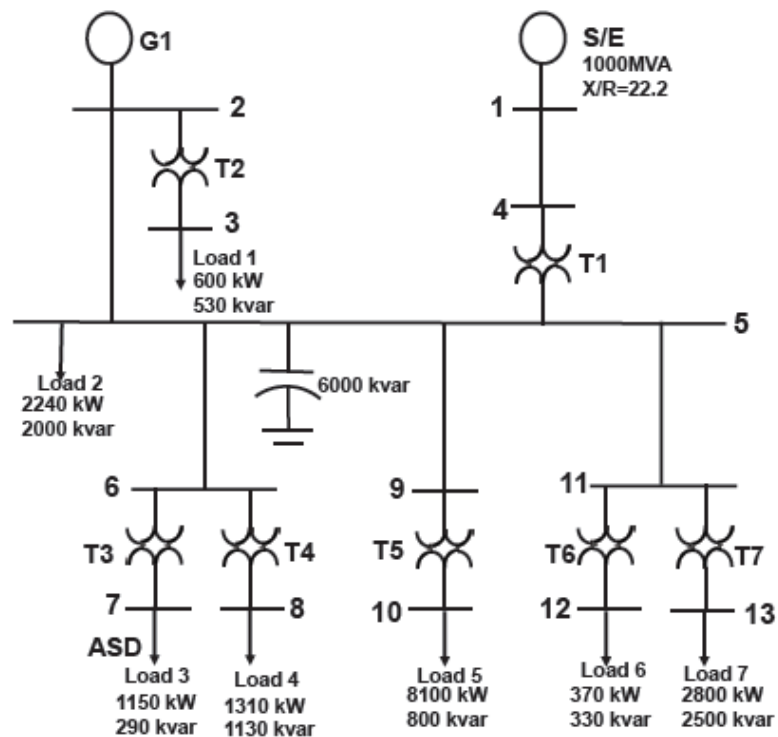


Figura 4.2. Diagrama unifilar del sistema de 13 barras del IEEE.

Para mantener las tensiones adecuadas, el sistema requiere de una compensación reactiva en la barra 5, mediante un banco de condensadores. Los datos de las cargas y del banco se dan en valores reales. El único dispositivo no lineal en el sistema es un variador de velocidad ajustable (ASD), conectado en la barra 7.

Tabla 4.1. Datos de las líneas (en bases de 13.8kV, 69kV y 10MVA)

Desde	Hasta	R (p.u.)	X (p.u.)
1	4	0,00139	0,00296
5	2	0,00122	0,00243
5	6	0,00075	0,00063
5	9	0,00157	0,00131
5	11	0,00109	0,00091

Tabla 4.2. Datos de transformadores (en bases a valores nominales)

Desde	Hasta	Voltaje [kV]	Tap	kVA	% R	% X
4	5	69:13,8	69	15.000	0,4698	7,9862
2	3	13,8:0,48	13,45	1.500	0,9593	5,6694
6	7	13,8:0,48	13,45	1.250	0,7398	4,4388
6	8	13,8:4.16	13,11	1.725	0,7442	5,9537
9	10	13,8:0,48	13,45	1.500	0,8743	5,6831
11	12	13,8:0,48	13,80	1.500	0,8363	5,4360
11	13	13,8:2,4	13,11	3.750	0,4568	5,4810

Otros datos y consideraciones utilizadas para el análisis armónico de este caso de estudio son:

- El generador local es representado como un simple equivalente Thevenin. El voltaje interno es $(13,981 \text{ kV} \angle -1,52^\circ)$ y la impedancia equivalente de régimen permanente es $(0,0366 + j1,3651)\Omega$.

- El modelo *RL* de parámetros concentrados en paralelo se utiliza para representar las cargas lineales.
- La carga no lineal (ASD) es representado mediante una fuente de corriente ideal y cuyo espectro armónico típico esta dado en la tabla 4.3.

Tabla 4.3. Espectro del ASD de corrientes en magnitud y ángulo

Armónico	Porcentaje (%)	Ángulo relativo (°)
1	100,00	0,00
5	18,24	-55,68
7	11,90	-84,11
11	5,73	-143,56
13	4,01	-175,58
17	1,93	111,39
19	1,39	68,30
23	0,94	-24,61
25	0,86	-67,64
29	0,71	-145,46
31	0,62	176,83
35	0,44	97,40
37	0,38	54,36

4.3.1 Ingreso de los datos al sistema

Los datos del sistema son ingresados en Matpower, a través de un archivo de extensión *.m* con estructura “*mpc*” denominada “*caso13barras*” [6]. Cabe destacar que las impedancias en porcentaje de los transformadores expresadas en términos de %R y %X, son llevadas a la base del sistema:

Tabla 4.4. Datos de transformadores en por unidad (en las bases de estudio)

Desde	Hasta	R (p.u.)	X (p.u.)
4	5	0,00313	0,05324
2	3	0,06391	0,37797
6	7	0,05918	0,35510
6	8	0,04314	0,34514
9	10	0,05829	0,37888
11	12	0,05575	0,36240
11	13	0,01218	0,14616

4.3.2 Ejecución del flujo de potencia convencional

El CPF se ejecuta en Matpower mediante el comando *runpf(caso13barras)* y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.5.

Tabla 4.5. Resultados obtenidos en Matpower del estudio de flujo de potencia convencional.

Barra #	Voltaje		Generación		Carga	
	Mag(p.u.)	Ang(°)	P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
1	1,000	0,000*	7,36	0,54	-	-
2	0,995	-2,359	2,00	1,86	-	-
3	0,996	-3,447	-	-	0,60	0,53
4	0,999	-0,121	-	-	-	-
5	0,994	-2,370	-	-	2,24	2,00
6	0,994	-2,372	-	-	-	-
7	1,002	-4,566	-	-	1,15	0,29
8	1,001	-4,578	-	-	1,31	1,13
9	0,994	-2,368	-	-	-	-
10	0,984	-3,855	-	-	0,81	0,80
11	0,994	-2,367	-	-	-	-
12	0,979	-3,048	-	-	0,37	0,33
13	1,006	-4,430	-	-	2,80	2,50
-	Total:		9,36	2,40	9,28	7,58

*: Denota la barra *Slack*.

4.3.3 Resolución de la penetración armónica simple

Siguiendo con el procedimiento descrito en el diagrama de la figura 4.1, se obtienen a continuación las tensiones armónicas del sistema, escribiendo en Matlab el comando:

$\ggg \text{runpfH}(\text{caso13barras})$

- Cálculo de las corrientes armónicas de inyección

La corriente a frecuencia fundamental del ASD I_{ASD}^1 , es obtenida en Matpower a partir del CPF, usando la potencia aparente $\underline{S}_{ASD}$ y tensión $\underline{V}_7^1$:

$$\underline{S}_{ASD} = \frac{(1,15 \text{ MW} + j0,29 \text{ Mvar})}{10 \text{ MVA}} = (0,1150 + j0,0290) \text{ p.u} \quad (4.1)$$

$$\underline{I}_{ASD}^1 = \frac{\underline{S}_{ASD}^*}{(\underline{V}_7^1)^*} = (0,1121 - j0,0380) \text{ p.u} = (0,1184 \text{ p.u} \angle -18,7258^\circ) \quad (4.2)$$

A partir de I_{ASD}^1 , Matpower obtiene los valores de las corrientes armónicas inyectadas en la barra 7 mediante el espectro típico y cuyos resultados se muestran en la tabla 4.6, con valores de magnitud y ángulo de fase de las corrientes inyectadas.

Tabla 4.6. Corrientes armónicas de la carga no lineal (ASD)

Armónico	Magnitud (p.u.)	Ángulo de fase (°)
1	0,1184	-18,7258
5	0,0216	-74,4058
7	0,0141	-102,8297
11	0,0068	-162,2797
13	0,0068	-194,2997
17	0,0023	92,6703
19	0,0016	49,5803
23	0,0011	-43,3297
25	0,0010	-86,3597
29	0,0008	-164,1797
31	0,0007	158,1103
35	0,0005	78,6803
37	0,0004	35,6403

Con el espectro armónico de la tabla 4.6 se crea el vector $[I_{ASD}^h]$ de corrientes para cada armónico:

$$[I_{ASD}^h] = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \underline{I}_7^h \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{13 \times 1} \quad (4.3)$$

- Cálculo de las tensiones armónicas del sistema

Mediante los valores de la matriz de admitancias armónicas $[Y^h]$ y el vector de corrientes armónicas $[I_{ASD}^h]$, se determinan en Matpower las tensiones armónicas

$[V^h]$ para cada barra (tabla 4.7). En el apéndice I, se muestra un reporte de resultados en Matpower.

Tabla 4.7. Resultados obtenidos de tensiones armónicas.

Barra #	V^1 (V_{LN})	V^5 (V_{LN})	V^7 (V_{LN})	THD_V (%)
1	39.837,17	42,60	103,72	0,28
2	7.927,60	55,00	133,91	1,84
3	276,12	1,90	4,61	1,82
4	39.790,18	55,35	134,75	0,37
5	7.923,69	56,89	138,50	1,90
6	7.921,41	57,44	138,62	1,90
7	277,66	12,62	11,69	7,46
8	2.404,60	17,06	40,32	1,82
9	7.921,77	56,87	138,45	1,90
10	272,64	1,94	4,66	1,86
11	7.918,69	56,84	138,35	1,90
12	271,45	1,94	4,72	1,89
13	1.393,67	9,83	23,51	1,84

En la figura 4.3 se comparan los resultados obtenidos a través de la metodología NIHA implementada en Matpower, con los mostrados en la referencia [7] para cada barra.

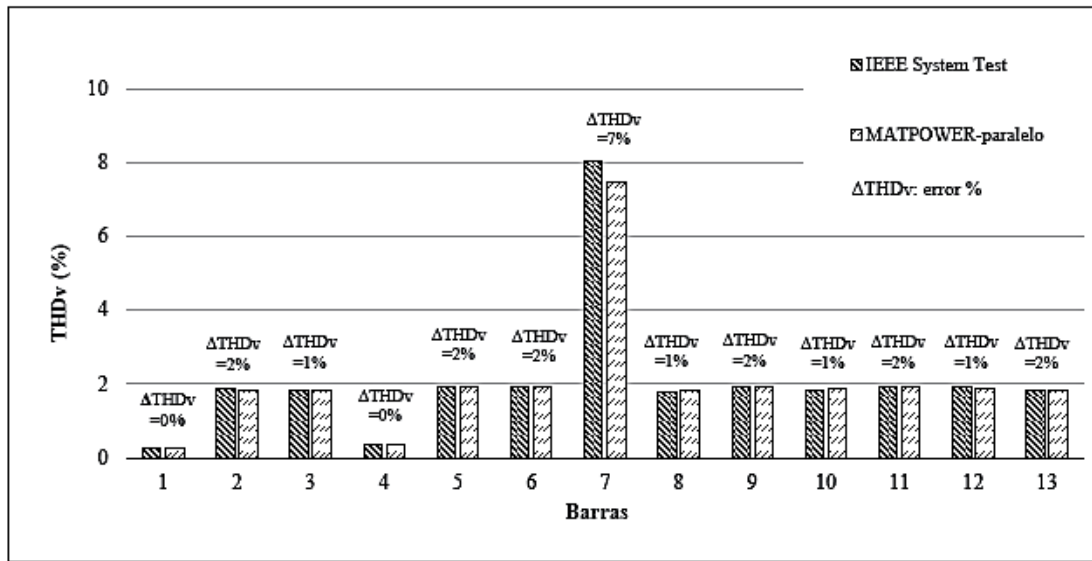


Figura 4.3. Comparación de la distorsión armónica, resultados experimentales vs resultados de la referencia [7].

Los errores porcentuales en la distorsión armónica ΔTHD_v que se aprecian en la figura 4.3, se originan principalmente por diferencias en los valores obtenidos del CPF, lo cual es habitual, ya que siempre existirán ligeras diferencias entre los valores de flujo de potencia convencional al utilizar un programa u otro.

La aplicación de una metodología iterativa como la que se plantea a continuación en este trabajo de grado, en la cual se considera la interacción entre las tensiones y las corrientes armónicas inyectadas, podría reducir la estimación inicial asociada al planteamiento de la NIHA, ya que según la referencia [9] la metodología no iterativa lleva a la sobreestimación de las tensiones y corrientes armónicas. El estudio del NIHA resulta una opción útil, cuando se desea un cálculo rápido de distorsión armónica.

CAPÍTULO V

CASO DE ESTUDIO DE PENETRACIÓN ARMÓNICA ITERATIVA EN MATPOWER USANDO LA FUNCIÓN “*runpfH2.m*”

El estudio de penetración armónica iterativa en Matpower requiere de la implementación de nuevas funciones. Para ello, se realiza la implementación de la función *runpfH2.m*, con ciertas rutinas en el código fuente similares a la función *runpfH.m* del caso no iterativo. Adicionalmente, se implementa la función *Currents_Phase_CFL.m*, considerando el modelo del dispositivo no lineal (CFL) como una fuente de corriente tipo Norton, para el cálculo de las corrientes $[I_{bus=n_l}^h]$ y admitancias propias armónicas $[Y_{n_l, n_l}^h]$.

5.1 Descripción de la función *runpfH2.m*

Esta función permite realizar la penetración armónica (HP) bajo el método iterativo (IHA) e imprime los resultados en pantalla. El programa es ejecutado escribiendo el comando:

» *runpfH2(nombre del archivo)*

La función recibe como parámetros de entrada los datos del caso de estudio de estructura “*mpc*” (ver apéndice II). Calcula inicialmente el flujo de potencia convencional para obtener la tensión fundamental en las barras de carga no lineal y hace un llamado de la función *Currents_Phase_CFL.m* para el cálculo de las corrientes y admitancias propias armónicas de la carga no lineal (CFL).

A través de un proceso iterativo y haciendo un llamado de la función *MakeYbusH*, calcula la matriz de tensiones de barra, presentando en pantalla los resultados de las tensiones armónicas, así como las gráficas de la corriente y tensión armónica en las barras de carga no lineal. En resumen, su implementación se puede dividir en dos etapas: lectura-adequación de datos y procesamiento e impresión en pantalla de los resultados.

De forma similar a la función *runpfH*, la lectura y adecuación de datos le permite a la función *runpfH2*, ordenar de forma sencilla todos los datos de las barras, ramas y generadores, utilizando funciones propias de Matpower, como por ejemplo, “*loadcase*” y “*ext2int*”, las cuales permiten que un caso de estudio sea cargado y se eliminen de forma momentánea todos los componentes aislados.

Por último, durante el procesamiento del IHA, la función establece un resumen del sistema e imprime los resultados en pantalla mediante un arreglo basado en el comando *fprintf* de Matlab. El código correspondiente a esta función (*runpfH2*) se muestra en el apéndice III.

5.2 Descripción de la función *Currents_Phasor_CFL.m*

Esta función permite determinar las corrientes y admitancias propias armónicas de las CFLs, modeladas como fuentes de corriente tipo Norton. Recibe como parámetros de entrada las tensiones en las barras de carga no lineal, la potencia aparente base del sistema, así como las tensiones bases y la cantidad de lámparas a modelar. Usando la función “*ficheroDatosCFL*”, se obtienen los parámetros característicos de la CFL (R_D, R, C), a partir de los datos de diferentes marcas comerciales de lámparas CFLs almacenados en un archivos tipo “.txt” y tomados de la referencia [13].

Luego, hace un llamado de *Funcion_PH*, función que calcula las variables de control, en este caso los ángulos de conmutación de la CFL. Una vez que se tienen las variables de control, mediante las funciones: *FunMatrixYA4*, *FunMatrixYA3*, *FunMatrixYA2*, o *FunMatrixYA1* (modelo simplificado de las admitancias acopladas) y *FunMatrixYF* (modelo completo MF), se obtiene la admitancia propia de la fuente de Norton en función de la *THD* como se indica en la tabla 3.1. Finalmente, con la admitancia propia y la tensión armónica en la barra con carga no lineal, se obtiene la corriente armónica. El código de la función *Currents_Phasor_CFL* se muestra en el apéndice IV.

5.3 Descripción de la metodología de penetración armónica bajo el método iterativo

La metodología para resolver un caso de estudio de HP bajo IHA empleando Matpower, se muestra en el diagrama de la figura 5.1.

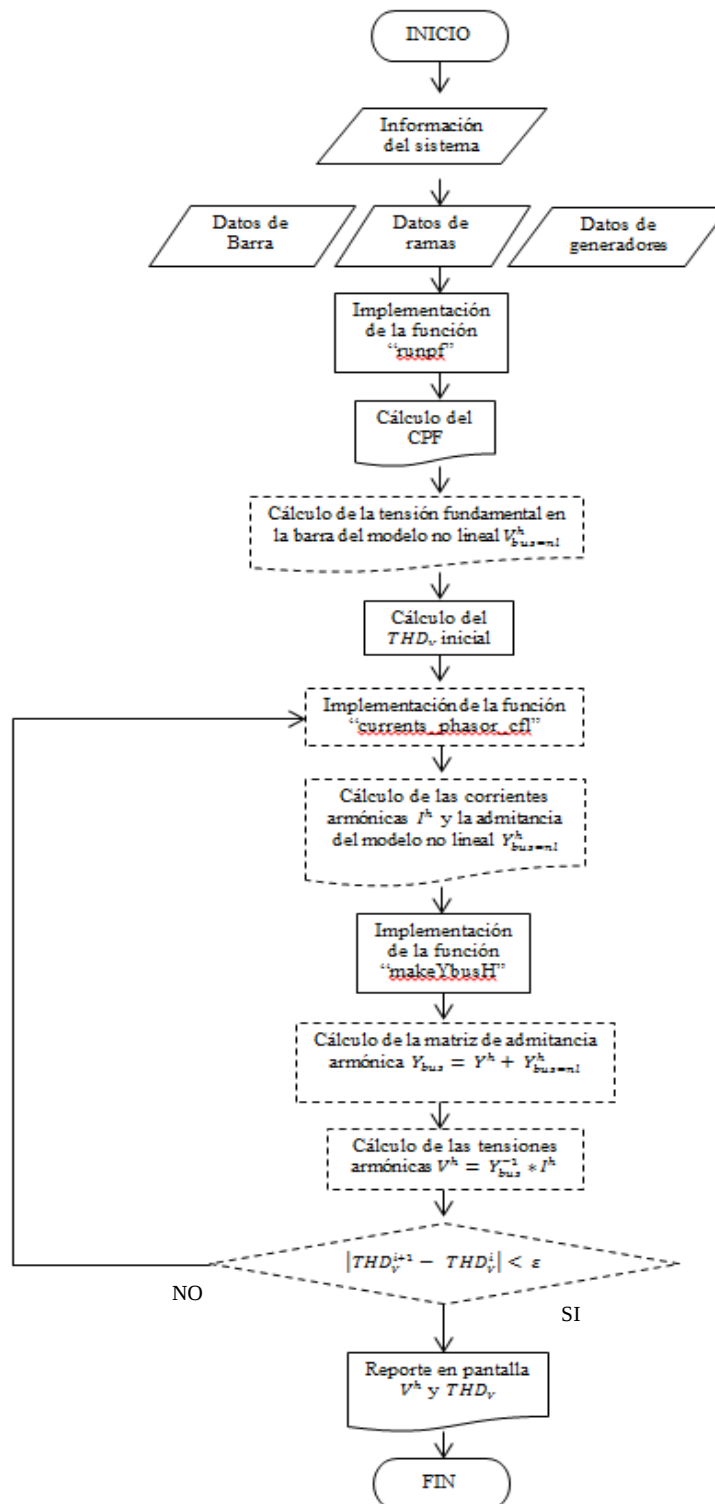


Figura 5.1. Diagrama de flujo en base a la metodología IHA, empleada para la obtención de HP en Matpower.

5.4 Caso de estudio de penetración armónica bajo la metodología iterativa en Matpower

Se analiza el sistema de trece barras del IEEE (figura 5.2), pero esta vez conectando al bus 7 una carga no lineal representada por las CFLs. Los datos que caracterizan el sistema son los mismos que se indican en el capítulo IV exceptuando la carga no lineal que varía para dos tipos de CFL.

En primer caso de estudio se conecta una carga de 16.5kW nominales que representa 1500 lámparas CFL marca Philips 11W 120-220V y en segundo caso se conecta una carga de 21kW nominales que representa 1500 lámparas CFL marca Philips 14W 120-220V. En ambos casos de estudio la carga es monofásica y se conectan en la barra 7. Se asume un factor de potencia inicial de 0.6 y sus parámetros del modelo se extraen de la referencia [13] (modelos L1P11W y L2P14W, respectivamente).

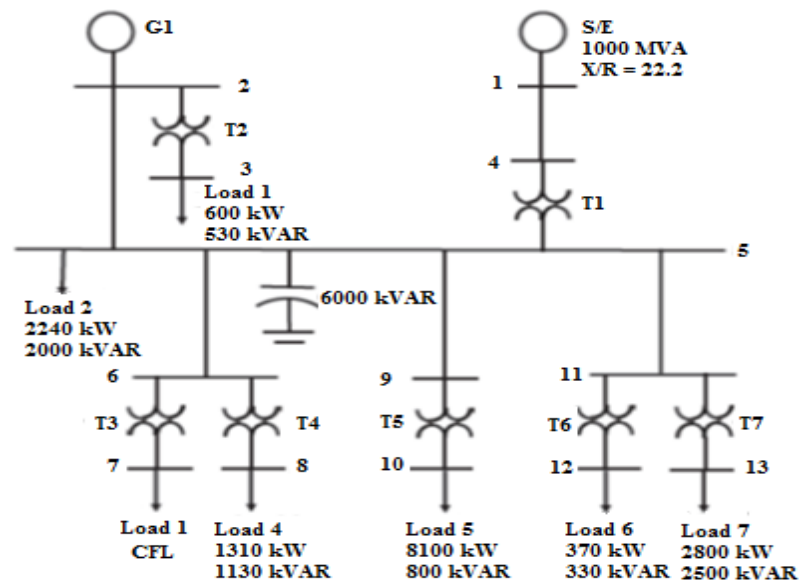


Figura 5.2. Sistema industrial de 13 barras del IEEE con carga no lineal CFL.

5.5 Resolución de la penetración armónica iterativa

Siguiendo el procedimiento indicado en la figura 5.1 se ejecuta el flujo de potencia convencional (CPF), para así obtener la tensión fundamental en la barra con carga no lineal (barra 7). El CPF se ejecuta en Matpower mediante el comando:

»» *runpf(caso13barras)*

Internamente la función *runpfH2* hace el cálculo del CPF y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 5.1:

Tabla 5.1. Resultados del CPF. Carga monofásica de 16.5kW CFL - L1P11W.

Barra #	Voltaje		Generación		Carga	
	Mag(p.u.)	Ang(°)	P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
1	1,000	0,000*	6,24	0,57	-	-
2	0,995	-1,994	2,00	1,47	-	-
3	0,996	-3,081	-	-	0,60	0,53
4	0,999	-0,101	-	-	-	-
5	0,995	-2,007	-	-	2,24	2,00
6	0,994	-2,006	-	-	-	-
7	1,017	-2,082	-	-	0,05	0,07
8	1,001	-4,212	-	-	1,31	1,13
9	0,994	-2,005	-	-	-	-
10	0,984	-3,492	-	-	0,81	0,80
11	0,994	-2,005	-	-	-	-
12	0,980	-2,005	-	-	0,37	0,33
13	1,006	-4,062	-	-	2,80	2,50
-	Total:		8,24	2,04	8,18	7,36

*: Denota la barra *Slack*.

Se calcula un THD_V inicial para usarlo como criterio de convergencia, estableciendo un margen de error menor al 0.005%. Luego, a través de la función

$Currents_Phasor_CFL$ se obtiene la corriente y admitancia propia en la barra 7, formando el vector inicial de corrientes armónicas:

$$[I_{CFL}^h] = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ I_7^h \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}_{13 \times 1} \quad (5.1)$$

Mediante la función se obtiene la matriz de tensiones de barra, se halla nuevamente el THD_V y se verifica el criterio de convergencia. En caso de no cumplir con dicho criterio de convergencia se realiza una nueva iteración del proceso, actualizando el vector de tensiones de barra y el vector de corrientes armónicas de las CFLs hasta alcanzar la convergencia. Finalmente se obtienen las tensiones armónicas, las gráficas de la corriente y tensión en la barra de carga no lineal.

Tabla 5.2. Tensiones armónicas. Carga monofásica de 16.5kW CFL - L1P11W.

Barra #	V^1 (V_{LN})	V^3 (V_{LN})	V^5 (V_{LN})	V^7 (V_{LN})	THD_V (%)
1	39.841,60	3,90	8,78	24,24	0,06
2	7.933,87	5,04	11,34	31,30	0,43
3	276,34	0,17	0,39	1,07	0,43
4	39.799,70	5,08	11,41	31,50	0,08
5	7.930,59	5,21	11,73	32,38	0,45
6	7.928,78	5,30	11,84	32,41	0,45
7	236,50	1,43	2,17	2,27	1,92
8	2.406,88	1,59	3,51	9,42	0,43
9	7.928,67	5,21	11,72	32,36	0,45
10	272,88	0,17	0,39	1,08	0,44
11	7.925,59	5,21	11,72	32,34	0,45
12	271,68	0,17	0,40	1,10	0,45
13	1.394,89	0,91	2,02	5,49	0,43

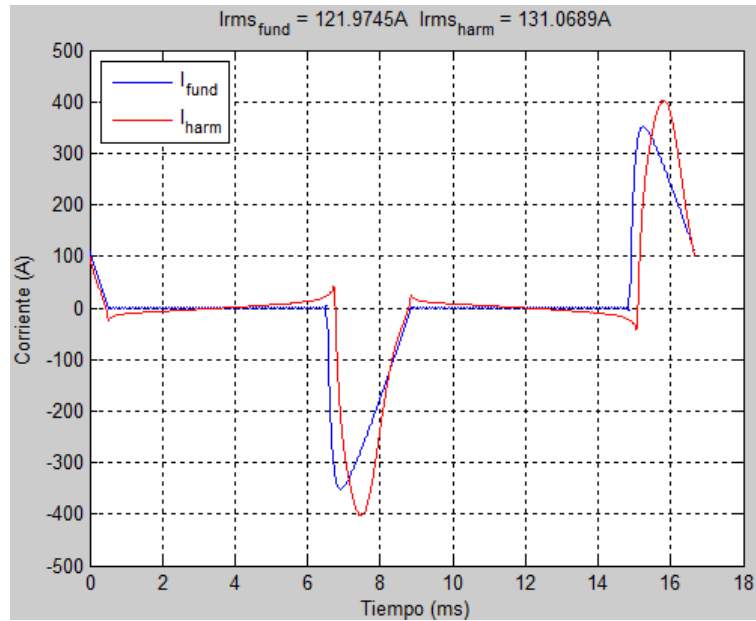


Figura 5.3. Corriente en la barra de carga no lineal CFL - L1P11W.

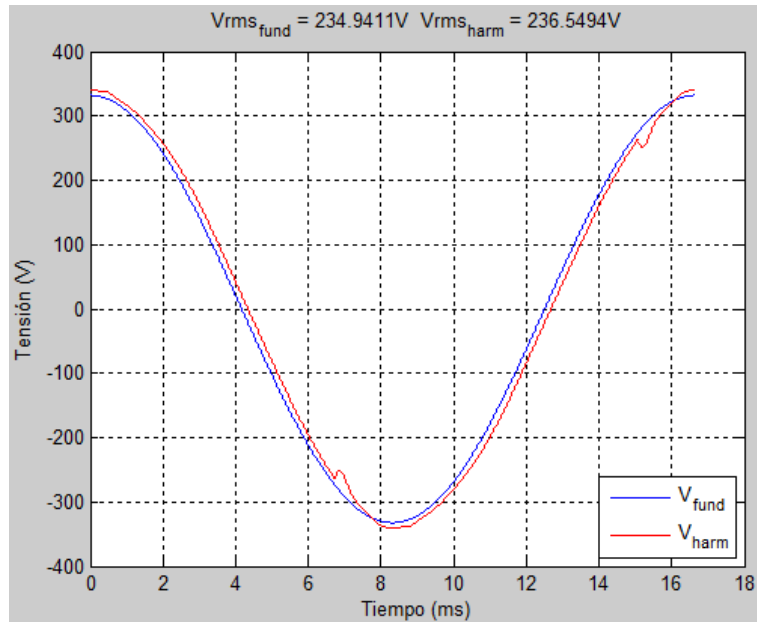


Figura 5.4. Tensión en la barra de carga no lineal CFL - L1P11W.

Para el segundo caso de estudio, los resultados obtenidos se muestran en las tablas 5.3 a 5.4 y figuras 5.5 a 5.6. En el apéndice V se muestra un reporte de los resultados en Matpower para ambos casos.

Tabla 5.3. Resultados del CPF. Carga monofásica de 21kW CFL - L2P14W.

Barra #	Voltaje		Generación		Carga	
	Mag(p.u.)	Ang(°)	P(MW)	Q(MVAR)	P(MW)	Q(MVAR)
1	1,000	0,000*	6,26	0,57	-	-
2	0,995	-1,998	2,00	1,49	-	-
3	0,996	-3,085	-	-	0,60	0,53
4	0,999	-0,102	-	-	-	-
5	0,995	-2,011	-	-	2,24	2,00
6	0,994	-2,011	-	-	-	-
7	1,017	-2,107	-	-	0,06	0,08
8	1,001	-4,216	-	-	1,31	1,13
9	0,994	-2,010	-	-	-	-
10	0,984	-3,496	-	-	0,81	0,80
11	0,994	-2,009	-	-	-	-
12	0,980	-2,690	-	-	0,37	0,33
13	1,006	-4,072	-	-	2,80	2,50
-	Total:		8,26	2,05	8,19	7,37

*: Denota la barra *Slack*.

Tabla 5.4. Tensiones armónicas. Carga monofásica de 21kW CFL - L2P14W.

Barra #	V^1 (V_{LN})	V^3 (V_{LN})	V^5 (V_{LN})	V^7 (V_{LN})	THD_V (%)
1	39.841,40	5,04	10,88	26,60	0,07
2	7.933,52	6,51	14,05	34,35	0,48
3	276,33	0,22	0,48	1,18	0,47
4	39.799,20	6,55	14,14	34,56	0,09
5	7.930,19	6,73	14,53	35,52	0,49
6	7.928,35	6,84	14,67	35,55	0,50
7	236,22	1,85	2,68	2,49	2,08
8	2.406,75	2,06	4,35	10,34	0,48
9	7.928,27	6,73	14,53	35,51	0,49
10	272,86	0,23	0,49	1,19	0,48
11	7.925,18	6,73	14,52	35,49	0,49
12	271,66	0,23	0,49	1,21	0,49
13	1.394,82	1,17	2,51	6,03	0,48

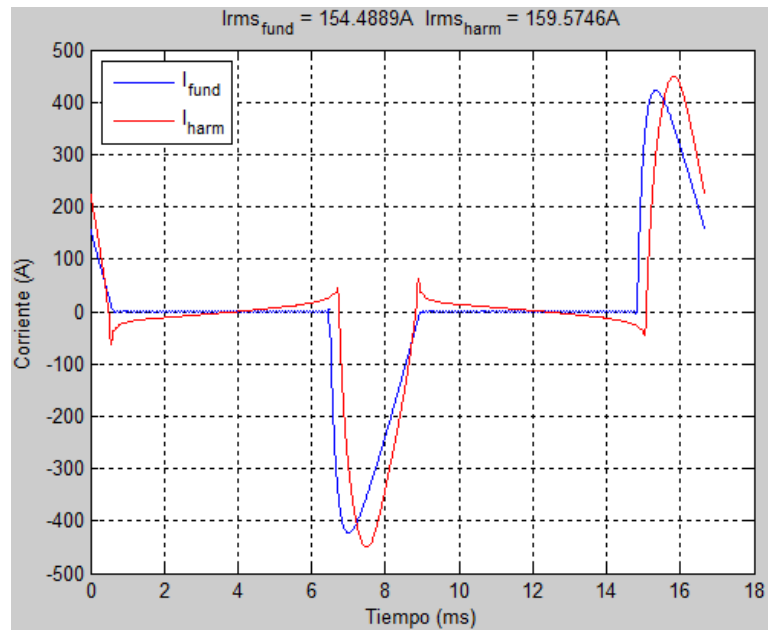


Figura 5.5. Corriente en la barra de carga no lineal CFL – L2P14W.

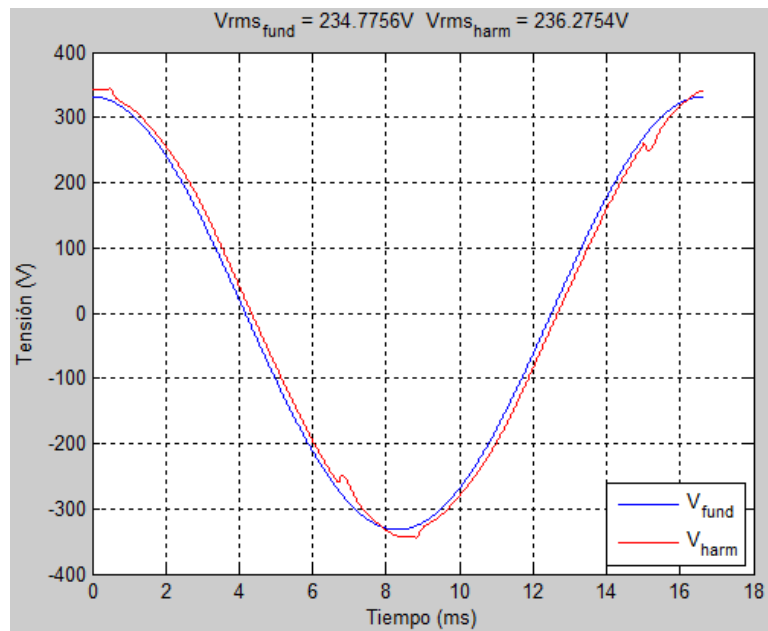


Figura 5.6. Tensión en la barra de carga no lineal CFL – L2P14W.

Las figuras 5.3 y 5.5 ambas representan las corrientes en las CFLs. La curva azul representa la corriente bajo la metodología no iterativa, mientras que la curva

roja representa la corriente bajo la metodología iterativa. La diferencia entre ambas curvas es producto del efecto armónico de las tensiones sobre las lámparas. Además, se está trabajando con un modelo aproximado para representar las CFLs, el cual se basa en fuentes de corriente tipo Norton. El cálculo de la admitancia propia del modelo se hace mediante el método simplificado (apartado 3.2), despreciando así diferentes elementos que inciden en la matriz de admitancia y por ende, alteran directamente el valor de la corriente armónica recordando que $[I^h] = [Y^h][V^h]$.

Las gráficas 5.4 y 5.6 ambas representan la forma de onda de la tensión en la barra 7 de carga no lineal (CFL). La curva azul indica la forma de onda de la tensión a frecuencia fundamental, mientras que la roja representa la forma de onda de la tensión con sus frecuencias armónicas. Se aprecian leves picos que intentan deformar la onda producto de la carga armónica que generan las lámparas, sin embargo si apreciamos los valores de THD_V en las tablas 5.2 y 5.4 para la barra 7, están dentro del porcentaje permitido en IEEE std. 519-2014.

Otro aspecto importante a mencionar, es el bajo factor de potencia en las CFLs, producto de la pulsación (discontinuidad) en la onda de corriente, lo cual produce un aumento de la potencia aparente en comparación a la potencia activa. En la tabla 5.5 se muestran los resultados obtenidos.

Tabla 5.5. Factor de potencia, potencia aparente, activa y reactiva de las CFLs.

CFLs	Factor de Potencia	Potencia Aparente (kVA)	Potencia Activa (kW)	Potencia Reactiva (kVAr)
L1P11W	0,50	93,01	47,19	80,14
L2P14W	0,53	113,11	60,80	95,37

CAPÍTULO VI

VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA IHA

Para validar el modelo obtenido en el caso de penetración armónica iterativa mediante la implementación de la función *runpfH2* en Matpower, se plantea un circuito equivalente al sistema de 13 barras, a través del software de simulación PSpice.

Conocido originalmente como Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (Programa de simulación con énfasis en circuitos integrados) es un software de diseño y simulación de circuitos, desarrollado en la Universidad de California, Berkeley en 1973 por Donald O. Pederson y Laurence W. Nagel. Se encuentra disponible en diferentes versiones para ordenadores personales denominadas PSpice (por sus siglas en inglés). El objetivo del programa es simular ya sea en el dominio del tiempo, frecuencia o de forma paramétrica, circuitos electrónicos compuestos por resistencias, condensadores, diodos y transistores.

El procedimiento para realizar la simulación en PSpice consiste en: primero, la creación del fichero fuente que contiene las características de los elementos que forman parte del circuito, luego la generación del fichero de salida que se logra al momento de cargar el fichero en el software y correr el programa, y por último la presentación de los resultados que puede ser a través de gráficos o tablas.

El circuito equivalente simulado en PSpice (figura 6.1) fue planteado en base a la referencia [14] y tomando en cuenta los criterios sugeridos por el tutor académico.

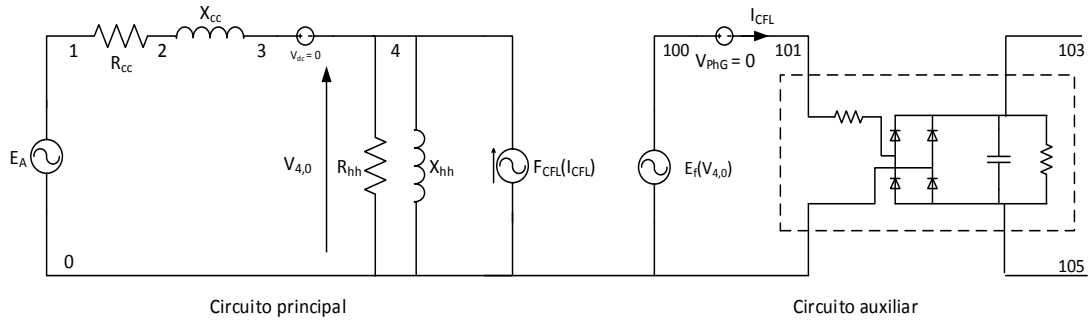


Figura 6.1. Circuito modelado en PSpice – Carga no lineal CFLs.

El circuito principal está compuesto por una fuente E_A que representa la tensión equivalente de Thevenin en la barra donde está conectada la carga no lineal. La resistencia equivalente de Thevenin corresponden con la impedancia de cortocircuito R_{cc} , reactancia X_{cc} y se obtienen a partir de la admitancia propia de la barra 7 ($Y_{77}^{-1} = Z_{77} = R_{77} + iX_{77}$). Las impedancias R_{hh} y X_{hh} representan a la admitancia del modelo de fuente Norton y por último la fuente de corriente armónica F_{CFL} dependiente de la corriente del circuito auxiliar I_{CFL} , representa la contribución de las N lámparas.

El circuito auxiliar representa el modelo de una CFL (figura 3.1a) y se compone de un puente de diodo con resistencia equivalente en corriente alterna R y un condensador electrolítico C de nivelación continua que alimenta al inversor de tubo. El inversor y el tubo pueden ser modelados como una resistencia equivalente R_d , ya que el inversor normalmente funciona de 10 a 40 kHz y se comporta como una carga constante para la barra colectora de corriente continua. En PSpice, el modelo de la CFL se especifica mediante un subcircuito y se utiliza una librería (CFL.lib) que contiene diferentes modelos de lámparas con los valores de sus parámetros característicos. La tensión distorsionada es modelada con la fuente de tensión dependiente E_f .

Todos los elementos del circuito principal se especifican en el fichero fuente (figura 6.2) y son especificados de acuerdo a la numeración de los nodos. Es importante resaltar que los indicadores con la extensión .TRAN, especifican los tiempos de: muestreo, tiempo final de simulación, tiempo inicial de simulación y el paso de integración, en ese orden respectivamente. Para el caso de estudio se obtuvieron las gráficas a partir del régimen permanente y los tiempos de simulación fueron escogidos en base a la mejor forma de onda que se podía obtener.

```

****      CIRCUIT DESCRIPTION

*****

*
.LIB PQ.LIB
.LIB CFL.LIB

.TRAN      0.002m 520m      500m 0.02m SKIPBP
.OPTIONS ABSTOL=0.001A CHGTOL=0.001C ITL5=0 RELTOL=0.001 VNTOL=0.05
.PARAM    FREQ=60 TPER={1/FREQ} WS={2*PI*FREQ}
*
.PARAM    UEFA={400/SQRT(3)} FASE_A={PI/2}
.PARAM    Vb={400} Sb={10e6} Zb={Vb*Vb/Sb} PL={14} num={1500}
.PARAM    Rspu={0.059457} Xspu={0.35558}
.PARAM    Rs={Rspu*Zb} Xs={Xspu*Zb} Ls={Xs/ws}

*
* Circuito principal
EA      1      0      VALUE      {SQRT(2)*UEFA*SIN(WS*TIME+FASE_A)}
RCC      1      2      {Rs}
LCC      2      3      {Ls}
Vdc      3      4      DC      0
*Rhh      4      0      {Rcarga}
*Lhh      4      0      {Lpcarga}
Fcfl      4      0      VPhG      1500

*circuito amplificador
Ef      100      0      4      0      1
* modelo PhilipsEcotone14w
VPhG      100      101      DC      0
XPhG      101      0      103      105      PhilipsEcotone14w PARAMS:VOLTXCN=320.661

|
*.STEP PARAM xcc 0.0005 10 2
* Fourier de las corrientes (para diagramas de contorno). Las dos ultimas dan
* el valor eficaz (1/sqrt(2)) de las intensidades normalizadas que consumen los
* rectificadores. A la fase hay que restarle pi/2.
* Fourier de las tensiones para comprobar caídas de tension ok (mirando componente fund.)
.FOUR 60 15 I(Vdc)
.PROBE
.PRINT TRAN V(1,0) V(4,0) I(Vdc)
.PROBE I(Vdc)
*.PROBE I(LCCB) I(LtB) I(LmB)
*.PROBE I(Vsh)
.END

```

Figura 6.2. Fichero fuente que describe el circuito en PSpice.

Los ficheros de salida que se obtuvieron de la simulación en PSpice para presentar los gráficos finales, son integrados a la rutina de la función *runpfH2* de Matpower, mediante el comando *importdata* de Matlab. El código correspondiente se encuentra inmerso en la rutina de la función *runpfH2* y se muestra en el apéndice III. Los ficheros de salida del PSpice se muestran en el apéndice VI.

La validación del modelo se realiza para el segundo caso de estudio presentado en el capítulo V. Caso de una carga de 21kW nominales que representa 1500 lámparas CFL marca Philips 14W 120-220V. Los gráficos finales se muestran a continuación:

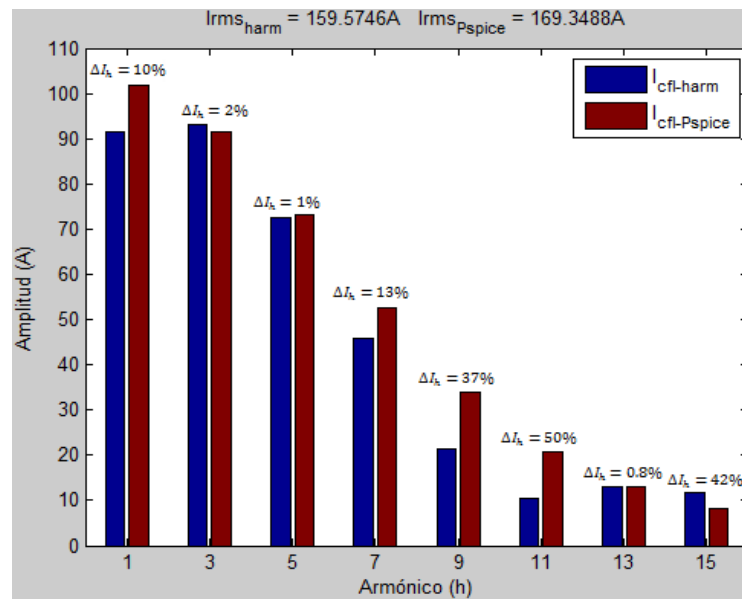


Figura 6.3. Comparación de la corriente armónica en la barra de carga no lineal, resultados con Matpower vs resultados con PSpice.

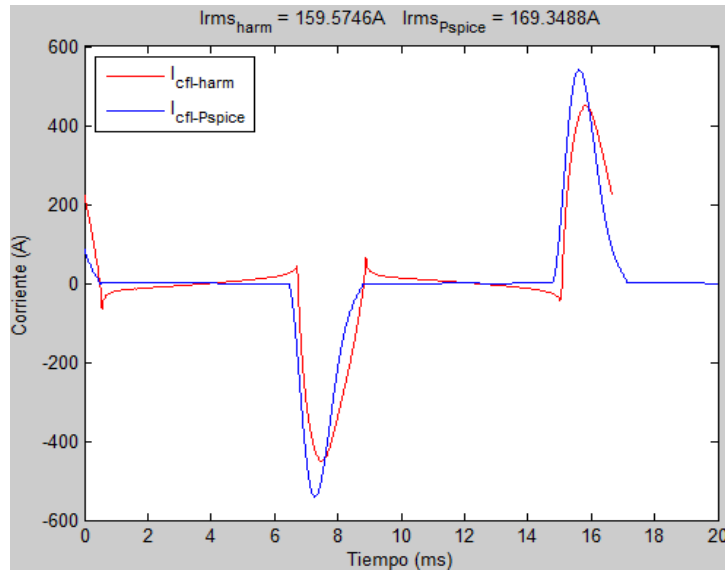


Figura 6.4. Comparación de la corriente en la carga no lineal, resultados con Matpower vs resultados con PSpice.

En la figura 6.3 se realiza una comparación entre las magnitudes de las corrientes armónicas en la barra de carga no lineal. Las barras de color azul representan las corrientes armónicas en el bus 7 mediante el cálculo realizado en Matpower con la nueva función implementada (*runpfH2*) y las barras de color rojo indican las corrientes armónicas en la CFL, calculadas a partir del circuito equivalente (figura 6.1) en PSpice.

Se observan porcentajes de error considerables para los armónicos $h = 9, 11$ y 15 , producto de la aproximación en el modelo de las CFLs que se simula en PSpice, ya que no es un modelo exacto de las lámparas sino que representa un circuito equivalente de la carga total. Una mayor exactitud entre las magnitudes obtenidas de las simulaciones, estaría dada al representar la carga en su totalidad. Esto resulta dificultoso, ya que consistiría en conectar 1500 circuitos equivalentes

simultáneamente para modelar así las 1500 lámparas CFL que fueron conectadas al bus 7 del sistema en estudio.

Las formas de onda de la corriente en la carga no lineal (figura 6.4), comprueban el grado de aproximación de ambos modelos, siendo la curva roja la forma de onda de corriente armónica obtenida con la función *runpfH2* de Matpower, mientras que la curva de color azul es la que se obtiene con la simulación en PSpice.

CONCLUSIONES

- Se logró implementar en Matpower la metodología iterativa tipo Jacobi para realizar estudios de penetración armónica en sistemas eléctricos de media y baja tensión.
- Se generó una nueva función para ser incorporada al Matpower, para realizar el análisis armónico iterativo (IHA).
- El proceso de validación no es del todo satisfactorio debido a la implementación de los modelos de cargas de CFLs en el programa temporal PSpice. Estos modelos de grandes cargas en PSpice son equivalentes y aún no se tiene una total certeza de su correcta respuesta.
- La metodología de penetración armónica no iterativa resulta útil cuando se desean estudiar sistemas que contienen cargas no lineales con espectros armónicos típicos y que no disponen de una función programable en Matpower, la cual nos permita conocer las corrientes y admitancias propias armónicas del modelo de fuente de Norton (modelo que representa la carga no lineal en Matpower). En este sentido, cuando las cargas no lineales disponen de funciones programables que permitan obtener los parámetros del modelo (corrientes y admitancias armónicas), es apropiado el uso de una metodología de penetración armónica iterativa.

RECOMENDACIONES

Para futuros trabajos y estudios en relación a esta investigación se propone:

- Implementar en la rutina de la función *runpfH2* de Matpower, la técnica de eliminación Gaussiana o método de Kron para reducir el sistema únicamente a las barras donde se encuentran conectados los dispositivos no lineales. Esto hará posible estudiar sistemas eléctricos de mayores dimensiones, evitando así problemas de velocidad de convergencia y grandes demandas de memoria computacional.
- Ampliar el estudio de penetración armónica iterativa usando otros métodos numérico tipo Newton-Raphson y su posterior implementación en Matpower.
- Validar el presente trabajo con diferentes redes de pruebas del IEEE, previamente mejorando el performance del modelo en otros softwares en el dominio del tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. D. Zimmerman, C. E. Murillo-Sánchez, y R. J. Thomas, “*MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education*”, *Power Syst. IEEE Trans. On*, vol. 26, n.º 1, pp. 12-19, feb. 2011.
- [2] N. R. Watson, T. L. Scott, y S. Hirsch, “*Implications for Distribution Networks of High Penetration of Compact Fluorescent Lamps*”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 24, n.º 3, pp. 1521 -1528, jul. 2009.
- [3] Z. Wei, N. R. Watson, y L. P. Frater, “*Modelling of compact fluorescent lamps*”, en *13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2008. ICHQP 2008*, 2008, pp. 1 -6.
- [4] J. Molina y L. Sainz, “*Compact Fluorescent Lamp Modeling for Large-Scale Harmonic Penetration Studies*”, *Power Deliv. IEEE Trans. On*, vol. PP, n.º 99, pp. 1-1, 2014.
- [5] J. Molina y L. Sainz, “*Model of Electronic Ballast Compact Fluorescent Lamps*”, *Power Deliv. IEEE Trans. On*, vol. 29, n.º 3, pp. 1363-1371, jun. 2014.
- [6] F. Suárez, “*Evaluación del programa de código abierto MATPOWER para estudios de flujo de potencia con armónicos*”, Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela, 2015.
- [7] R. Burch, G. Chang, M. Grady, E. Gunther, M. Halpin, Y. Liu, M. Marz, T. Ortmeier, V. Rajagopalan, S. Ranade, P. Ribeiro, T. Sim, y W. Xu, “*Test systems for harmonics modeling and simulation*”, *Power Deliv. IEEE Trans. On*, vol. 14, n.º 2, pp. 579-587, abr. 1999.

- [8] R. Zimmerman y C. Murillo-Sánchez, “*MATPOWER 5.1 User’s Manual*”. 2015, disponible en <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/> y obtenido en febrero 2017.
- [9] S. H. Jaramillo, “*Aportaciones al estudio del flujo armónico de cargas*”, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España, 2002.
- [10] IEEE Standard 519-2014. *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. New York, USA: IEEE, 2014.
- [11] Sopera Luis S., *Estudio de la formulación y resolución del problema del flujo armónico de cargas* (tesis doctoral), Barcelona, España, Universidad Politécnica de Cataluña, p. 41.
- [12] J. Cunill-Solá and M. Salichs, “*Study and characterization of waveforms from low-watt (<25 W) compact fluorescent lamps with electronic ballasts*”, *Power Deliv. IEEE Trans. On*, vol. 22, n.º 4, pp. 2305-2311, Oct. 2007.
- [13] J. Molina, J. Mesas and L. Sainz, “*Parameter estimation procedure for the equivalent circuit model of compact fluorescent lamps*”, *Electric Power Systems Research*, Elsevier, pp. 128-135, Marzo 2014.
- [14] J. Molina and L. Sainz, “*PSpice model of discharge lamps with saturated magnetic ballast and non-square arc voltage*”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, Elsevier, pp. 210-220, Julio 2014.

BIBLIOGRAFÍAS

- 1.- A. Bonner, T. Grebe, E. Gunther, L. Hopkins, M. Marz, J. Mahseredjian, N. Miller, T. Omneyer, y V. Rajagopalan, “Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. I. Concepts, models, and simulation techniques”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 11, no. 1, pp. 452-465, 1996.
- 2.- H. Ahmadi y J. R. Marti, “Power flow formulation based on a mixed-linear and nonlinear system of equations”, *Environ. Electr. Eng. IEEEIC 2013 13th Int. Conf. On*, pp. 27-32, nov. 2013.
- 3.- IEEE Standard 399-1997. *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis*. New York: IEEE, 1997.
- 4.- M. Culebro, W. Gómez, y S. Torres, “*Software Libre vs Software Propietario. Ventajas y desventajas*”, Creative Commons, 2006.
- 5.- M. F. Akorede y H. Hizam, “Teaching power system analysis courses using MATPOWER”, *Eng. Educ. ICEED 2009 Int. Conf. On*, pp. 45-51, dic. 2009.
- 6.- “Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. I. Concepts, models, and simulation techniques”, *Power Deliv. IEEE Trans. On*, vol. 11, n.º 1, pp. 452-465, ene. 1996.
- 7.- “Modeling and simulation of the propagation of harmonics in electric power networks. II. Sample systems and examples”, *Power Deliv. IEEE Trans. On*, vol. 11, n.º 1, pp. 466-474, ene. 1996.

- 8.- R. Stallman, “*Software libre para una sociedad libre*”, 2015, disponible en https://www.gnu.org/philosophy/fsfs/free_software.es.pdf y obtenido en enero 2017
- 9.- S. E. Delgado García, “Aplicación del estándar IEC-61970 al SEN y análisis de flujo de carga en software abierto”, Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela, 2013.
- 10.- “The open source definition”, *Open Source Initiative*, 2015. Disponible en: <http://opensource.org/>, y obtenido en febrero 2017.
- 11.- W. F. Tinney y C. E. Hart, “Power Flow Solution by Newton’s Method”, *Power Appar. Syst. IEEE Trans. On*, vol. PAS-86, n.º 11, pp. 1449-1460, nov. 1967.