



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería.

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado.

**"CÁLCULO DE FRECUENCIAS ARMÓNICAS
EN REDES DE DISTRIBUCIÓN POR EL MÉTODO
BARRIDO PROGRESIVO/ REGRESIVO".**

TESIS

Que para obtener el grado de

MAESTRO EN INGENIERÍA

CON OPCIÓN TERMINAL EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Presenta:

RICARDO LÓPEZ CASTILLO

Asesores de tesis:

M.C. Carlos Morán Ramírez

Dr. Eric Morales Aguilar

Puebla, Pue.

Noviembre 2016



OFICIO SIEP No. 2820/2015

ING. RICARDO LOPEZ CASTILLO
Maestría en Ingeniería, Opción terminal Sistemas
Eléctricos de Potencia
Presente.

El suscrito M.I. Edgar Iram Villagrán Arroyo, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **"CALCULO DE FRECUENCIAS ARMONICAS EN UNA RED DE DISTRIBUCION POR EL METODO BARRIDO PROGRESIVO/REGRESIVO"**, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Sistemas eléctricos de potencia. Asignándose como Asesor de Tesis al M.C. Carlos Moran Ramirez y Co-Asesor al Dr. Erik Morales Aguilar.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE
"Pensar bien, para vivir mejor"
Puebla, Puebla a 07 de septiembre de 2015



M.I. EDGAR IRAM VILLAGRÁN ARROYO
Director de la Facultad de Ingeniería

C.c.p. M.C. Carlos Moran Ramirez. Asesor tema de tesis.
C.c.p. Dr. Erik Morales Aguilar. Co-Asesor tema de tesis.
C.c.p. Archivo.

GJS/GCC/dsm.

✍



Asunto: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE
LA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
PRESENTE:

El suscrito: **M.C. Carlos Morán Ramírez**, asesor del Tema de Tesis denominado: **“CÁLCULO DE FRECUENCIAS ARMÓNICAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN POR EL MÉTODO BARRIDO PROGRESIVO/REGRESIVO ”**, presentado por el C. RICARDO LÓPEZ CASTILLO, pasante de la Maestría en Ingeniería, opción terminal Sistemas Eléctricos de Potencia, me permito informar a usted que **después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, la metodología, la redacción y la ortografía** de la Tesis, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Así mismo, solicito tenga a bien autorizar el Jurado para su Examen Profesional.

Lo hago de su conocimiento para los efectos legales a que haya lugar.

ATENTAMENTE

Puebla, Pue., 28 de Octubre de 2016


M.C. Carlos Morán Ramírez
ASESOR

C.c.p.- Exámenes Profesionales

Interesado

Archivo

CMR



Asunto: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

M. I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE
LA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
P R E S E N T E

El que suscribe, **Dr. ERIC MORALES AGUILAR**, Asesor del Tema de Tesis denominado: **“CÁLCULO DE FRECUENCIAS ARMÓNICAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN POR EL MÉTODO BARRIDO PROGRESIVO/ REGRESIVO”**, presentado por el **ING. RICARDO LÓPEZ CASTILLO**, pasante de la Maestría en Ingeniería, opción terminal Sistemas Eléctricos de Potencia y en atención al oficio SIEP No. 2820/2015, de fecha 05 de Septiembre de 2015, me permito informar a usted que **después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, la metodología, la redacción y la ortografía** de la Tesis, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Así mismo, solicito tenga a bien autorizar el Jurado para su Examen Profesional.

Lo hago de su conocimiento para los efectos legales que haya lugar.

ATENTAMENTE
Puebla, Pue., 28 de Octubre de 2016

Dr. ERIC MORALES AGUILAR
ASESOR

C.c.p. –Exámenes Profesionales
Interesado
Archivo
EMA*rlc



Carta de Cesión de Derechos



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS DE POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la ciudad de Puebla, Puebla; el día 28 de Noviembre del año 2016, el que suscribe **Ing. Ricardo López Castillo** alumno de la **Maestría en Ingeniería con opción terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia**, con matrícula **213470415**, adscrito a la **Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado** y a la **Faculta de Ingeniería BUAP**, manifiesta que es el autor intelectual del presente trabajo de Tesis, bajo la dirección del **M.C. Carlos Morán Ramírez** y el **Dr. Erik Morales Aguilar**, y cede los derechos del trabajo titulado: **"CÁLCULO DE FRECUENCIAS ARMÓNICAS EN UNA RED DE DISTRIBUCIÓN POR EL MÉTODO BARRIDO PROGRESIVO/REGRESIVO."**, a la **Benemérita Universidad Autónoma de Puebla**, para su difusión con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos de trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo, este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **rilop6@hotmail.com** y/o **cmoran_ramirez@hotmail.com**, **eric_m_a_170583@hotmail.com**. Si el permiso se otorga, el usuario debe dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

ATENTAMENTE


Ing. Ricardo López Castillo



Agradezco a Dios, por la oportunidad de llegar a este momento de la vida lleno de plenitud y gracias a él puedo cumplir un sueño más, a mis papas porque siempre me apoyan en todas mis decisiones y metas sin duda me siento muy orgulloso de ellos, la sabiduría y experiencias de la vida que ellos me brindan hacen que las cosas sean más sencillas de lograr, a mi hermana por su cariño y comprensión en todo momento, su manera de ver la vida me ha enseñado a valorar cada momento.



Quiero agradecer al Dr. Eric Morales Aguilar por su valioso apoyo en esta tesis, su dedicación y conocimiento sin duda son el estandarte para concluir mi trabajo, más que un maestro es un amigo, gracias Eric.

Al M.C. Carlos Moran Ramírez, por ser parte importante en mi formación como ingeniero, sus conocimientos fueron sin duda un valioso tesoro que no tendría como pagarle, mi admiración y respeto por ser uno de los fundadores de la Maestría, ya que sin el esto no hubiera sucedido.

Quiero hacer un agradecimiento especial a:

Al Ing. José Luis Carbajal por impulsarme y apoyarme en todo momento para realizar la maestría, más que un jefe lo considero un amigo.

A mi amigo Emilio Luna por su valioso apoyo en la maestría y en lo profesional, por su capacidad de liderazgo, humildad, respeto y conocimiento, fueron para mí un ejemplo a seguir, siempre le estaré agradecido.

A mis amigos Isabel, Antonio, Gastón y Eleazar por sus aportaciones y apoyo en cada materia sin duda un buen equipo de trabajo.

A Juan Carlos y Oscar mis amigos de formación desde la licenciatura hasta la maestría y ahora en lo profesional.

Quiero agradecer a cada uno de mis compañeros de la maestría, ellos me aportaron conocimientos, experiencias pero sobre todo fue un grupo que siempre demostró unión y amenizaban cada clase, lo que hacía más interesante el día.

Agradezco a todos mis docentes de la maestría que siempre dieron su máximo esfuerzo y conocimiento para transmitir:

M.C. Guillermo Flores Martínez, Dr. Ricardo Octavio Mota Palomino, Dr. Juan Carlos Escamilla Sánchez, Dr. Horacio Tovar Hernández, Dr. David Sebastián Baltazar, Dr. Eric Morales Aguilar, Dr. Fermín Espino Cortés, M.C. Christian Pérez Negrón, M.C. Miguel Jiménez Guzmán, Dr. Guillermo Pérez Luna Y M.C. Carlos Moran Ramírez.



Índice General

Capítulo 1 introducción	12
1.2 Generalidades	12
1.3 Objetivo de la tesis	14
1.4 Justificación	14
1.5 Descripción del problema	15
1.6 Estructura de la tesis	15
Capítulo 2 Origen y Efecto de los Armónicos	17
2.1 Introducción	17
2.2 Definición de armónicos.....	17
2.3 Fuentes de distorsión armónica	20
2.3.1 Transformadores	20
2.3.2 Motores y Generadores	23
2.3.3 Dispositivos de arco	23
2.3.4 Alumbrado fluorescente	25
2.3.5 Controladores de arranque.....	27
2.3.6 Compensador estático de VARS	27
2.4 Efectos de los armónicos en los sistemas eléctricos.....	29
2.4.1 Impacto en la vida de los equipos	30
2.4.2 Condiciones de resonancia.....	30
2.4.3 Efectos en los transformadores	35
2.4.4 Efectos en los motores.....	38
2.5 Normatividad para el Control de Armónicos	39
2.5.1 Norma IEEE std. 519-1992.....	39
2.5.2 Límites de distorsión de corriente	40
2.5.3. Límites de distorsión de voltaje	43
Capítulo 3 Técnicas de Mitigación de Armónicos.....	45
3.1 Definición de filtros	45
3.2 Características de un filtro	46
3.3 Tipo de filtros	47
3.3.1 Tipo de filtros pasivos.....	47



3.3.2 Filtro sintonizado.....	49
3.3.3. Filtro activo tipo paralelo o de corriente.....	50
3.3.4 Filtros activos híbridos.....	50
Capítulo 4 Metodología Barrido Progresivo- Regresivo Armónico.....	52
4.1 Barrido progresivo.....	54
4.2 Barrido regresivo.....	55
Capítulo 5 Aplicación del método de Barrido Progresivo-regresivo Armónico.....	60
5.1 Aplicación a red de 8 nodos	60
5.1.1. Cálculo de corrientes.....	61
5.2 Aplicación a red de 34 nodos	64
Conclusiones	73
Trabajos Futuros.....	73
Trabajos Publicados.....	73
Referencias.....	74
Anexo A	75
Anexo B	79



Índice de Figuras

Pág.

Fig. 1 Forma de onda fundamental y armónicos 5 ^a , 7 ^a , 11 ^a .	18
Fig. 2 Componentes de la señal de la Fig. 1	19
Fig. 3 Vista tridimensional de la señal de la fig.2.	20
Fig. 4 Corriente de excitación en el devanado primario de un transformador.	21
Fig. 5 Distorsión armónica en la corriente de excitación.	21
Fig. 6 Curva de saturación de un transformador.	22
Fig. 7 Orden de la armónica en etapa de fundición.	24
Fig. 8 Orden de la armónica en etapa de refinación.	25
Fig. 9. Armónicas de una lámpara fluorescente.	26
Fig. 10. Arrancador a voltaje reducido.	27
Fig. 11 Orden de las armónicas en un SVC .	28
Fig. 12 Diagrama unifilar de una planta industrial con cargas no lineales y lineales.	31
Fig. 13 Evaluación de la 5 ^a armónica en función de la carga no lineal instalada.	32
Fig. 14 Corriente en capacitor instalado en sistema con cargas no lineales.	33
Fig. 15 Diagrama unifilar de una planta industrial con cargas lineales y no lineales a la que se agregan capacitores.	34
Fig.16 a) Impedancia del sistema sin capacitores b) Resonancia paralela para diferentes potencias de capacitores	34
Fig.17 Reducción en la capacidad de transformadores con relación a la carga no lineal que alimenta.	36
Fig. 18 (a) Filtro en derivación; (b) Filtro de bloqueo o serie.	46
Fig. 19 Diagrama eléctrico de filtros pasivos.	47
Fig. 20 Filtros pasivos en paralelo con la red.	48
Fig. 21 Esquema de filtro activo de corriente.	50
Fig.22 Filtro activo paralelo-filtro pasivo paralelo.	51
Fig. 23 Filtro activo serie-filtro paralelo.	51
Fig. 24 Filtro activo serie-filtro pasivo paralelo.	51
Fig. 25 Ejemplo de las capas de una red de 34 nodos.	52
Fig. 26 Distancias entre conductores y sus imágenes.	56
Fig. 27 Ejemplo de las capas de una red de 8 nodos.	60
Fig. 28 Línea de distribución 3F-4H.	61
Fig. 29 Red de 34 Nodos.	65
Fig. 30 Respuesta del sistema a frecuencia fundamental.	70
Fig. 31 Voltajes armónicos en nodos 800-820.	71
Fig. 32 Voltajes armónicos en nodos 822-858.	72



Índice de Tablas

Pág.

Tabla 1. Fallas recurrentes en transformadores.	35
Tabla 2. Limites de distorsión armónica en corriente IEEE 519.	41
Tabla 3. Limites de distorsión armónica en corriente CFE L0000-45.	42
Tabla 4. Limites de distorsión armónica en Voltaje IEEE 519.	43
Tabla 5. Limites de distorsión armónica en Voltaje CFE L0000-45.	44
Tabla 6. Cargas en frecuencia fundamental del sistema de 8 nodos.	62
Tabla 7. Longitudes de las lineas.	62
Tabla 8. Corriente Inyectada en % de la frecuencia fundamental.	63
Tabla 9. Resultados de la red de 8 nodos.	63
Tabla 10. Datos de las lineas de Distribución.	65
Tabla 11. Cargas en la red de 34 nodos.	67
Tabla 12. Corriente inyectada en % de la frecuencia fundamental.	68
Tabla 13. Resultados de los voltajes en frecuencia armónica.	70



CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se exponen las generalidades, objetivo, justificación, descripción del problema y la estructura de la tesis. Se muestra una breve reseña de la forma de dar solución al problema y hacia dónde va enfocado el trabajo y finalmente se describe la estructura de la tesis por capítulos.

1.2 Generalidades

La motivación por profundizar en la investigación del tema de tesis, es debido a que a nivel mundial se está registrando un creciente interés hacia la "calidad de la energía". Esto es debido a que en las instalaciones eléctricas de las industrias se tienen equipos instalados que generan distorsión armónica, y en la mayoría de los casos provoca que se tengan interrupciones, sags, swell o flicker dentro y fuera de la empresa (afectación a otras empresas).

En cuanto a la magnitud de voltaje se refiere en México se emplea el criterio de $\pm 10\%$ para decidir el nivel de voltaje [1]. Asimismo, se emplea el criterio de ± 0.5 Hz de variación de frecuencia [1], el cual para este fenómeno ofrece un margen de tolerancia, sin embargo, en relación a este problema se han tenido mejoras excepcionales gracias a los equipos de control que se tienen en las centrales generadoras los cuales se han sofisticado a tal grado que permiten un ajuste rápido de la frecuencia de generación aún en casos muy severos. Estos dos criterios han sido bastante útiles y hasta la fecha continúan empleándose, considerando, sin embargo, sólo estos dos límites no es posible garantizar el funcionamiento correcto y adecuado de los equipos electrónicos que se emplean actualmente como base de los procesos de producción.

Las alteraciones de la "calidad de la onda" son inevitables, tienen lugar en los propios procesos de generación, transmisión y distribución, así como por determinados tipos de



receptores, también se les asociaba a distintos problemas como son descargas atmosféricas, de regulación de voltaje, energización de capacitores, etc., lo cual también es correcto. Sin embargo, sólo en los últimos años regularmente se están convirtiendo en un motivo de preocupación por las siguientes dos causas [2]:

1.- Por un lado, los procesos industriales requieren, día con día, una mayor calidad de todos los productos utilizados y, en particular, de la electricidad, haciéndose más sensibles a las alteraciones que puedan existir. El equipo automatizado se encuentra actualmente en casi todas las instalaciones eléctricas industriales y comerciales, estos equipos son los de Controladores Lógicos Programables (PLC), controladores de velocidad de motores, equipos de rectificación, así como todos los equipos que en sus funciones involucren el empleo de microprocesadores como cerebro de todas las operaciones que realizan, son conocidas como equipos sensibles que han provocado una evolución en lo que se refiere al concepto de confiabilidad y requerimientos de alimentación.

2.- Por otro lado, el uso creciente de receptores que generan perturbaciones hace que el nivel de (distorsión de onda) de los sistemas eléctricos esté aumentando, perjudicando la operación normal de los demás receptores conectados a ellos y, en definitiva, extendiendo el problema de calidad de la onda, (Consciente de ello, se pretende la elaboración de este protocolo para dar a conocer esta situación más allá del grupo de especialistas de que estudia).

El aspecto técnico de la calidad y continuidad del servicio eléctrico está íntimamente relacionado con la operación y el mantenimiento de la red del suministro, tiene una relación directa con el nivel de inversión, todo ello a pesar de no existir un amplio reglamento, el entorno regulativo, está en evolución, puede cambiar y empeorar la calidad debido a los nuevos incentivos para la reducción de costos.

1.3 Objetivo de la Tesis

El objetivo de la tesis, es simular y evaluar redes de distribución, en la que se tenga distorsión armónica, con la finalidad de mitigar los efectos causados por este tipo efectos, el método convencional de análisis para armónicas usa el método de Newton-Raphson, la matriz de admitancias, o matriz de impedancias para calcular la penetración de los armónicos en los sistemas eléctricos de potencia. El método de barrido progresivo/regresivo considera las características especiales de la topología de la red de distribución (configuración radial y/o débilmente mallada), por lo que toma un menor tiempo para la obtención del cálculo de frecuencias armónicas en la red [3].

1.4 Justificación

En un contexto general, nos podemos referir a los filtros armónicos como pasivos y activos. Su diferencia esencial, radica sobre si ellos proveen una acción de filtración dentro de un ancho de banda seleccionado (pasivo) o como resultado de un proceso de monitoreo en tiempo real que guía la inyección de la cancelación de corrientes armónicas en tiempo real (activo). Uno de los métodos más comunes es la implementación de filtros para reducir la distorsión armónica es una buena práctica debido a que esto permite reducir los daños ocasionados a los aparatos y a la instalación. El efecto dañino es ocasionado por las condiciones armónicas a las que se encuentran sujetos los dispositivos ya que no fueron diseñados para operar bajo condiciones de forma de onda no senoidales; lo cual repercute en que el tiempo de vida estimada para los equipos se vea reducido, o pueda llegar a producirse un daño irreversible. La razón por la cual se deben utilizar filtros armónicos radica en mejorar los parámetros de alimentación de energía eléctrica, los cuales deben mantener la frecuencia y la tensión eléctrica constantes para un buen funcionamiento de los equipos instalados.

Previo a esta ejecución se debe realizar un análisis que determine el grado de distorsión armónica para determinar si es necesaria la implementación de filtros para disminuir hasta un porcentaje establecido por la norma nacional [4]. Razón por la cual se propone el uso de filtros armónicos los cuales están formados por capacitores y reactores conectados en serie. Los filtros armónicos pasivos pueden ser diseñados como elementos sintonizados que proveen un camino de baja impedancia a las corrientes



armónicas a una frecuencia puntual o como componentes pasa altas o pasa banda que pueden filtrar armónicas sobre un cierto rango de frecuencia.

Los más sofisticados conceptos de filtración activa operan en un rango amplio de frecuencias, ajustando su operación al espectro armónico resultante. Los filtros activos son diseñados para inyectar corrientes armónicas de igual magnitud, pero desfasados 180° para contrarrestar las componentes armónicas existentes. Los filtros activos comprenden configuraciones serie y paralelo de C.A. Los filtros híbridos son una combinación de esquemas de filtración pasiva y activa. La filtración activa es tan extensa y especializada, por lo que en esta tesis se consideran sólo los filtros pasivos.

1.5 Descripción del Problema

El estudio de frecuencias armónicas en sistemas eléctricos de distribución se ha convertido en una parte importante en el análisis y diseño de la red eléctrica nacional. Los principales objetivos que se pretenden alcanzar son, el cálculo del grado de distorsión en las formas de onda de voltaje y corriente en varios puntos del sistema de potencia, calcular los filtros necesarios para mejorar los voltajes y corrientes, ya que actualmente las empresas instalan equipos generadores de armónicas sin que sean reguladas, lo que provoca que se tenga contaminación de armónicos dentro y fuera de la instalación industrial.

1.6 Estructura de la Tesis

Esta propuesta de tesis está dividida en 5 capítulos donde se describe la investigación y el trabajo desarrollado adicionalmente se plantean las conclusiones y trabajos futuros.

En el capítulo 1, se presenta las generalidades, objetivo de la tesis, justificación y la descripción de la misma, así como finalmente la estructura de la tesis.

En el capítulo 2, se muestran los orígenes y efectos de los armónicos, en el cual se define un armónico, las fuentes que lo provocan, efectos y normatividad para el control de armónicos.



En el capítulo 3, se plasman las técnicas de mitigación de armónicos, en este caso la definición de filtros, características y los tipos de filtros para mitigar el efecto de los armónicos.

En el capítulo 4, se agregan los resultados ante la presencia de frecuencias armónicas en una red de distribución, por lo tanto, se describen los datos que se agregan a la red, la propuesta de metodología y consideraciones para el análisis de una red de distribución.

En el capítulo 5, se plantean distintos escenarios en el cual utilizando MatLab se simula una red de distribución de 32 nodos con distintas cargas desbalanceadas no lineales, se agregan admitancias en derivación, se analizan los resultados de voltajes en distintas frecuencias con el fin de demostrar que el método de barrido progresivo/regresivo en redes de distribución es más rápido de converger.

Finalmente, se presentan las Conclusiones, Recomendaciones para trabajos futuros y las Referencias consultadas.

En la parte de Anexo se presenta: 1) El paper que se expuso en la Vigésima Séptima Reunión Internacional de Verano de Potencia, Aplicaciones Industriales y exposición Industrial RVP- AI-2014 IEEE, y 2) Se agrega la programación en MatLab.



Capítulo 2

Origen y Efecto de los Armónicos

2.1 Introducción

El capítulo comienza con una introducción de los armónicos en el sistema eléctrico, en el que se definen los tipos de armónicos, las principales fuentes de armónicos, efectos de los armónicos en el sistema eléctrico, así como las Normas Armónicas dadas por IEC e IEEE.

Se espera que un sistema polifásico solo tenga formas de onda sinusoidalmente puras de corriente alterna y tensión, con una frecuencia única, pero, la situación real se desvía. Normalmente el voltaje y la corriente están distorsionados. Normalmente se les llama formas de onda no sinusoidales. Forma de onda no sinusoidal se forma con la combinación de muchas ondas senoidales de diferentes frecuencias de este modo las señales del sistema de potencia real tienen componente fundamental, así como componentes armónicos [5].

2.2 Definición de Armónicos

Las formas de onda de una señal no sinusoidal que tiene distintas frecuencias con respecto a la fundamental se llaman armónicas. La frecuencia de cada componente armónico se conoce como frecuencia armónica. En la mayoría de los casos la periodicidad y las ondas están bien definidas, donde la forma de onda puede ser expresada por la serie de Fourier, las frecuencias armónicas son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental (sin embargo, puede ser interarmónicas). El factor de número entero se conoce como el orden de componente armónico [5].

En algunas partes del mundo como los es Europa, la frecuencia fundamental es de 50 Hz para México es de 60 Hz.

La f frecuencia fundamental, entonces la componente fundamental de la corriente será

$$i_1 = I_1 \sin 2\pi ft \quad (1)$$

Donde, I_1 es la amplitud de la componente fundamental de la corriente [5], en la figura 1 se observa formas de onda senoidal a frecuencia fundamental y sus componentes armónicos 5^a, 7^a y 11^a.

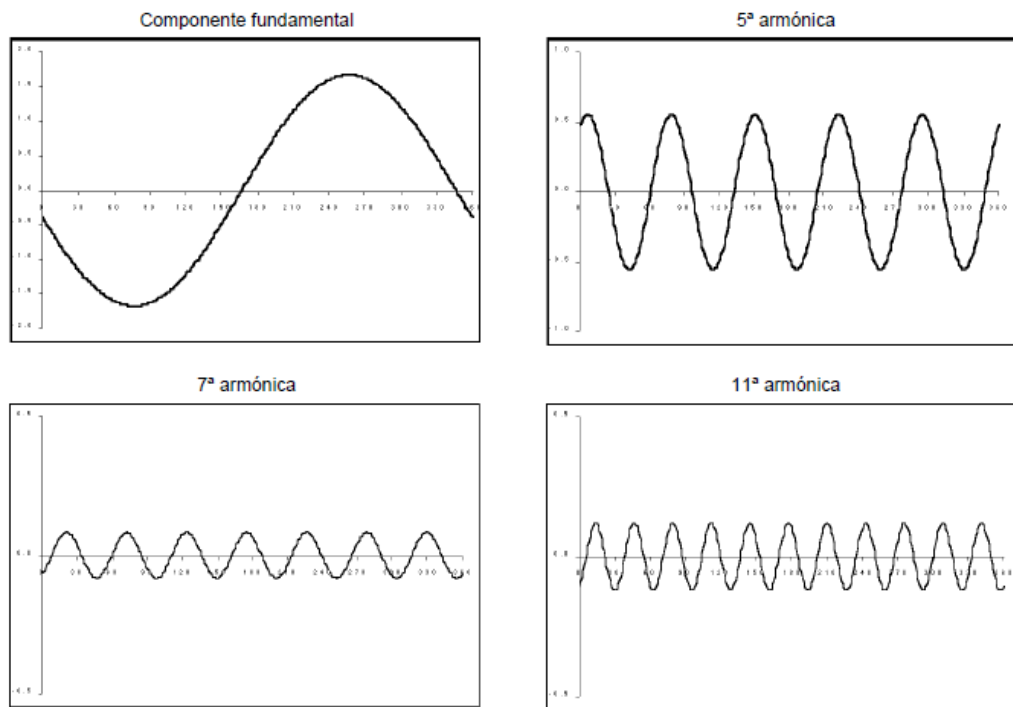


Fig. 1 Forma de onda fundamental y armónicos 5^a, 7^a, 11^a.

En general, la función mostrada se puede descomponerse en la sumatoria siguiente:

$$V(t) = \sum_{h=0} A_h \cos(h\omega_1 t + \varphi_n) \quad (2)$$

en donde:

$$\omega_1 = 2\pi f_1 \quad (3)$$

siendo f_1 la frecuencia, en ciclos por segundo, de la función original.

Las magnitudes A_h de cada componente armónico se calculan con la siguiente expresión:

$$\frac{1}{2} = A_h e^{j\phi h} = \frac{W_1}{2\pi} \int_0^{2\pi/W_1} V(t) e^{-jhW_1 t} dt \quad (4)$$

Las ondas simétricas contienen únicamente armónicas impares, mientras que para ondas asimétricas existirán tanto armónicas pares como impares.

Cuando se hacen mediciones de las ondas de corriente o voltaje utilizando analizadores de armónicas, el equipo efectúa estas integraciones mediante la técnica de la transformada rápida de Fourier, dando como resultado la serie de coeficientes A_h que expresadas con relación a la amplitud A_1 de la fundamental, constituye el espectro de corrientes armónicas relativo a la onda medida. Para ejemplificar esto las componentes armónicas relativas a la fundamental de la señal de la figura 1 son mostradas en la figura 2.

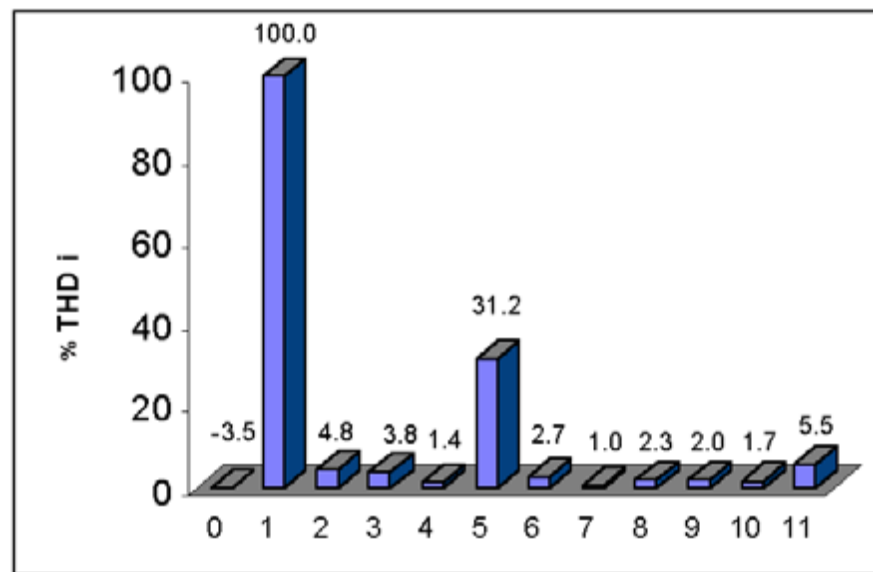


Fig. 2 Componentes de la señal de la Fig. 1

Estas señales pueden visualizarse en un sistema tridimensional en el que se representan su magnitud, ubicación en frecuencia y a lo largo del tiempo, como se muestra en la figura 3.

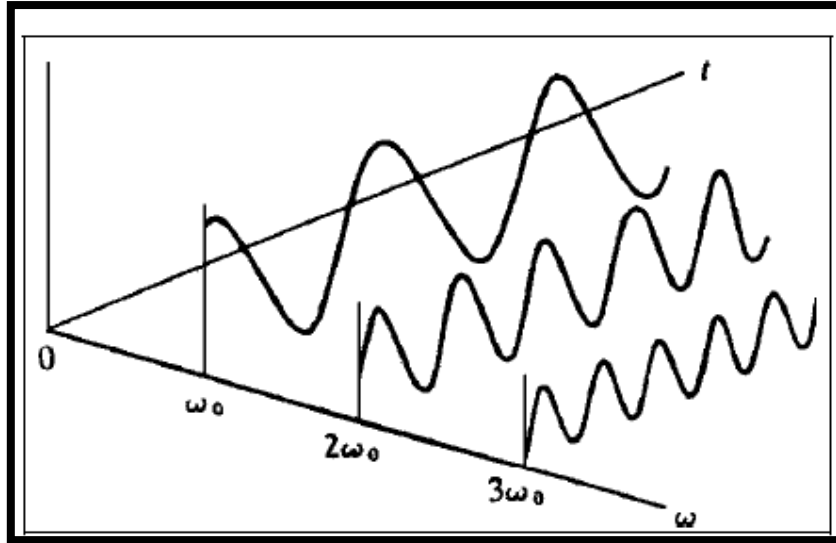


Fig. 3 Vista tridimensional de la señal de la fig.2.

2.3 Fuentes de Distorsión Armónica

Antes del incremento de los convertidores estáticos de potencia, el problema de las armónicas en los sistemas eléctricos de potencia se relacionaba con la operación de transformadores y máquinas rotatorias; incluso, la corriente de excitación requerida por los transformadores de potencia, era la principal fuente generadora de armónicas.

En operación estable, estas máquinas no provocan una distorsión considerable en el sistema, sin embargo, cuando operan fuera del rango de especificaciones o hay fluctuaciones de voltaje, los niveles de distorsión son significativos. Fuentes de armónicas pueden ser enlistadas a continuación [6]:

2.3.1 Transformadores

Cuando un voltaje senoidal es aplicado al devanado primario del transformador, una pequeña corriente fluirá si el transformador está en vacío. Esta corriente, conocida como corriente de excitación, es necesaria para establecer el campo magnético en el núcleo del transformador y así, inducir un voltaje en el lado secundario, [6], como lo ilustra la figura 4.

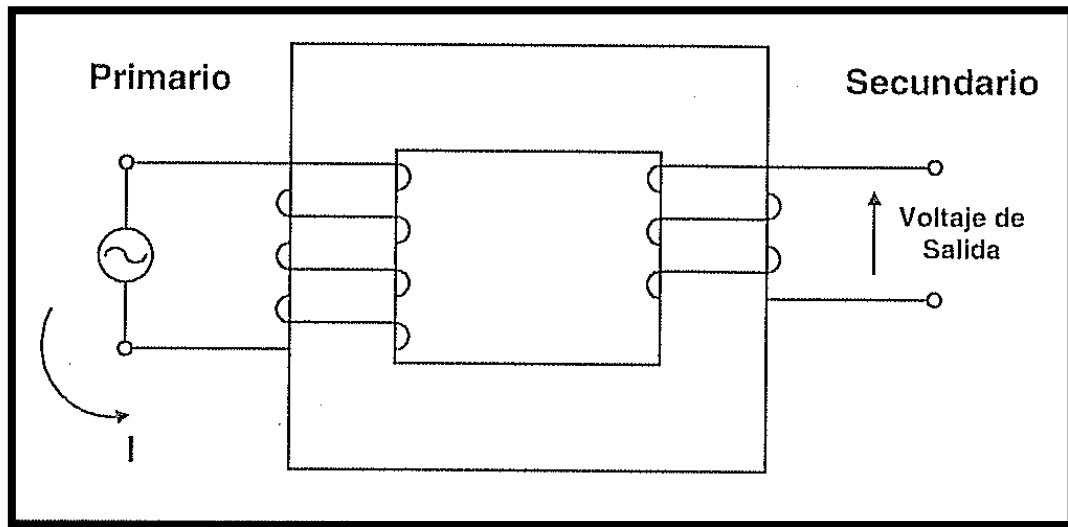


Fig. 4 Corriente de excitación en el devanado primario de un transformador.

Las pérdidas por histéresis, provocan que la forma de onda de la corriente de excitación demandada por el transformador no sea senoidal. La distorsión de la onda se debe principalmente a la tercera armónica, la cual alcanza el 50% de la corriente de frecuencia fundamental, como se muestra en la figura 5, el resto de las armónicas (5ª, 7ª y 9ª), repercuten en un grado menor.

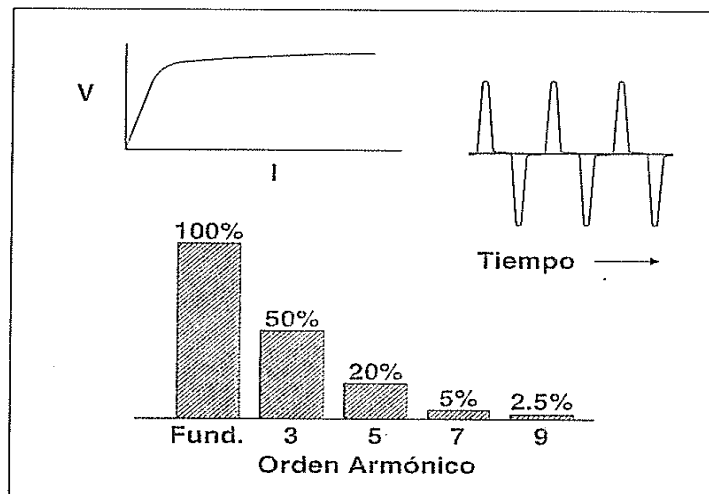


Fig. 5 Distorsión armónica en la corriente de excitación.

Los transformadores son diseñados para operar con una corriente de excitación del 1 o 2% la corriente nominal a plena carga. Así, aunque los transformadores son numerosos

en el sistema de potencia, su corriente de excitación generalmente no causa problemas armónicos, [6].

Cuando el voltaje aplicado al transformador es mayor al nominal, el campo magnético se incrementa al punto donde el núcleo puede alcanzar la saturación, como lo muestra la figura 6. A un ligero incremento de voltaje, el núcleo saturado produce un gran incremento en la corriente de excitación incrementándose abruptamente el contenido armónico de la misma, [6].

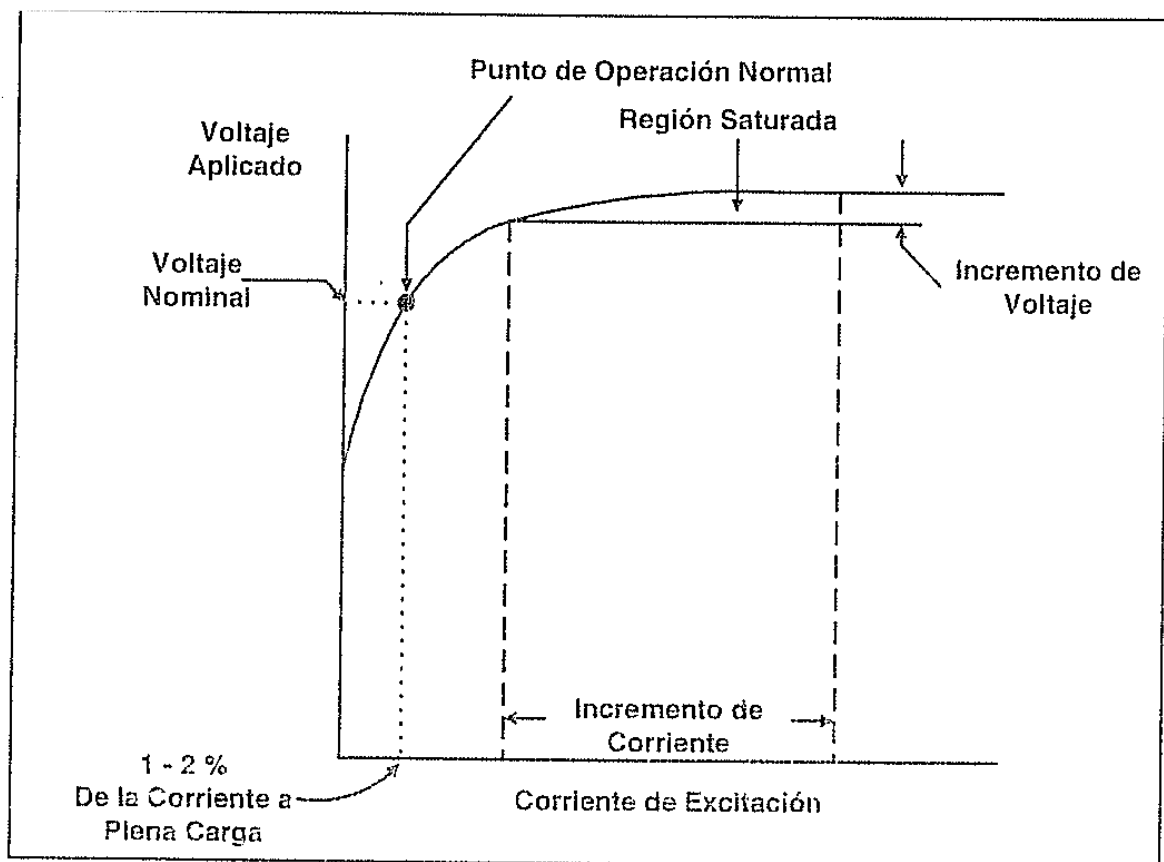


Fig. 6 Curva de saturación de un transformador.

En una línea que termina en un transformador, energizada con el interruptor de carga abierto, se presenta un sobre voltaje causado por un transitorio que dura algunos ciclos y un sobre voltaje de tiempo largo a través de la inductancia de la línea, conocido como efecto Ferranti. Éste alto voltaje provoca la saturación del transformador generando altas



corrientes armónicas hasta que el sobre voltaje sostenido se reduce por el cierre del interruptor de carga, [6].

2.3.2 Motores y Generadores

Un motor requiere de corriente de excitación del sistema para establecer un campo magnético en su núcleo. No obstante, en el caso de un motor, la saturación es más lineal que la de un transformador.

El tipo de devanado de un motor también influye en la generación de armónicos. El devanado típico del motor tiene 5 o 7 ranuras por polo, produciendo corrientes armónicas de orden 5^a y 7^a. Estas armónicas son minimizadas por ajustes de las ranuras.

En un generador de corriente alterna, el voltaje inducido en el estator es ligeramente distorsionado y contiene una componente dominante de 3^a armónica. Esto causa que fluya corriente de 3^a armónica cuando el generador opera bajo carga.

Las armónicas causadas por motores y generadores no son significativas en la producción armónica total en sistemas de transmisión, [6].

2.3.3 Dispositivos de arco

Esta categoría incluye hornos de arco eléctrico, soldadoras de arco y lámparas de descarga (fluorescentes, vapor de sodio, vapor de mercurio) con balastro electrónico. Todos estos equipos tienen un comportamiento no lineal.

En un horno de arco eléctrico de CA, el acero y otros materiales metálicos son fundidos y refinados por medio de un arco de alta energía. El proceso inicia cuando electrodos de grafito, cada uno controlado individualmente, son acercados al horno, haciendo contacto con el acero.

Los electrodos son levantados y bajados para regular la corriente de arco; la trayectoria de la corriente es de un electrodo a través del acero a otro electrodo. La corriente que pasa a través del carbón del electrodo al acero tiene una impedancia diferente en la dirección positiva que en la dirección negativa.

Durante el proceso de fundición, el voltaje decae tanto como en la corriente de arco incrementa, limitada únicamente por la impedancia del sistema de potencia, que se ve afectada por la reactancia de los cables del horno y algunas contribuciones del transformador que lo alimenta. El resultado de las variaciones del voltaje de arco produce todas las armónicas, ver Fig.7, [6].

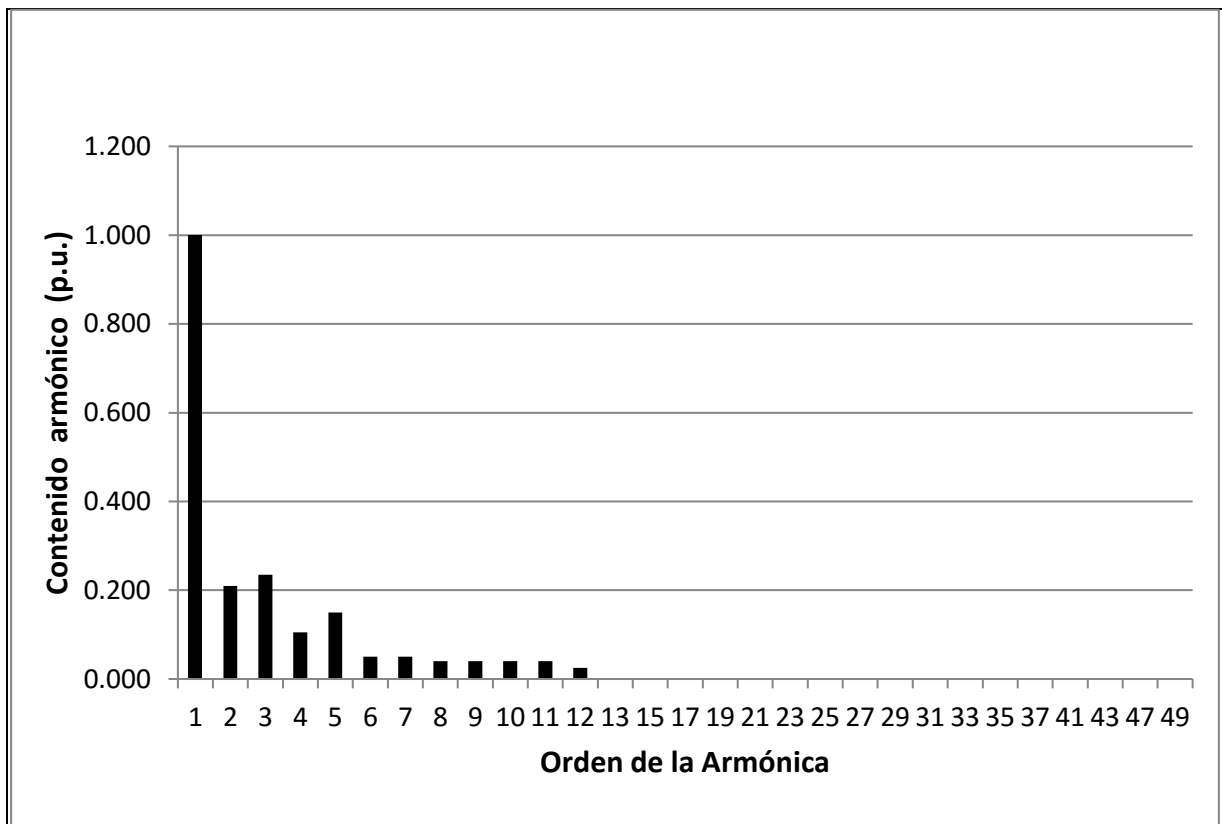


Fig. 7 Orden de la armónica en etapa de fundición.

Cuando la chatarra está siendo fundida, la 2ª y 3ª armónicas son dominantes. En el proceso de refinación, Fig.8, la superficie del metal es relativamente uniforme y el arco es más estable, predominante todavía la 2ª y 3ª armónica pero con magnitudes reducidas al 7 u 8% de la magnitud de corriente fundamental. [7]

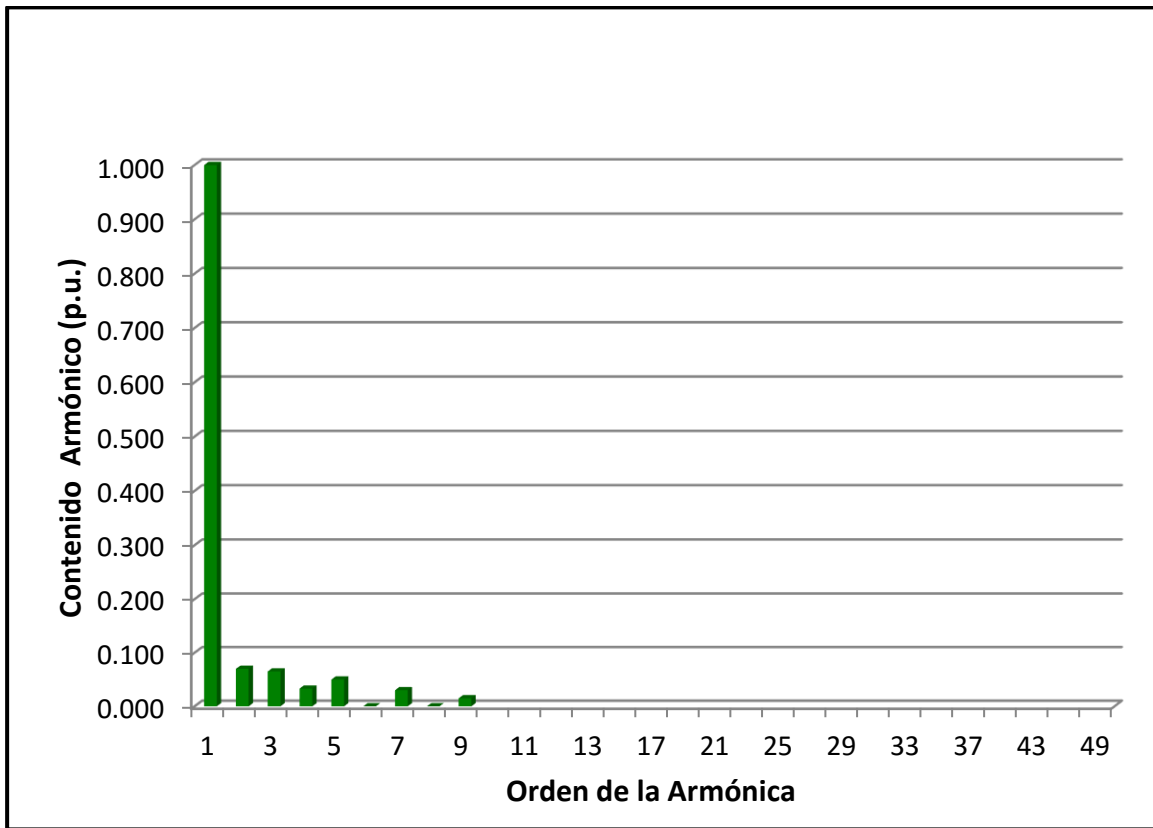


Fig. 8 Orden de la armónica en etapa de refinación.

Los dispositivos de arco con mayor producción de armónicas son, probablemente, cargas de alumbrado, las cuales tiene mayor presencia en el sistema de potencia. Sin embargo, los hornos de arco causan los problemas más severos porque representan una fuente armónica de gran capacidad, concentradas en un solo lugar.

2.3.4 Alumbrado fluorescente

Son lámparas de descarga que requieren un balastro para suministrar un alto voltaje e iniciar la descarga de la corriente entre dos electrodos del tubo a través de vapor o gas. Una vez que la descarga es establecida, el voltaje disminuye y la corriente de arco se incrementa. El balastro reduce rápidamente la corriente hasta obtener la iluminación específica. De esta forma, el balastro es también un limitador de corriente.

La figura 9 muestra las armónicas generadas que incluyen una fuerte componente de 3ª armónica, porque el balastro es un dispositivo ferromagnético que requiere corriente de excitación la cual contiene armónicas de tercer orden, [6].

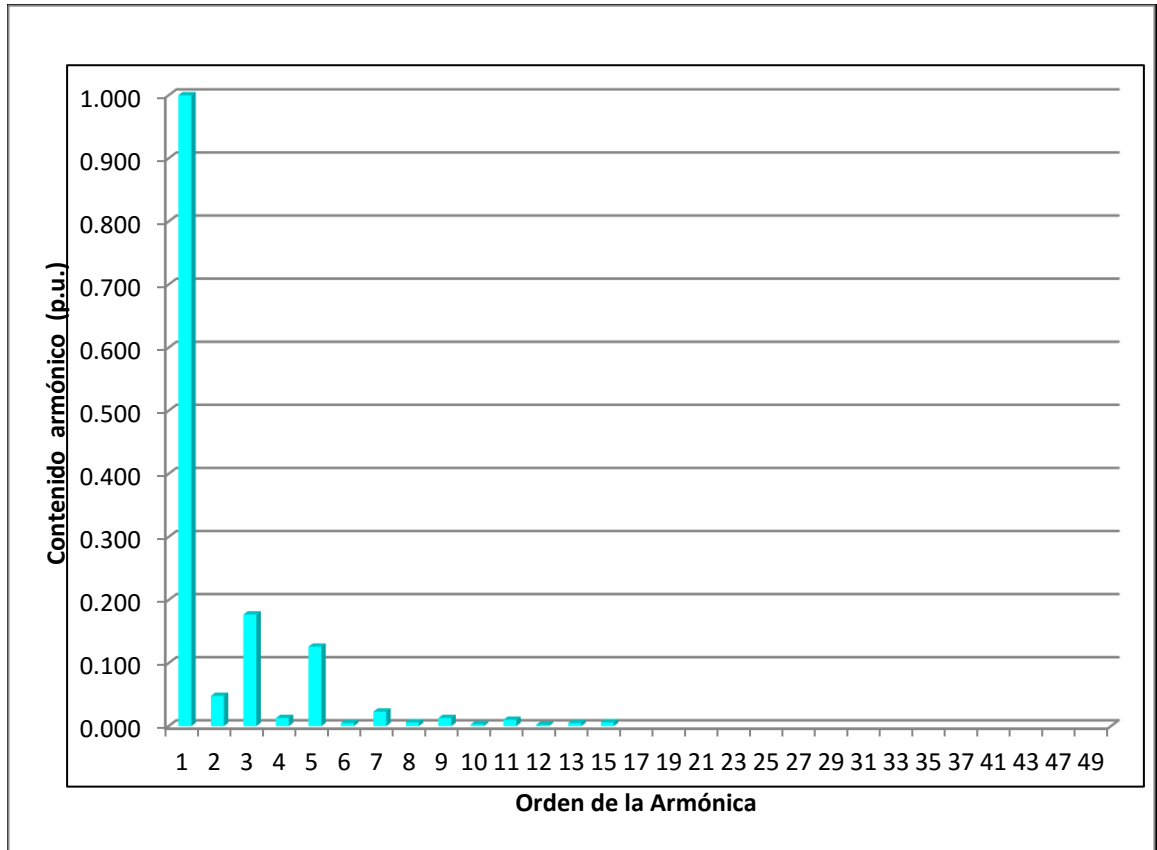


Fig. 9. Armónicas de una lámpara fluorescente.

La creciente demanda de sistemas eficientes de iluminación, debido a programas de ahorro de energía, ha incrementado el uso de éstas lámparas, provocando una fuerte inyección de armónicas a la red de distribución.

2.3.5 Controladores de arranque.

Estos dispositivos generan armónicas por su mecanismo de control. Por ejemplo, en la figura 10, los arrancadores a voltaje reducido tienen un interruptor de tiristores que limita la corriente de arranque demanda por el motor, disminuyendo el voltaje durante el arranque. El voltaje aplicado al motor es controlado por la variación en el ángulo de encendido de los tiristores del switch.

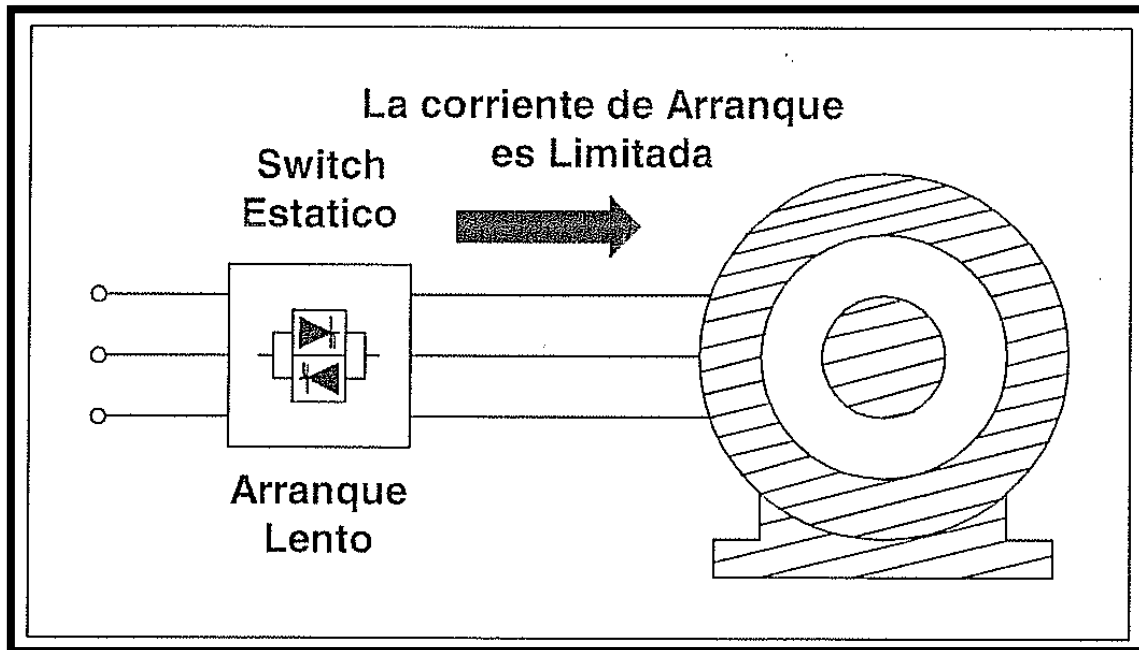


Fig. 10. Arrancador a voltaje reducido.

Sólo operan por un corto tiempo (durante el arranque del motor), de tal manera que no causan grandes problemas de armónicas.

2.3.6 Compensador estático de VARS

El Compensador Estático de VARs (SVC, por sus siglas en inglés) controla el voltaje para el ajuste de la cantidad de potencia reactiva suministrada o absorbida del sistema. Utiliza reactores y capacitores controlados por tiristores. El SVC puede cambiar la magnitud y dirección del flujo de VARs muy rápidamente en respuesta a las necesidades de carga.

Un SVC es usado en cargas industriales que varían rápida y significativamente, tales como hornos de arco eléctrico, para suministrar potencia reactiva local a la carga. Esto reduce el flicker e incrementa la eficiencia del horno.

En los sistemas de potencia, el SVC opera continuamente para regular el voltaje y mejorar la capacidad de transferencia de potencia a través del sistema de transmisión. El SVC podría también ser interrumpido inmediatamente después de una falla en el sistema para ayudar a mantener la estabilidad, suministrando potencia reactiva y tener un mejor soporte de voltaje.

Como se puede ver en la figura 11, un SVC genera en su mayoría del orden de la 5ª y 7ª armónica debido al equipo electrónico.

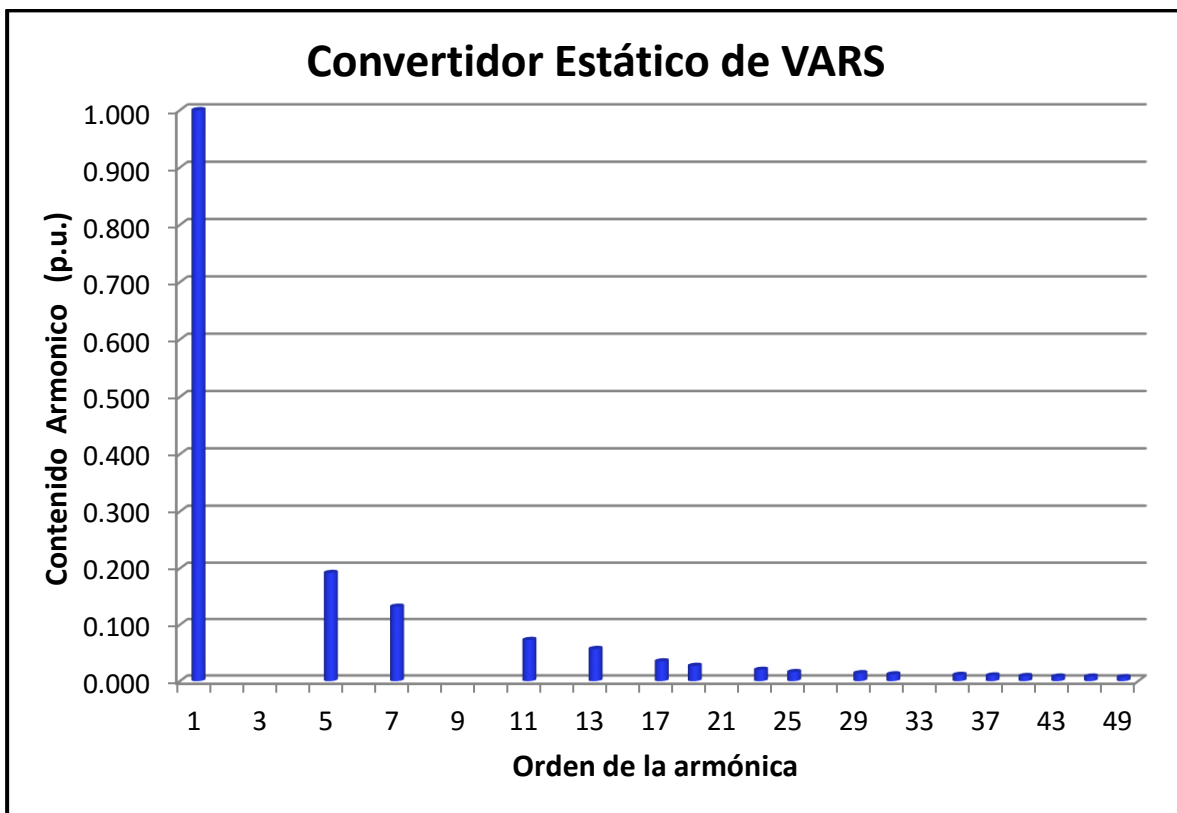


Fig. 11 Orden de las armónicas en un SVC .



2.4 Efectos de los Armónicos en los Sistemas Eléctricos

Las corrientes armónicas generadas por cargas no lineales, están desfasadas noventa grados con respecto al voltaje que las produce, fluyendo una potencia distorsionante de la fuente a la red eléctrica y viceversa, que solo es consumida como pérdidas por efecto Joule que se transforman en calor, de forma equivalente a la potencia reactiva fundamental relacionada al factor de potencia de desplazamiento.

Algunos de los efectos nocivos producidos por el flujo de corrientes armónicas son:

- Aumento en las pérdidas por efecto Joule (I^2R).
- Sobrecalentamiento en conductores del neutro.
- Sobrecalentamiento en motores, generadores, transformadores y cables, reduciendo su vida.
- Vibración en motores y generadores.
- Falla de bancos de capacitores.
- Falla de transformadores.
- Efectos de resonancia que amplifican los problemas mencionados anteriormente y pueden provocar incidentes eléctricos, mal funcionamiento y fallos destructivos de equipos de potencia y control.
- Problemas de funcionamiento en dispositivos electrónicos sensibles.
- Interferencias en sistemas de telecomunicaciones.

Los efectos dependerán de la proporción que exista entre la carga no lineal y la carga total del sistema, aunado a que se debe mantener la distorsión dentro de los límites establecidos por las normas.

Generalmente cuando la carga no lineal representa menos del 20% de la carga total, la distorsión armónica en corriente estará dentro de los límites establecidos en IEEE 519, sin que exista la necesidad de efectuar algún tipo de filtrado [7].

Si se cuenta con equipo electrónico sensible en plantas industriales o instalaciones médicas, donde las cargas no lineales sean solo una pequeña proporción, pueden llegar



a ocurrir problemas en su funcionamiento atribuibles al sistema de puesta a tierra, conmutación de capacitores remotos, transitorios, o distorsión armónica producida por otros usuarios, debiendo de identificar las causas y tomar las acciones correctivas, que pudiera requerir la instalación de protecciones o filtros [7].

Los problemas causados por la distorsión armónica, ocurren usualmente cuando la carga no lineal representa más del 20% de la total y por la presencia de bancos de capacitores se presentan condiciones de resonancia.

2.4.1 Impacto en la Vida de los Equipos

Los fabricantes establecen los límites de funcionamiento de sus equipos por debajo de sus valores de falla para tener una operación adecuada y una vida prolongada, sin embargo, cuando existen condiciones de resonancia, dichos límites pueden ser excedidos, acelerando su envejecimiento o provocando su falla.

La magnitud de los costos originados por la operación de sistemas y equipos eléctricos con tensiones y corrientes distorsionadas, puede percibirse considerando lo siguiente:

1. La sobre elevación de 10 °C en la temperatura del aislamiento en conductores, reduce su vida a la mitad.
2. Un incremento del 10% en la tensión nominal del dieléctrico de un capacitor, reduce su vida a la mitad.

2.4.2 Condiciones de resonancia

En un sistema con cargas no lineales, las corrientes armónicas fluyen hacia la red a través del transformador de distribución, para ejemplificar esto observe la figura 12.

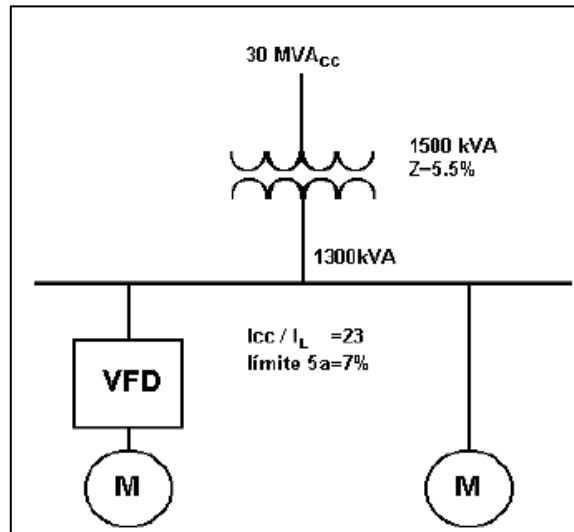


Fig. 12 Diagrama unifilar de una planta industrial con cargas no lineales y lineales

Para determinar la proporción de carga no lineal con respecto a la carga total que puede instalarse sin exceder los límites establecidos en la norma IEEE 519 [8], se debe conocer el contenido armónico de la carga no lineal.

Evaluando la condición para motores de CD con THD (Total Harmonic Distorsion) en corriente de 38%, se pueden instalar hasta un 20% de estas cargas con relación a la carga total, sin que se exceda el límite de 7% para la 5ª armónica definido por la relación I_{cc} / I_L , pero solo el 10% de la carga total podrán ser VFD 's ya que su THD es de 80%, como lo muestra la figura 13. Este cálculo no considera el efecto de cancelación de armónicas que ocurre cuando múltiples equipos con control de fase operan, tal como sucede cuando grupos de motores de CD trabajan a diferentes velocidades [7].

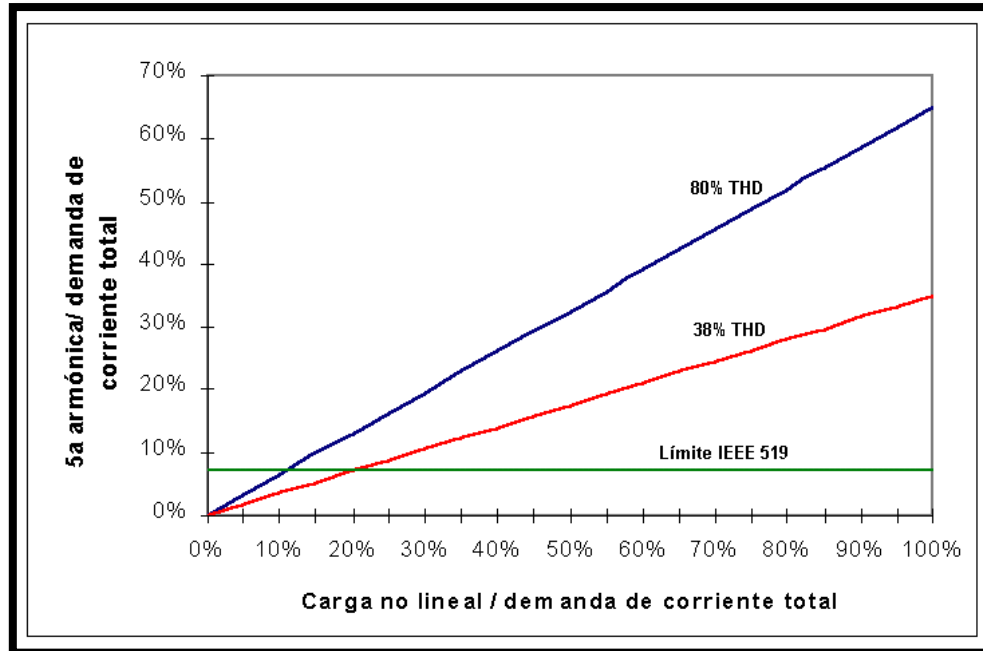


Fig. 13 Evaluación de la 5ª armónica en función de la carga no lineal instalada

Al no existir capacitores en la red, el espectro de corriente se distribuye en los diferentes componentes de la misma, sin variar su composición relativa, aunque su magnitud dependerá de sus admitancias respectivas, sin que se magnifiquen las corrientes armónicas.

Los mayores problemas en las redes eléctricas relacionados con la distorsión armónica, se presentan al instalar capacitores para compensar el factor de potencia de desplazamiento en presencia de cargas no lineales significativas.

Un voltaje con contenido armónico que alimenta a bancos de capacitores, provoca que su corriente se incremente ya que su impedancia se reduce con la frecuencia.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (5)$$

Donde: X_c = reactancia capacitiva, f =frecuencia y C es el valor del banco de capacitores en Faradios

La magnitud del incremento de la corriente eficaz con relación a la corriente nominal fundamental, es función del contenido armónico de la señal de voltaje.

$$I_{rms} = I_1 * \sqrt{1 + 9\left(\frac{V_3}{V_1}\right)^2 + 25\left(\frac{V_5}{V_1}\right)^2 + \dots + h^2\left(\frac{V_h}{V_1}\right)^2} \quad (6)$$

Los capacitores al ser cargas lineales no generan armónicas, pero si las magnifican, produciéndose disparos frecuentes de sus interruptores o fallas en los mismos capacitores un ejemplo de esto es mostrado en la figura 14.

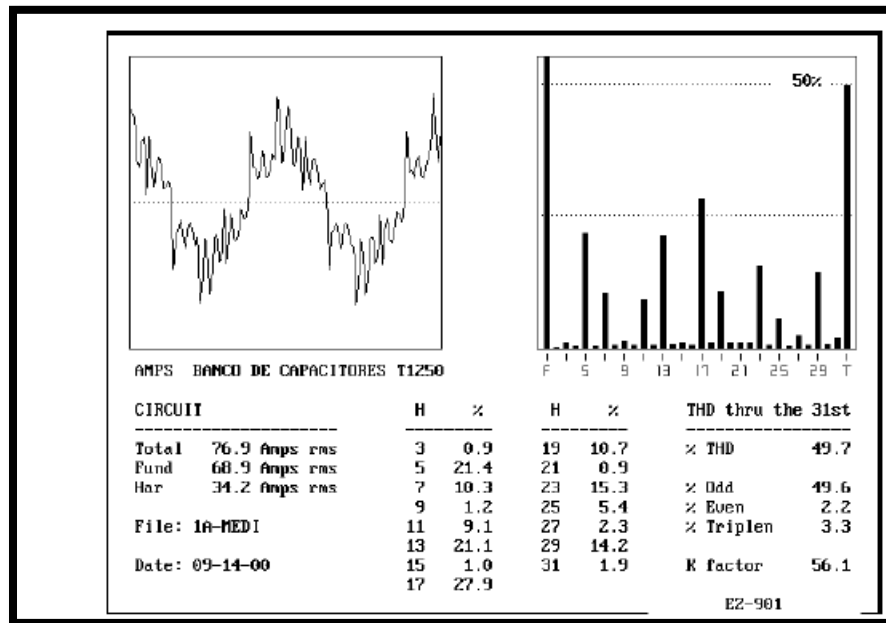


Fig. 14 Corriente en capacitor instalado en sistema con cargas no lineales

La instalación de bancos de capacitores en el lado de baja tensión del transformador de distribución, ver Fig.15, produce una resonancia paralela con la reactancia inductiva de la fuente.

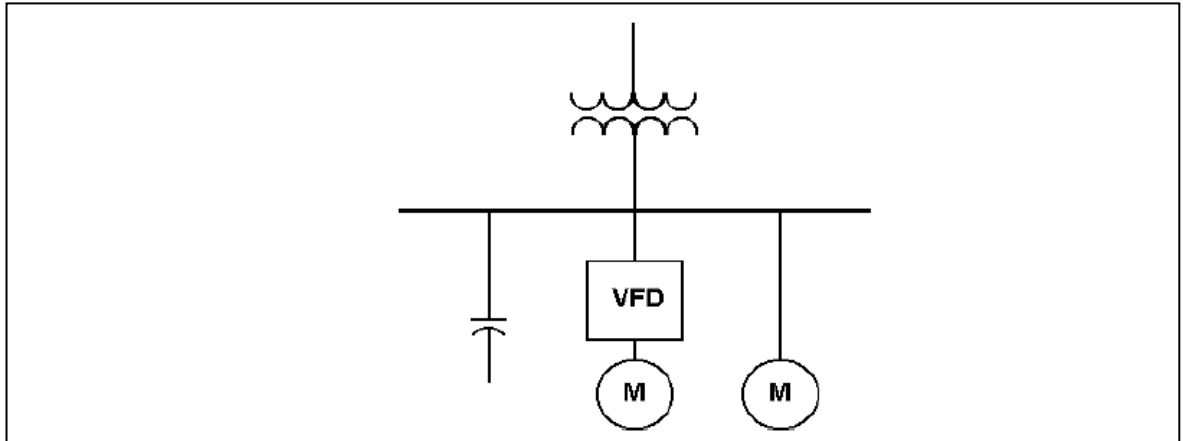


Fig. 15 Diagrama unifilar de una planta industrial con cargas lineales y no lineales a la que se agregan capacitores.

Al incrementarse la impedancia del sistema, las corrientes armónicas cercanas al punto de resonancia se magnifican como se ve en la figura 16, siendo el valor de dicha frecuencia función de la potencia reactiva de los capacitores.

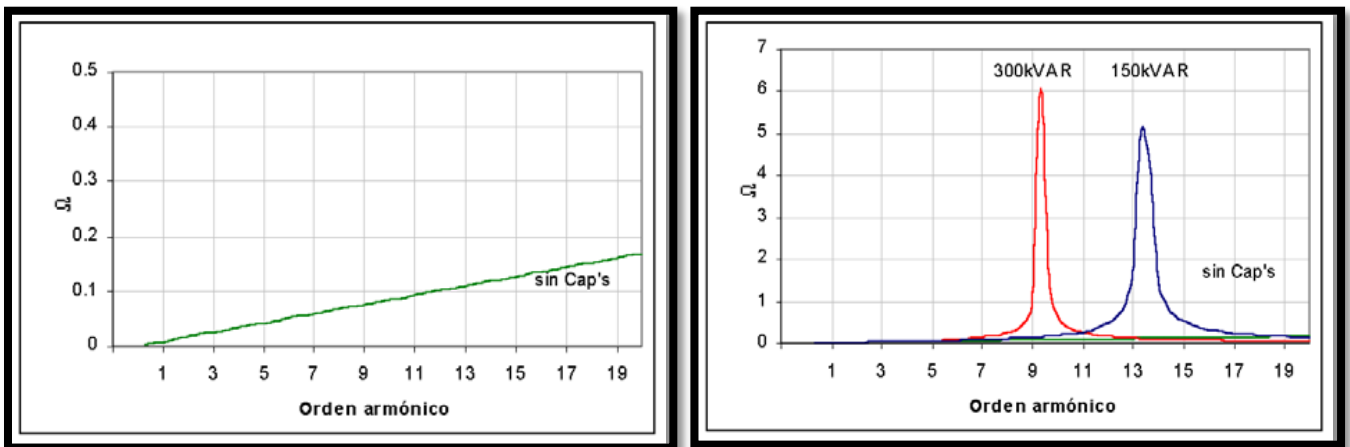


Fig.16 a) Impedancia del sistema sin capacitores b) Resonancia paralela para diferentes potencias de capacitores

2.4.3 Efectos en los transformadores

En los transformadores de propósito general su potencia nominal se define para limitar la elevación de temperatura del aparato, estableciendo en su placa de datos la magnitud del voltaje de alimentación y la máxima corriente de carga, considerando que los voltajes son senoidales y están balanceados y la distorsión armónica en corriente no excede de 0.5% [7].

Durante su operación, los transformadores de potencia están sujetos a esfuerzos térmicos, eléctricos y mecánicos los cuales degradan el sistema de aislamiento aceite/papel, siendo la temperatura excesiva, la presencia de oxígeno y humedad combinadas con los esfuerzos eléctricos los factores principales que aceleran dicha degradación. Como causas secundarias se ubican los esfuerzos mecánicos originados por la excitación del núcleo y corto circuitos, así como los ácidos y lodos como productos generados por la descomposición del aceite.

El proceso de degradación del sistema aislante aceite / papel evoluciona gradualmente hasta presentarse la falla en el transformador de potencia. En México, la estadística de fallas de transformadores de potencia de la CFE en 1999 está clasificada de acuerdo a su frecuencia de ocurrencia el cual es presentado en la tabla 1 [7].

Tabla 1. Fallas recurrentes en transformadores

Tipo de falla	Frecuencia de Ocurrencia
Problemas de aislamiento en devanados	49%
Boquillas	26%
Cambiador de derivaciones	10%
Explosiones por incendio	3%
Núcleo	2%
Otras causas	10%

Las corrientes armónicas producen un calentamiento adicional en los devanados de los transformadores, por el incremento en las pérdidas causadas por las corrientes de eddy, que son función tanto de la corriente eficaz que circula como de la frecuencia al cuadrado de la señal, debiéndose de considerar su capacidad en forma reducida con respecto a su nominal, cuando alimentan cargas no lineales de acuerdo al estándar ANSI/IEEE C.57.110. La distorsión en voltaje causa pérdidas adicionales en el núcleo pero su impacto es poco significativo.

Esta situación explica los incrementos considerables en la temperatura de los transformadores que alimentan cargas no lineales, aun cuando la corriente de carga este por debajo de su capacidad nominal, exponiéndose a fallas prematuras.

La capacidad disponible del transformador puede llegar a ser únicamente el 50% de su nominal, cuando el 70% de su carga es no lineal, aplicando típicamente a transformadores de 440 / 220V que alimentan en su totalidad equipo electrónico, como se muestra en la figura 17. En los transformadores principales de distribución la reducción es menos severa debido a la cancelación de armónicas entre diversas cargas.

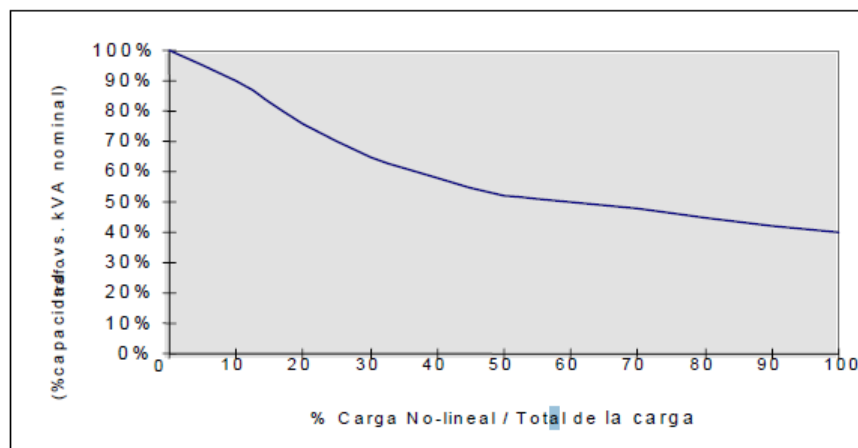


Fig.17 Reducción en la capacidad de transformadores con relación a la carga no lineal que alimenta.

El Underwriters Laboratories (UL) establece el método denominado factor K para transformadores secos, que es un índice de la capacidad del transformador para soportar los efectos del calentamiento producidos por las cargas no lineales, siendo diseñados para operar a su capacidad nominal con corrientes que tengan niveles de distorsión de acuerdo a dicho factor, sin que se excedan los límites nominales de elevación de temperatura. Los valores de factor K normalizados en transformadores son 4, 9, 13, 20, 30, 40 y 50, siendo los más usados 4, 13 y 20.

Algunas de las ventajas y características de diseño de los transformadores con factor K son:



- Incorporan un blindaje electrostático entre los devanados primario y secundario para la atenuación de picos de voltaje, ruido de línea y transitorios
- Ciertos fabricantes elaboran los devanados utilizando tiras de lámina (foil), generalmente de aluminio, en lugar de alambre magneto para reducir las corrientes de Eddy y minimizar el calentamiento adicional. Así mismo, se tiene la ventaja de reducir los esfuerzos por voltaje entre las capas de los devanados ya que se utiliza una vuelta por capa.
- Por ejemplo, si en el diseño de un transformador de 200V se consideran 10V por vuelta, usando alambre y definiendo 2 capas se tienen hasta 200V entre 2 espiras contiguas de 2 diferentes capas, pero para devanados con lámina se tienen 20V entre capas contiguas.
- En el arreglo donde se utilizan láminas se puede devanar el primario y secundario en la misma altura axial reduciendo su volumen y las corrientes de Eddy.
- La barra de neutro esta dimensionada para manejar el 200% de la corriente de línea.
- Tienen una menor corriente de inrush.

El factor K es un índice que considera las pérdidas adicionales que las corrientes de Eddy provocan en el transformador, debido a la presencia de armónicas, siendo proporcionales al cuadrado de la frecuencia. Un factor K unitario corresponde a una corriente senoidal pura.

$$\text{Factor } K = \frac{\sum h^2 I_h^2}{\sum I_h^2} \quad (7)$$

Donde h : orden armónico
 I_h : contenido armónico individual



2.4.4 Efectos en los motores

La gran mayoría de los motores de inducción fueron diseñados para operar con ondas senoidales, siendo la corriente fundamental en fase con el voltaje la que produce trabajo útil en la flecha en términos de par y velocidad. Cuando un motor es alimentado con una señal de voltaje distorsionado, sus componentes armónicos generan calor en los devanados lo que incrementa su resistencia y reduce su eficiencia. Cuando un motor es alimentado por un VFD (Variador de Frecuencia), está sujeto a señales de alta frecuencia, calentándose, reduciendo su eficiencia y acortando su vida, por lo que en ocasiones deben sobredimensionarse para soportar estas condiciones o utilizar motores para uso con inversores (inverter duty). La corriente fundamental produce un par que rota en el sentido de giro del motor a una velocidad definida por su frecuencia radial. Las señales de secuencia negativa producen pares en sentido inverso, cuyas velocidades de rotación dependen del orden armónico, [7].

La interacción de los pares de diferentes velocidades y sentidos de giro, pueden producir pares pulsantes, causando vibración y esfuerzos en las partes mecánicas del sistema, repercutiendo en su eficiencia. Las armónicas de secuencia cero, no producen pares rotativos, solo agregan calentamiento al motor, [7].

Los motores de alta eficiencia son menos sensibles a la distorsión armónica comparados con los motores estándar, debido a su mayor capacidad térmica y factores de diseño que minimizan las pérdidas parásitas o indeterminadas, aun cuando su eficiencia se ve reducida por el incremento en las pérdidas. En resumen, los efectos más significativos producidos por las armónicas en los motores son:

- Incremento de pérdidas por calor
- Reducción del par efectivo en la flecha
- Vibración
- Reducción de eficiencia
- Disminución de su vida



2.5 Normatividad para el control de Armónicos

Existen varios estándares para la normatividad del contenido armónica máximo en las redes eléctricas uno de ellos es el IEEE 519-1992, [8].

2.5.1 Norma IEEE std. 519-1992

Para asegurar la integridad en el sistema de potencia global, es preciso establecer límites sobre los niveles de distorsión permisibles que apliquen tanto a los usuarios como a los suministradores de la energía. Resulta especialmente delicada la relación entre el usuario y la compañía suministradora, ya que esta última tiene derecho a pedir al usuario que limite la contaminación al sistema de transmisión y distribución y el usuario tiene el derecho a pedir el suministro de una energía con la menor contaminación posible.

En México existe la especificación CFE L0000-45 denominada “Perturbaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente del suministro de energía eléctrica” concerniente a la distorsión armónica permisible, [9].

En los Estados Unidos de América la norma IEEE 519 “Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia” define entre sus puntos los valores máximos de distorsión permisible, [8].

Ambas normatividades se establecen para limitar las corrientes armónicas de cada usuario en lo individual de forma que los niveles armónicos en voltaje en la totalidad del sistema de potencia sean aceptables, siendo su cumplimiento una responsabilidad compartida entre suministrador y usuarios.

- **Suministrador.** Es su responsabilidad que, en la acometida, la distorsión armónica total en voltaje (THDv) se encuentre dentro de los límites establecidos, por lo que debe asegurarse que condiciones de resonancia en el sistema de generación, transmisión o distribución no ocasionen niveles inaceptables de distorsión en voltaje, aun si los usuarios se encuentran dentro de los límites de generación armónica en corriente.



- **Usuarios.** Deben de asegurar que en la acometida, la generación de armónicas en corriente se ubique dentro de los límites establecidos, tanto para componentes armónicas individuales como para la Distorsión de Demanda Total TDD, especificándose dichos límites como porcentaje de la demanda promedio de corriente del usuario en lugar de la corriente fundamental instantánea, con el fin de proporcionar una base común de evaluación a lo largo del tiempo.

La norma es aplicable para límites de distorsión de corriente y voltaje. La filosofía de la norma implica dos puntos importantes:

- Los usuarios deben responsabilizarse para limitar la cantidad de corrientes armónicas inyectadas al sistema de potencia.
- Las compañías suministradoras deben limitar la distorsión del voltaje y suministrar un voltaje de calidad al usuario.

Los límites dados en las tablas son usados como valores de diseño del sistema en condiciones de operación normal, las cuales no son mayores de una hora. Para periodos cortos, por ejemplo, en condiciones de arranque de motores, los límites pueden ser excedidos en un 50%.

2.5.2 Límites de distorsión de corriente

Las corrientes armónicas para cada usuario son evaluadas en la acometida y los límites se establecen basados en la relación entre la corriente de cortocircuito y la demanda máxima de corriente de la carga del usuario son mostradas en la Tabla 2, [4,8].

Tabla 2. Límites de distorsión armónica en corriente IEEE 519.

I_{cc}/I_L	TDD	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$
$V_n \leq 69 \text{ kV}$						
<20	5.0%	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%
20-50	8.0%	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%
50-100	12.0%	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%
100-1000	15.0%	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%
>1000	20.0%	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$						
<20*	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
20-50	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%
50-100	6.0%	5.0%	2.25%	2.0%	0.75%	0.35%
100-1000	7.5%	6.0%	2.75%	2.5%	1.0%	0.5%
>1000	10.0%	7.5%	3.5%	3.0%	1.25%	0.7%
$V_n > 161 \text{ kV}$						
<50	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
≥ 50	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%

La distorsión de demanda total (TDD) está definida como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} * 100 \quad (8)$$

Donde:

I_h : Magnitud de la armónica individual

I_L : Demanda máxima de la corriente fundamental de la carga

h : orden armónico impar

- I_{cc} : Debe utilizarse aquella que, bajo condiciones normales de operación, resulte en la mínima corriente de cortocircuito en la acometida, ya que este valor reduce la relación I_{cc}/I_L y la evaluación es más severa, [4], [8].
- I_L : Es la demanda máxima de la corriente fundamental en la acometida y puede calcularse como el promedio de las demandas máximas de corriente mensuales

de los últimos 12 meses o puede estimarse para usuarios que inician su operación. [4], [8].

- Los límites son más estrictos para los usuarios que representan mayor carga al sistema, ya que la relación I_{cc}/I_L es menor, [4], [8].

Los sistemas más robustos pueden transmitir mayores niveles de corrientes armónicas sin producir una distorsión excesiva de voltaje que los sistemas más débiles, los límites son mostrados en la tabla 3.

Tabla 3. Límites de distorsión armónica en corriente CFE L0000-45

I_{cc}/I_L	TDD	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$
$V_n \leq 69 \text{ Kv}$						
$I_{cc}/I_L < 20$	5.0%	4.0%	2.0%	1.5%	0.6%	0.3%
$20 \leq I_{cc}/I_L < 50$	6.0%	7.0%	3.5%	2.5%	1.0%	0.5%
$50 \leq I_{cc}/I_L < 100$	12.0%	10.0%	4.5%	4.0%	1.5%	0.7%
$100 \leq I_{cc}/I_L < 1000$	15.0%	12.0%	5.5%	5.0%	2.0%	1.0%
$I_{cc}/I_L \geq 1000$	20.0%	15.0%	7.0%	6.0%	2.5%	1.4%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$						
$I_{cc}/I_L < 20$	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
$20 \leq I_{cc}/I_L < 50$	4.0%	3.5%	1.75%	1.25%	0.5%	0.25%
$50 \leq I_{cc}/I_L < 100$	6.0%	5.0%	2.25%	2.0%	0.75%	0.35%
$100 \leq I_{cc}/I_L < 1000$	7.5%	6.0%	2.75%	2.5%	1.0%	0.5%
$I_{cc}/I_L \geq 1000$	10.0%	7.5%	3.5%	3.0%	1.25%	0.7%
$V_n > 161 \text{ kV}$						
$I_{cc}/I_L < 50$	2.5%	2.0%	1.0%	0.75%	0.3%	0.15%
$I_{cc}/I_L \geq 50$	3.75%	3.0%	1.5%	1.15%	0.45%	0.22%

- Para las armónicas pares, los límites son el 25% de los valores especificados en la tabla.
- Los límites deben ser usados como el caso más desfavorable de operación normal. Para arranque de hornos eléctricos de arco, que toman un tiempo máximo de un minuto, se permite exceder los límites en 50%.
- No se permiten corrientes de carga con componentes de corriente directa.

La distorsión de demanda total TDD está definida como:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} * 100 \quad (9)$$

Donde:

I_h : Magnitud de la armónica individual.

I_L : Demanda máxima de la corriente fundamental de la carga.

h : orden armónico impar.

2.5.3. Límites de distorsión de voltaje

El suministrador es responsable de mantener la calidad del voltaje en el sistema global, especificándose los límites para diferentes niveles de tensión. Los límites en de distorsión de voltaje en el estándar IEEE 519 y CFE L0000-45, son mostrados en las tablas 4 y 5, respectivamente. Es importante notar que la definición de la distorsión armónica total THD expresada en (10) que se utiliza es diferente a la convencional ya que se expresa la distorsión en función al voltaje nominal, que es un valor constante para cada usuario, estableciéndose así, una base fija de evaluación a lo largo del tiempo. [4,8].

Tabla 4. Límites de distorsión armónica en Voltaje IEEE 519

Nivel de tensión en la Acometida (V_n)	Distorsión armónica individual	Distorsión armónica total THD V_n
$V_n \leq 69$ kV	3.0%	5.0%
69 kV $< V_n \leq 161$ kV	1.5%	2.5%
$V_n > 161$ kV	1.0%	1.5%

$$THD_{V_n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} * 100 \quad (10)$$

Donde:

V_h : Magnitud de la componente armónica individual.

h : Orden Armónico.

V_n : Voltaje Nominal Fundamental del sistema.



Tabla 5. Límites de distorsión armónica en Voltaje CFE L0000-45

Nivel de tensión en la Acometida (V_n)	Distorsión armónica individual	Distorsión armónica total THD V_n
$V_n \leq 1 \text{ kV}$	5.0%	8.0%
$1 < V_n \leq 69 \text{ kV}$	3.0%	5.0%
$69 \text{ kV} < V_n \leq 138 \text{ kV}$	1.5%	2.5%
$V_n > 138 \text{ kV}$	1.0%	1.5%



Capítulo 3

Técnicas de Mitigación de Armónicos

En el presente Capítulo se exponen las principales técnicas de mitigación de armónicos utilizadas en la industria, cabe señalar que en este trabajo de tesis solo se expone la propagación de armónicos y no su mitigación, pero se exponen para posibles trabajos futuros.

3.1 Definición de Filtros

Puede definirse un *filtro* como cualquier dispositivo que modifica de un modo determinado una señal que pasa a través de él. Algunos autores reservan la denominación de filtros para los dispositivos selectores de frecuencia, es decir, aquellos que “dejan pasar” las señales presentes en ciertas bandas de frecuencia y “bloquean” las señales de otras bandas. Aunque existen muchos filtros de interés práctico que no cumplen esa función, por lo que preferimos la definición más amplia, la mayoría de los filtros que trataremos son selectores de frecuencia [10]. La excepción la constituyen los *filtros pasatodo* que, sin alterar la amplitud, modifican la fase.

Hay diversas clasificaciones de los filtros. Cuando la señal es una magnitud eléctrica (Corriente o tensión), es un *filtro eléctrico*. Existen también *filtros mecánicos*, *filtros acústicos*, *filtros ópticos*, etc. [10]

Otra clasificación es en *filtros lineales* y *filtros no lineales* según que su comportamiento pueda o no modelarse matemáticamente con ecuaciones lineales. Un ejemplo de filtro no lineal es un comparador de tensión. Otro, un rectificador. Otra clasificación es en *filtros analógicos* y *filtros digitales*. Los filtros analógicos son aquellos en los cuales la señal puede tomar cualquier valor dentro de un intervalo, y los digitales corresponden al caso en que la señal toma sólo valores discretos. También pueden clasificarse en *filtros continuos* y *filtros discretos* o *muestreados*, según que la señal se considere en todo instante o en instantes discretos. Dado que los filtros digitales en la práctica son siempre muestreados, el nombre “filtro digital” se refiere habitualmente a filtros discretos digitales.

Sin embargo, existen filtros discretos no digitales, como los filtros de capacidades conmutadas.

Finalmente, los filtros también pueden clasificarse en *filtros activos* o *filtros pasivos* según empleen o no fuentes controladas (elementos activos, tales como amplificadores y sus derivados). Los filtros eléctricos pasivos se implementan en general con inductores y capacitores. Dado que los inductores son elementos, voluminosos, pesados y costosos, el empleo de filtros pasivos es poco conveniente excepto en frecuencias bastante altas. Los inductores pueden eliminarse mediante el uso de amplificadores y técnicas de retroalimentación.

En lo que sigue nos ocuparemos de los *filtros eléctricos, analógicos, lineales y activos*. Comenzaremos por los filtros continuos y luego daremos nociones de aplicación de un tipo particular de filtros discretos: los de capacidades conmutadas [10].

3.2 Características de un filtro

Los dos tipos principales de filtros armónicos normalmente empleados son: Filtro en derivación y Filtro en serie. El filtro en derivación tiene una baja impedancia a su frecuencia de sintonía, además, puede sintonizarse a una o más frecuencias discretas o sobre un ancho de banda de frecuencias. El filtro serie es de bloqueo y tiene una alta impedancia a su frecuencia de sintonía. La fig. 18 muestra la composición de estos dos tipos.

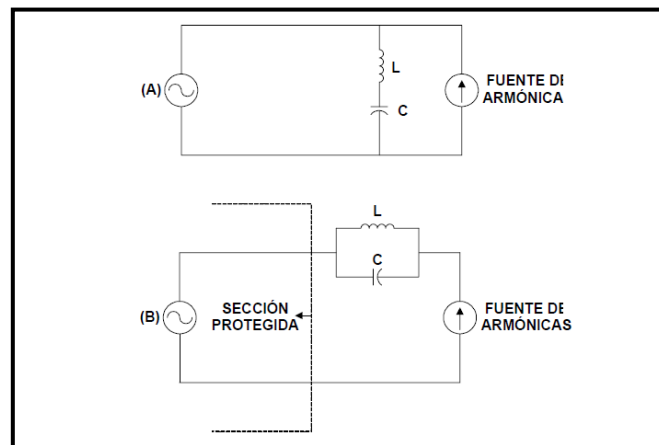


Fig. 18 (A) filtro en derivación; (B) filtro de bloqueo o serie.

Un tipo particular de filtro de bloqueo es el reactor de alisamiento usado en el sistema de transmisión HVDC. Éste no es sintonizado a una frecuencia particular ya que es un solo elemento inductivo. Sin embargo, actúa como una alta impedancia a las armónicas del lado de corriente directa CD y también actúa como alisador del pico de la onda de CD, estableciendo una corriente directa continua.

El enlace de CD de los controladores de velocidad también usa un reactor de alisamiento para el mismo propósito.

3.3 Tipo de Filtros

3.3.1 Tipo de Filtros Pasivos

Los filtros pasivos son los más comúnmente usados en la industria. Como se ilustra en la figura 19, se pueden clasificar como:

- Filtros sintonizados
- Filtros pasa altas o pasa banda (primero, segundo y tercer orden)

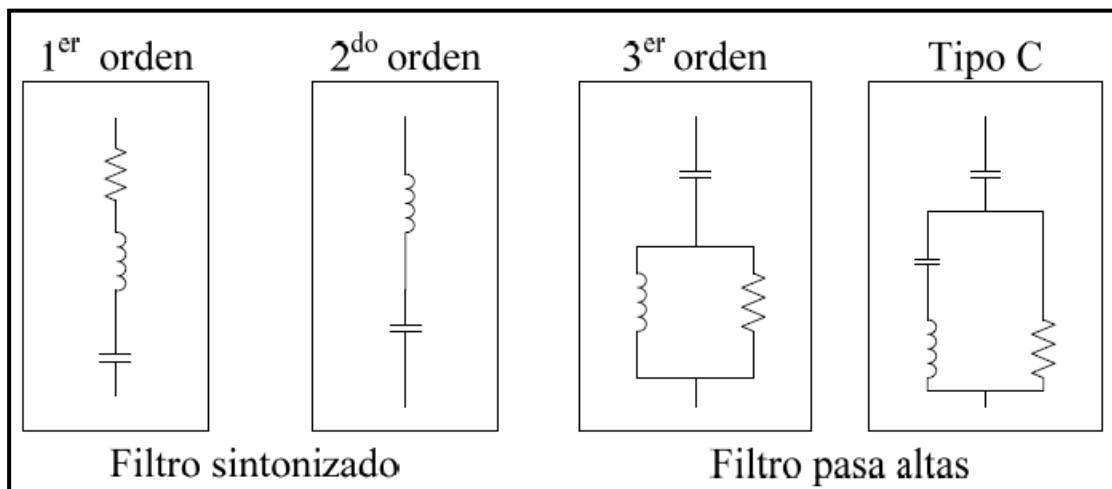


Fig. 19 Diagrama eléctrico de filtros pasivos.

El filtro pasivo es un filtro que se sintoniza para una armónica en especial, o un rango determinado. Los filtros mostrados en la figura 20 son los más utilizados en los sistemas

eléctricos por su bajo costo y fácil instalación, aunque en algunos casos trae consigo problemas de resonancia.

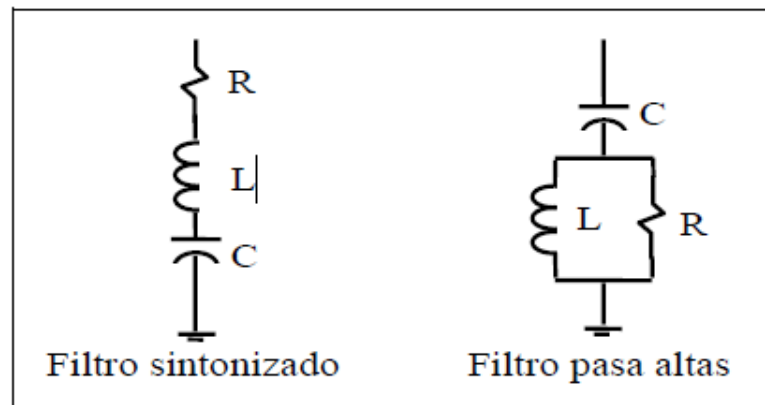


Fig. 20 Filtros pasivos en paralelo con la red.

El filtro lo que hace es presentar una impedancia baja a una corriente de una frecuencia determinada, esto significa que los elementos del filtro entran en resonancia serie, ocasionando la circulación de esta corriente. De esta manera, a partir de un valor del banco de capacitores se obtiene en las ecuaciones 12 y 13 el valor del reactor del filtro:

$$X_{cap} = \frac{KV^2}{MVAR_{cap}} \quad (12)$$

$$X_{reac} = \frac{X_{cap}}{h^2} \quad (13)$$

Donde h es la armónica a la cual está sintonizado el filtro; por tanto, es la corriente que se quiere drenar.

El filtro sintonizado es utilizado para eliminar en forma individual las armónicas más bajas como la 3^a, 5^a y 7^a. En cambio, el filtro pasa altas es utilizado para eliminar un rango de armónicas las cuales tienen un valor pequeño de corriente, por lo general son usados para eliminar de la armónica 11^a en adelante.



3.3.2 FILTRO SINTONIZADO

Probablemente es el filtro armónico más común en aplicaciones industriales, el filtro pasivo presenta muy baja impedancia al cambio de frecuencia, a través de la cual toda la corriente de la frecuencia particular será derivada. De esta manera, el diseño del filtro pasivo debe tomar en cuenta el informe del crecimiento esperado de las fuentes de corriente armónica o la reconfiguración de la carga porque puede de otra manera ser expuesto a sobrecarga, la cual puede rápidamente desarrollar un sobrecalentamiento extremo interno y daño térmico. El diseño de un filtro pasivo requiere un conocimiento preciso de la carga de producción armónica y del sistema de potencia. Una gran distribución de la simulación del trabajo es frecuentemente requerida para probar el desempeño bajo condiciones de variación de carga o cambios en la topología de la red. Los filtros pasivos siempre proveen compensación reactiva determinada por la capacidad y la tensión usada en el banco de capacitores. En hecho pueden ser diseñados para el doble objetivo de provisión de acción filtradora y compensación del factor de potencia al nivel deseado. Si más de un filtro es usado –por ejemplo, paquetes de ramales de 5°, 7° y 11° orden- será importante recordar que todos les proveerán un cierto amontonamiento de compensación reactiva.

Este filtro es una combinación serie de una inductancia y una capacitancia. En realidad, en la ausencia de un resistor diseñado físicamente, estará siempre una resistencia serie, la cual es la resistencia intrínseca del reactor serie, algunas veces usado como un punto para evitar sobrecalentamiento del filtro. Todas las corrientes armónicas cuya frecuencia coincide con la del filtro encontrarán un camino de baja impedancia a través del filtro. La frecuencia resonante de este filtro puede ser expresada mediante la siguiente expresión:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (14)$$

Donde:

f_0 =frecuencia resonante en Hertz

L =inductancia del filtro en Henrys

C =capacitancia del filtro en Farads

3.3.3. FILTRO ACTIVO TIPO PARALELO O DE CORRIENTE

Estos filtros activos tienen la capacidad de reducir las corrientes armónicas demandadas por las cargas no lineales y compensar el factor de potencia de la carga, de tal forma que la corriente requerida por el conjunto carga más filtro se comporte como una resistencia ideal para el sistema eléctrico [11].

Su principio de operación se basa en la inyección de la corriente reactiva requerida por la carga no lineal. De esta forma, el sistema de potencia solo aporta la componente fundamental de corriente y en fase con la respectiva tensión fase-neutro. Estos filtros activos operan adecuadamente frente a cargas del tipo inductivos, es decir, que se comporten como fuente de corriente. Una condición para tener una mayor eficiencia en la compensación de la corriente reactiva es mantener una impedancia de carga mayor a la impedancia de línea [12]. La figura 21 muestra la configuración de un sistema con este filtro activo.

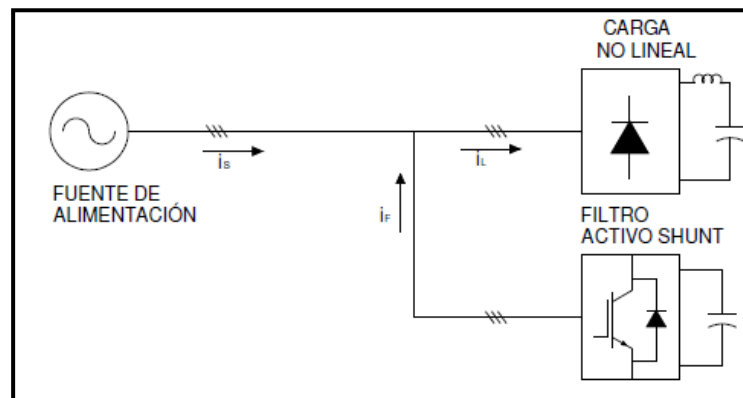


Fig. 21 Esquema de filtro activo de corriente.

3.3.4 FILTROS ACTIVOS HÍBRIDOS

Estos filtros son arreglos que combinan las características de los filtros activos y filtros pasivos. El propósito principal de estos arreglos es reducir costos iniciales y mejorar su eficiencia. Los arreglos que se pueden tener en estos filtros son:

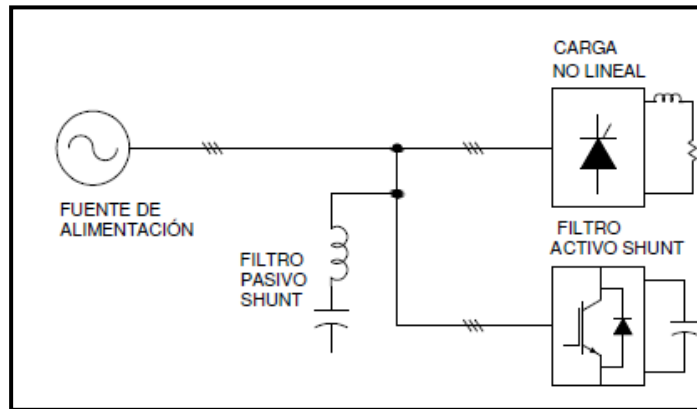


Fig.22 Filtro activo paralelo-filtro pasivo paralelo.

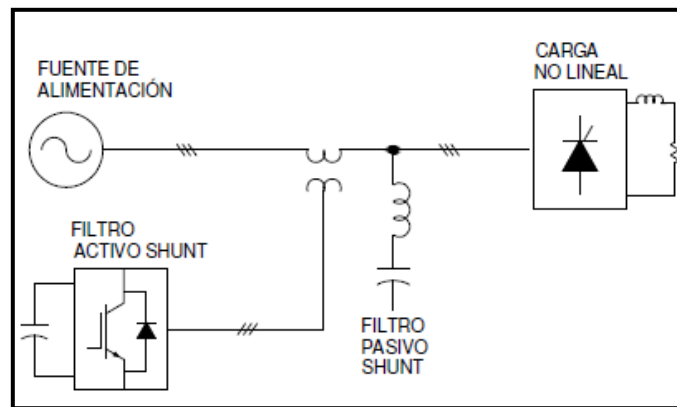


Fig. 23 Filtro activo serie-filtro paralelo.

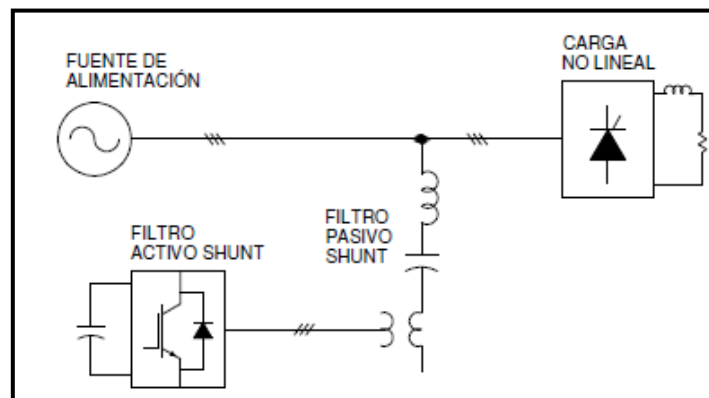


Fig. 24 Filtro activo serie-filtro pasivo paralelo.



Capítulo 4

Metodología Barrido Progresivo- Regresivo Armónico

En esta tesis se describe un método de flujo de potencia para la resolución de las redes de distribución con contenido armónico. Este método tiene excelentes características de convergencia y es muy robusto. En un programa de ordenador la aplicación de este esquema de solución de flujo de potencia se ha desarrollado y aplicado con éxito a redes de distribución prácticos con estructura radial. El método se aplica a la solución de representaciones trifásicas de la red.

La técnica de flujo de potencia de Gauss-Seidel, otro método de flujo de potencia clásico, aunque muy robusto, ha demostrado ser extremadamente ineficiente en la solución de los sistemas de energía de gran tamaño. Las redes de distribución, debido a su amplio rango de valores de resistencias y reactancias y estructura radial, entran en la categoría de sistemas de energía mal condicionadas para el genérico de Newton-Raphson y Newton -Raphson desacoplado.

En este trabajo de tesis se utiliza el método de Barrido para la solución de las redes de distribución. Los estudios han demostrado que, por lo general, sólo se requirieron unas pocas iteraciones para la solución de redes de distribución utilizando esta técnica de solución de flujo de potencia.

El método de solución utilizada para redes de distribución radiales se basa en la aplicación directa de la Ley de Voltajes de Kirchhoff (LVK) y la Ley de Corrientes de Kirchhoff LCK.

Un enfoque orientado a la rama usando un esquema de numeración rama eficiente para mejorar el rendimiento numérico del método de solución, es utilizado. Lo primero que describen este esquema de numeración de rama es enumerar cada nodo de la red con un índice sin importar que el nodo sea una sección de línea trifásica, bifásica o

monofásica. Los nodos son numerados de forma ascendente comenzando en el nodo fuente (subestación) y luego se ordena la red radial por capas o niveles, siendo la primera capa o nivel todos los nodos que están a una rama del nodo fuente, y siendo la segunda capa o nivel todos los nodos que están a una rama de la primera capa o nivel (todos los nodos a dos ramas del nodo raíz). Fig. 25 se muestra el ejemplo de una red de 34 nodos.

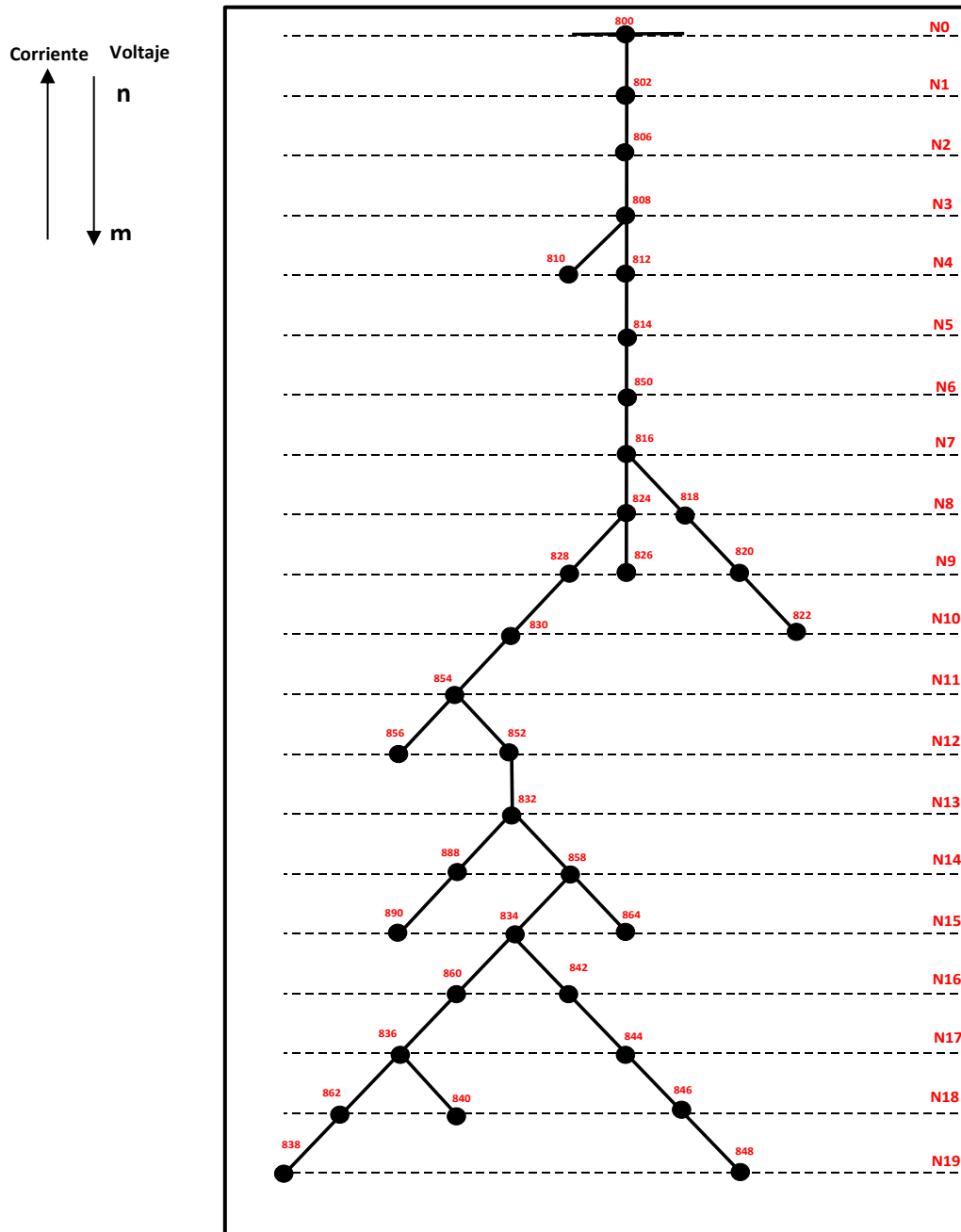


Fig. 25 Ejemplo de las capas de una red de 34 nodos.



La impedancia de un tramo de línea se expresa en una matriz de 3x3, si alguna de las fases de la línea no existe, la correspondiente columna y fila de esta matriz se llenará con ceros. El nodo fuente se considera el nodo compensador con las magnitudes de voltaje y ángulos conocidos.

La técnica de barrido progresivo - regresivo es un método de gran alcance y ha sido ampliamente utilizado en los sistemas de distribución. Las cargas no lineales pueden ser tratadas como fuentes de corriente armónica. Otros dispositivos de derivación, tales como cargas lineales, pueden ser consideradas como impedancias serie o en paralelo con resistencia y reactancia, y se puede expresar como la inyección de corrientes en el análisis armónico. Para cargas de material compuesto, las cargas no lineales y cargas lineales pueden ser tratadas como fuente de corriente armónica en proporción a la especificación de la composición de carga.

4.1 Barrido Progresivo

Se calculan los voltajes nodales con (14), comenzando por el nodo fuente hacia los nodos más alejados de este.

$$[V_{abc}]_m = [A][V_{abc}]_n - [B][I_{abc}]_m \quad (14)$$

Donde:

$[V_{abc}]_m$ = Voltaje en el nodo m , nodos más alejado de la fuente.

$[A]$ = Matriz identidad afectada por Z_{abc} y Y_{abc} del segmento de línea $m - n$.

$[V_{abc}]_n$ = Voltaje en el nodo n , nodo más cercano a la fuente.

$[B]$ = Impedancia de los elementos serie conectados entre los nodos m y n la cual se multiplica por una matriz $[a]^{-1}$

$[I_{abc}]_m$ = Corriente de línea entre el nodo m y n .



Donde:

$$[A] = [a]^{-1} \qquad [B] = [a]^{-1}[b]$$

$$[a] = [U] + \frac{1}{2}[Z_{abc}][Y_{abc}] \qquad [U] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$[b] = [Z_{abc}]$$

4.2 Barrido Regresivo

A partir de los nodos del último nivel y moviéndose hacia el nodo raíz, la corriente $[I_{abc}]_n$ ec. (15), que es la corriente que va del nodo m al nodo n se calcula como:

$$[I_{abc}]_n = [c][V_{abc}]_m + [d][I_{abc}]_m \qquad (15)$$

Donde:

$$[c] = [Y_{abc}] + \frac{1}{4}[Y_{abc}][Z_{abc}][Y_{abc}] \quad [c] = \text{capacitancia del segmento de línea } n - m.$$

$$[d] = [U] + \frac{1}{2}[Z_{abc}][Y_{abc}] \quad [d] = \text{Matriz Identidad.}$$

Para crear la matriz de admitancias $[Y_{abc}]$ el valor de permitividad deberá estar en $\mu F/\text{milla}$, los coeficientes de potencial propio y mutuo se definen en (16) y (17) respectivamente:

$$\hat{P}_{ii} = 11.17689 \ln \frac{S_{ii}}{RD_i} \quad \mu F / \text{milla} \qquad (16)$$

$$\hat{P}_{ij} = 11.17689 \ln \frac{S_{ij}}{D_{ij}} \quad \mu F / \text{milla} \qquad (17)$$

Donde:

S_{ii} = Distancia entre el conductor i y su imagen i' en pies.

S_{ij} = Distancia entre el conductor i e imagen del conductor j en pies

D_{ij} = Distancia entre el conductor i y el conductor j en pies.

R_{Di} = Radio del conductor i en pies.

Las distancias entre conductor $i - j$ se pueden tomar como la distancia entre $a - b$, $b - c$ o $c - a$ en la figura 26, también entiéndase que el conductor i y su imagen i' pueden representarse como $a - a'$, $b - b'$ o $c - c'$

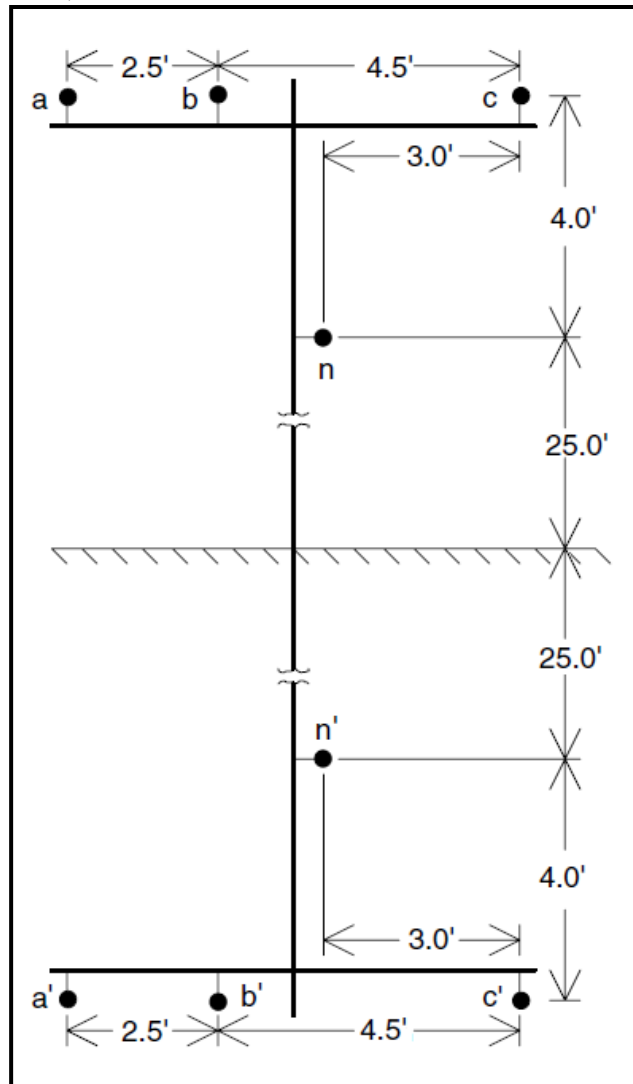


Fig. 26 Distancias entre conductores y sus imágenes.

Con (16) y (17) se construye la matriz primitiva dada en (18)



$$[\hat{P}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} \hat{P}_{aa} & \hat{P}_{ab} & \hat{P}_{ac} & \cdot & \hat{P}_{an} \\ \hat{P}_{ba} & \hat{P}_{bb} & \hat{P}_{bc} & \cdot & \hat{P}_{bn} \\ \hat{P}_{ca} & \hat{P}_{cb} & \hat{P}_{cc} & \cdot & \hat{P}_{cn} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \hat{P}_{na} & \hat{P}_{nb} & \hat{P}_{nc} & \cdot & \hat{P}_{nn} \end{bmatrix} \quad (18)$$

La matriz en (18) puede ser particionada como en (19).

$$[\hat{P}_{primitiva}] = \begin{bmatrix} [\hat{P}_{ij}] & [\hat{P}_{in}] \\ [\hat{P}_{nj}] & [\hat{P}_{nm}] \end{bmatrix} \quad (19)$$

Debido a que el conductor neutro está aterrizado la matriz puede reducirse usando la reducción de Kron a una matriz de coeficientes de potencial de fase de n fases x n fases con (20):

$$[P_{abc}] = [\hat{P}_{ij}] - [\hat{P}_{in}] [\hat{P}_{nn}]^{-1} [\hat{P}_{nj}] \quad (20)$$

La inversa de la matriz de coeficientes de potencial dará la matriz de capacitancias, ec. (21) de n fases x n fases:

$$[C_{abc}] = [P_{abc}]^{-1} \quad (21)$$

Despreciando la conductancia en derivación, la matriz de admitancias en derivación está dada por:

$$[y_{abc}] = 0 + j\omega [C_{abc}] \quad \mu S / milla \quad (22)$$

Donde

$$\omega = 2\pi f = 376.9911 Hz \quad (23)$$

En (23) f representa la frecuencia que varía en múltiplos de 60 Hz para poder representar la línea en el espectro armónico.

Para obtener la matriz de impedancias de línea $[Z_{abc}]$ son calculadas con (24) y (25) en la que se expresan las ecuaciones modificadas de Carson's en función de la frecuencia [13].



$$Z_{ii} = r_i + 0.00158836 * f + j0.00202237 * f \left(\ln \frac{1}{GMR_i} + 7.6786 + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \right) \quad (24)$$

$$Z_{ij} = 0.00158836 * f + j0.00202237 * f \left(\ln \frac{1}{D_{ij}} + 7.6786 + \frac{1}{2} \ln \frac{\rho}{f} \right) \quad (25)$$

Donde:

f = frecuencia múltiplos de 60Hz.

ρ = Resistividad de la tierra = 100 Ohm/metro

Al igual que en (23), f varia en múltiplos de 60 Hz para poder representar la línea en el espectro armónico.

La matriz primitiva estaría formada por el número de armónicas por el número de fases. En un sistema de 4 hilos como el mostrado en la Fig.26 para la frecuencia fundamental quedaría una matriz de 4 x 4 y para un armónico de orden 3 sería de 12 x 12.

$$[Z \text{ primitiva}] = \begin{bmatrix} [Z_{ij}] & [Z_{in}] \\ [Z_{nj}] & [Z_{nn}] \end{bmatrix} \quad \Omega/\text{milla} \quad (26)$$

Posteriormente separamos la matriz de impedancias primitivas con el fin de obtener la reducción por Kron [13], como se muestra en (27).

$$[Z \text{ primitiva}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad \Omega/\text{milla} \quad (27)$$

Las impedancias

$$[Z_{ij}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad \Omega/\text{milla} \quad (28)$$

$$[Z_{in}] = \begin{bmatrix} Z_{an} \\ Z_{bn} \\ Z_{cn} \end{bmatrix} \quad \Omega/\text{milla} \quad (29)$$



$$[Z_{nn}] = [Z_{nn}] \quad \Omega/\text{milla} \quad (30)$$

$$[Z_{nj}] = [Z_{na} \quad Z_{nb} \quad Z_{nc}] \quad \Omega/\text{milla} \quad (31)$$

Obteniendo las matrices (28) – (31) se realiza la reducción por Kron con (32).

$$[Z_{abc}] = [Z_{ij}] - [Z_{in}] * [Z_{nn}]^{-1} * [Z_{nj}] \quad (32)$$

De tal manera que para una matriz de impedancia armónica de orden 3 resultaría de dimensión 9x9.

3. Cálculo de error y convergencia

El voltaje calculado del nodo alimentado "V_c" en cada iteración se calcula con la ecuación (33)

$$V_c = [V_m] + [Z_{mn}] * [I_m] \quad (34)$$

El cálculo del error se realiza con la norma de la diferencia del voltaje calculado V_c y el voltaje específico de la fuente V_e ecuación (35)

$$\text{error} = |V_e - V_c| \quad (35)$$

La convergencia se logra cuando el error es menor a una tolerancia deseada.

Capítulo 5

Aplicación del método de Barrido Progresivo-regresivo Armónico

Se implementa la técnica descrita en el capítulo 4 a dos redes de distribución radiales de 8 y 32 nodos con espectro armónico

5.1 Aplicación a red de 8 nodos

El primer estudio de frecuencias armónicas en una red de 8 nodos con la configuración mostrada en la Fig. 27. muestra la numeración de una red radial de 8 nodos y sus niveles.

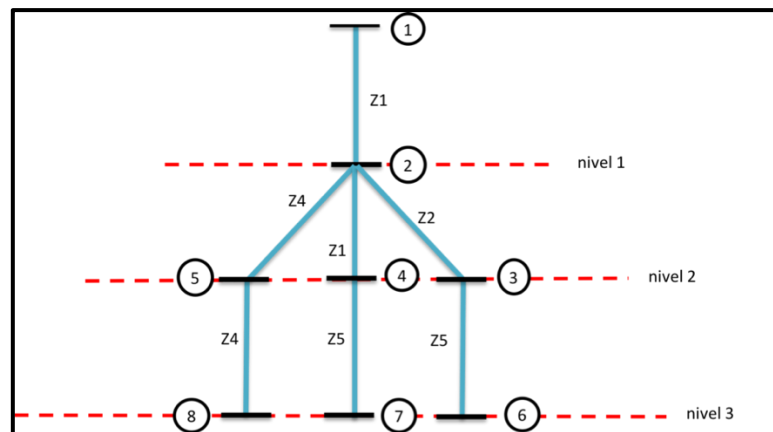


Fig. 27 Ejemplo de las capas de una red de 8 nodos.

Como se mencionó anteriormente la base del cálculo de frecuencias armónicas serán las ecuaciones del método barrido progresivo/regresivo las cuales estarán en función de la N frecuencias seleccionadas para el estudio.

Para el cálculo de frecuencias armónicas se toma la configuración de la línea de distribución trifásica 4F-3H mostrada en la Fig.28.

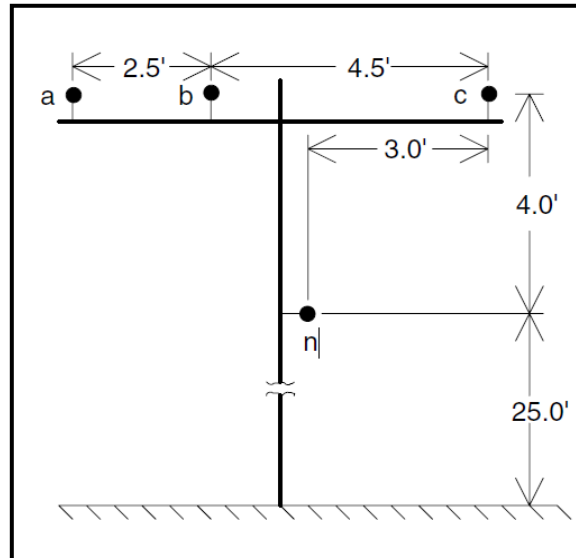


Fig. 28 Línea de distribución 3F-4H.

Se tiene los siguientes datos de tablas [13]:

Para los conductores 336, 400 26/7 ACSR, $GMR = 0.0244$ ft y una resistencia = $0.306 \Omega/milla$.

Para el neutro 4/0 6/1 ACSR, $GMR = 0.00814$ ft y una resistencia = $0.5920 \Omega/milla$

Las impedancias de línea son calculadas implementando las ec. (24) a (32) en la que se expresan las ecuaciones modificadas de Carson's en función de la frecuencia [13].

5.1.1. Cálculo de Corrientes

Para el cálculo de corrientes armónicas se toman algunas consideraciones tales como: las corrientes armónicas aportadas por las cargas no lineales y las corrientes armónicas absorbidas por el banco de capacitores, las cuales estarán en función de la corriente de la frecuencia fundamental, la cual se calcula con (36).

$$I_{carga} = \left(\frac{S_k}{V_k} \right)^* \quad (36)$$



Donde:

S_k , es la demanda de potencia compleja en el nodo k .

V_k , es el voltaje en cada nodo, el cual va del nodo n al nodo m .

El voltaje en el nodo fuente se considera ideal (sin armónicos), las cargas a la frecuencia fundamental en los nodos 2 a 8 son mostradas en la tabla 6.

Tabla 6. Cargas en frecuencia fundamental del sistema de 8 nodos

Nodo	Potencias $P + jQ$ en kW y KVAR		
	Fases		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
2	$17+10j$	$66+38j$	$117+68j$
3	$20+10j$	$15+7j$	$30+9j$
4	$385+220j$	$385+220j$	$385+220j$
5	0	$170+125j$	0
6	$160+110j$	$120+90j$	$120+90j$
7	$100+50j$	$50+25j$	$100+50j$
8	0	$230+132j$	0

Las matrices de impedancia de línea son calculadas con las características de las ecuaciones (24 - 32) con las longitudes mostradas en la Tabla 7.

Tabla 7. Longitudes de las lineas

Unidad	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4
ft	2500	2000	1500	3000

Las corrientes armónicas en la tabla 8, fueron inyectadas en porcentajes de la corriente de carga de la frecuencia fundamental en los nodos 3 y 7 de la figura Fig. 27.

Tabla 8. Corriente Inyectada en % de la frecuencia fundamental

	Orden Armónico				
	3. ^a	5. ^a	7. ^a	9. ^a	11. ^a
% de Corriente inyectada Nodo 3	30	40	40	10	7
% de Corriente inyectada Nodo 7	10	25	30	20	17

En la tabla 9 se muestran los voltajes nodales resultantes del estudio realizado, se ve la propagación de las frecuencias armónicas a lo largo de la red, también se puede observar que en los nodos 5 y 8 solo se cuenta con la fase *b*.

Tabla 9. Resultados de la red de 8 nodos.

Nodos	Fases	Voltaje en los Nodos (Volts)					
		Fundamental	3th	5th	7th	9th	11th
Nodo 1	a	7200.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	b	7200.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	c	7200.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Nodo 2	a	7164.800	2.500	8.900	14.400	11.000	11.200
	b	7145.400	0.600	1.800	2.900	1.900	2.000
	c	7176.900	3.100	10.100	16.000	11.400	11.500
Nodo 3	a	7156.500	3.200	10.300	16.300	11.600	11.800
	b	7141.900	0.900	2.500	3.800	2.200	2.200



	c	7170.900	4.300	12.700	19.600	12.500	12.500
Nodo 4	a	7141.000	4.300	16.000	26.300	21.200	21.800
	b	7130.400	0.800	2.700	4.600	3.500	3.600
	c	7154.700	4.800	17.100	27.700	21.400	21.900
Nodo 5	a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	b	7127.200	0.600	1.800	2.900	1.900	2.000
	c	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Nodo 6	a	7145.000	3.200	10.300	16.300	11.600	11.800
	b	7137.200	0.900	2.500	3.800	2.200	2.200
	c	7163.200	4.300	12.700	19.600	12.500	12.500
Nodo 7	a	7135.900	6.300	24.600	40.600	33.400	34.500
	b	7130.100	1.000	3.900	6.700	5.400	5.700
	c	7147.900	6.900	25.500	41.700	33.400	34.300
Nodo 8	a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	b	7117.400	0.600	1.800	2.900	1.900	2.000
	c	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

El algoritmo se probó con un rango de frecuencia de 60 Hz hasta 660 Hz (11^a armónica). Los resultados calculados en el ejemplo tomaron 4 iteraciones con un criterio de convergencia de 0.00001.

5.2 Aplicación a red de 34 nodos

El segundo caso de aplicación se realiza a una red de 34 nodos mostrada en la siguiente figura 29.

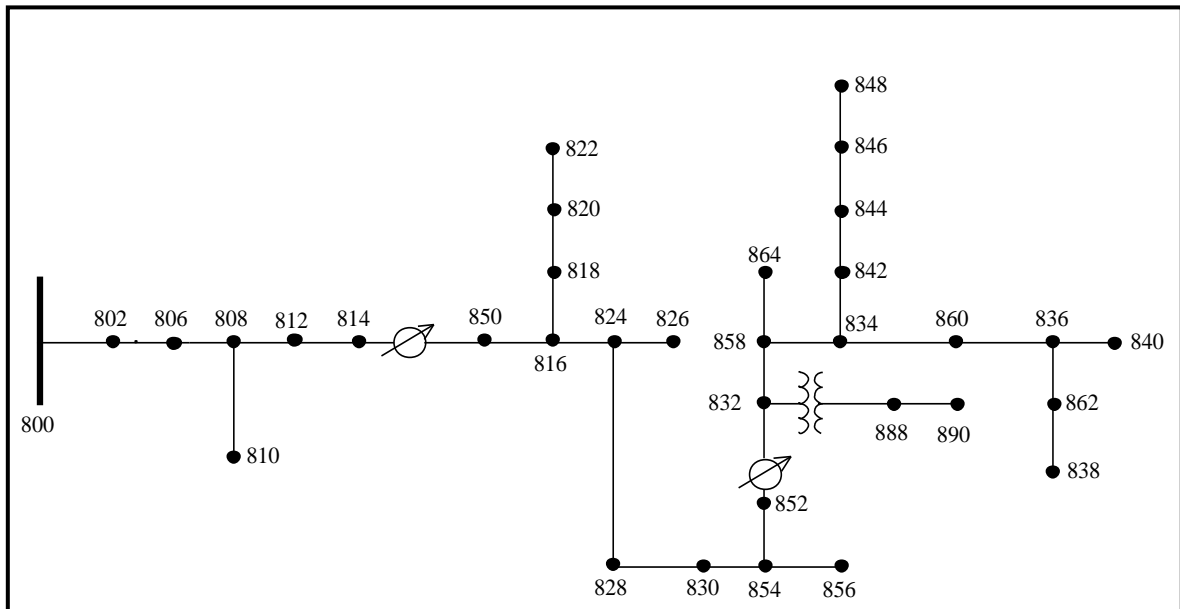


Fig. 29 Red de 34 Nodos.

En la tabla 10 son mostrada las longitudes de línea de la fig. 29. La configuración

Tabla 10. Datos de las líneas de Distribución

Nodo A	Nodo B	Longitud (ft.)	Config.
800	802	2580	300
802	806	1730	300
806	808	32230	300
808	810	5804	303
808	812	37500	300
812	814	29730	300
814	850	10	301
816	818	1710	302
816	824	10210	301
818	820	48150	302
820	822	13740	302
824	826	3030	303
824	828	840	301
828	830	20440	301
830	854	520	301



832	858	4900	301
832	888	1200	300
834	860	2020	301
834	842	280	301
836	840	860	301
836	862	280	301
842	844	1350	301
844	846	3640	301
846	848	530	301
850	816	310	301
852	832	10	301
854	856	23330	303
854	852	36830	301
858	864	1620	303
858	834	5830	301
860	836	2680	301
862	838	4860	304
888	890	10560	300

Como ya se ha mencionado la base del cálculo de frecuencias armónicas serán las ecuaciones del método barrido progresivo/regresivo las cuales estarán en función de la N frecuencias seleccionadas para el estudio. Para el cálculo de frecuencias armónicas se toma la configuración de la línea de distribución trifásica 4F-3H mostrada en la Fig. 28. Para el cálculo de corrientes armónicas se considera el mismo procedimiento mostrado en el apartado 5.1.1

El voltaje en el nodo fuente se considera ideal (sin armónicos), las cargas a la frecuencia fundamental en los nodos S802-S838 son mostradas en la tabla 11.



Tabla 11. Cargas en la red de 34 nodos

Nodo	Potencias P + jQ en kW y KVAR		
	Fases		
	a	b	c
S802=	0	0	0
S806=	0	30+15j	25+14j
S808=	0	0	0
S810=	0	16+8j	0
S812=	0	0	0
S814=	0	0	0
S850=	0	0	0
S816=	0	0	0
S818=	0	0	0
S820=	34+17j	0	0
S822=	135+70j	0	0
S824=	0	5+2j	0
S826=	0	40+20j	0
S828=	0	0	4+2j
S830=	17+8j	10+5j	25+10j
S854=	0	0	0
S856=	0	4+2j	0
S852=	0	0	0
S832=	0	0	0
S888=	0	0	0
S890=	150+75j	150+75j	150+75j
S858=	7+3j	2+1j	6+3j
S864=	2+1j	0	0
S834=	4+2j	15+8j	13+7j
S842=	0	0	0
S844=	144+110j	135+105j	135+105j
S846=	0	25+12j	20+11j
S848=	20+16j	43+27j	20+16j
S860=	36+24j	40+26j	130+71j



S840=	27+16j	31+18j	9+7j
S836=	30+15j	10+6j	42+22j
S862=	0	0	0
S838=	0	28+14j	0

Las corrientes armónicas fueron inyectadas en porcentajes de la corriente de carga, como se muestra en la tabla 12, de la frecuencia fundamental en los nodos 810 al 838, ver Fig. 29.

Tabla 12. Corriente inyectada en % de la frecuencia fundamental

% Corriente	Orden Armónico				
	3.a	5.a	7.a	9.a	11.a
Nodo 810	40	20	40	10	2
Nodo 814	60	40	40	5	2
Nodo 818	40	30	50	10	30
Nodo 822	55	30	40	10	5
Nodo 832	10	25	30	5	5
Nodo 888	20	40	60	10	10
Nodo 890	40	40	60	15	15
Nodo 864	10	20	50	20	5
Nodo 860	20	20	40	10	15
Nodo 840	15	20	30	41	10
Nodo 836	15	25	40	30	20
Nodo 862	15	25	40	30	20
Nodo 838	15	25	40	30	20

Los voltajes armónicos son calculados y mostrados en la tabla 13.

Tabla 13. Resultados de los voltajes en frecuencia armónica

Nodos	Fases	Voltaje en los Nodos (Volts)				
		3th	5th	7th	9th	11th
V800	a	0	0	0	0	0
	b	0	0	0	0	0



	c	0	0	0	0	0
V802	a	16	21	48	24	26
	b	5	10	23	16	15
	c	7	14	36	15	25
V806	a	26	35	80	41	43
	b	9	16	38	26	25
	c	12	23	59	25	41
V808	a	224	296	674	345	368
	b	75	135	325	220	210
	c	100	197	504	209	351
V810	a	0	0	0	0	0
	b	77	136	328	222	210
	c	0	0	0	0	0
V812	a	455	600	1363	695	736
	b	145	264	630	434	418
	c	206	399	1022	423	704
V814	a	638	838	1898	963	1014
	b	200	366	868	599	575
	c	290	559	1425	588	970
V850	a	638	838	1898	963	1014
	b	200	366	869	599	575
	c	290	559	1425	588	970
V816	a	640	841	1904	966	1017
	b	200	367	871	600	577
	c	291	561	1429	589	973
V818	a	647	847	1916	971	1022
	b	0	0	0	0	0
	c	0	0	0	0	0
V820	a	825	1014	2249	1096	1129
	b	0	0	0	0	0
	c	0	0	0	0	0
V822	a	876	1059	2334	1124	1148
	b	0	0	0	0	0
	c	0	0	0	0	0
V824	a	664	885	2009	1024	1079
	b	215	403	955	656	632
	c	322	620	1577	650	1066
V826	a	0	0	0	0	0
	b	215	403	955	656	632
	c	0	0	0	0	0
V828	a	666	889	2017	1029	1084
	b	216	406	962	661	636
	c	325	625	1589	655	1073
V830	a	715	977	2222	1142	1201
	b	247	479	1131	770	742
	c	389	744	1881	774	1253
V854	a	716	979	2227	1144	1204

	b	248	481	1135	773	744
	c	391	747	1889	777	1257
V856	a	0	0	0	0	0
	b	248	482	1139	776	750
	c	0	0	0	0	0
V852	a	802	1134	2579	1332	1393
	b	310	611	1426	949	906
	c	509	959	2405	985	1559
V832	a	802	1134	2579	1332	1393
	b	310	611	1426	949	906
	c	509	959	2405	985	1560
V888	a	802	1134	2579	1332	1393
	b	310	611	1426	949	906
	c	509	959	2405	985	1560
V890	a	822	1167	2649	1356	1422
	b	326	639	1486	969	930
	c	528	992	2475	1008	1588
V858	a	804	1139	2590	1345	1402
	b	311	615	1436	962	915
	c	515	972	2439	1001	1583

Para una mejor visualización de los resultados obtenidos se presentan una serie de figuras basadas en la tabla 13. En la Figura 30 se muestran los voltajes nodales resultantes del estudio realizado a frecuencia fundamental.

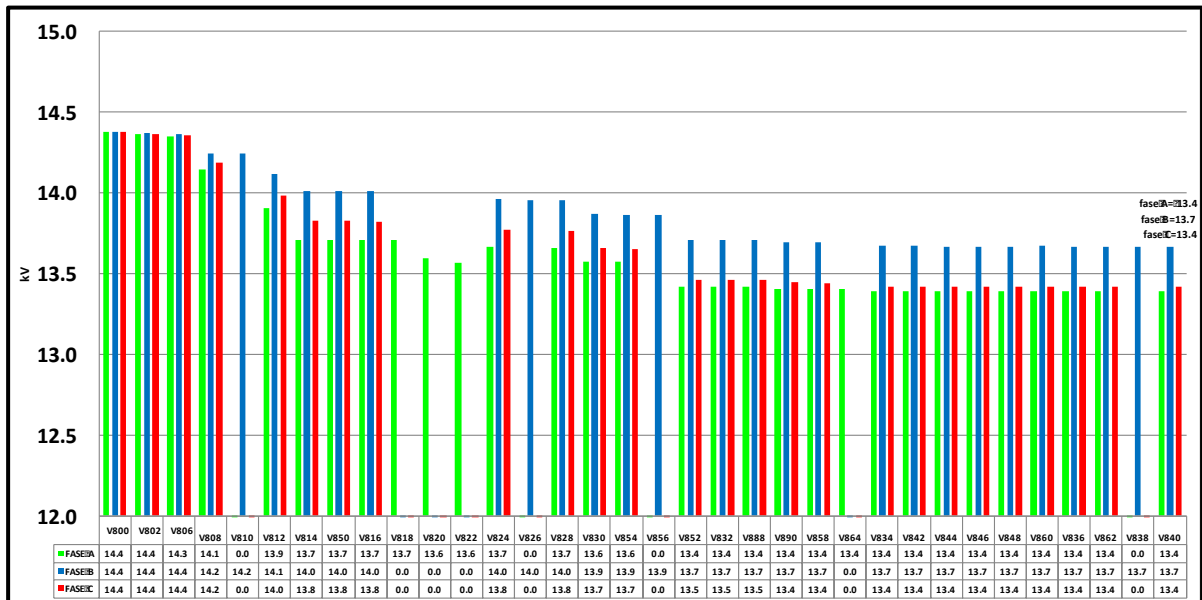


Fig. 30 Respuesta del sistema a frecuencia fundamental.

En la figura 31-32 se puede observar que las armónicas en la 7ª y 9ª (líneas de color azul y negro) es donde se presenta el máximo voltaje, y esto se debe principalmente a las cargas no lineales que puedan existir en una industria. Debido a que en la mayoría de las empresas utilizan variadores de 6 y 8 pulsos estos provocan armónicas en el orden de la 7ª y 9ª, para las armónicas del orden 3ª y 5ª estos representan principalmente al equipo de cómputo e iluminación, provocando que la 3ª armónica circule por el neutro de ahí la importancia de calcular correctamente el calibre de los conductores para evitar el calentamiento por efecto Joule. Es importante que antes de colocar bancos de capacitores se realice un estudio de armónicas para evitar la resonancia en el sistema, por otra parte, la utilización de filtros armónicos es sumamente importante para estos casos, otra de las justificaciones para este caso es la afectación que puede tener el que una industria genere armónicos y estos se propaguen a la red para contaminar a otro usuario, provocando fallas en la red.

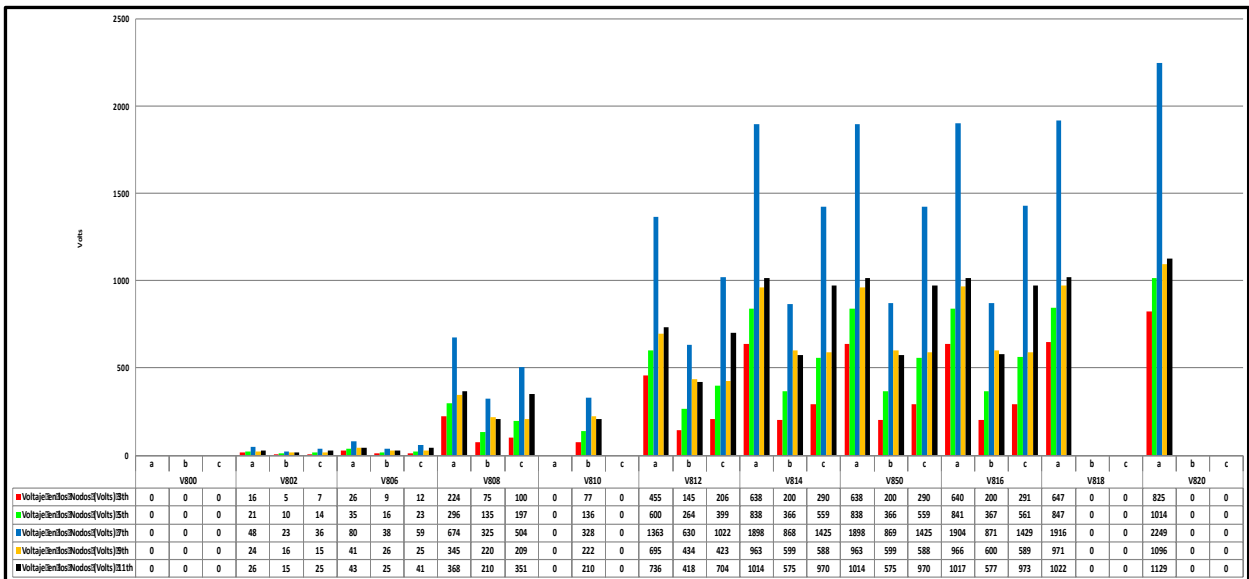


Fig. 31 Voltajes armónicos en nodos 800-820.

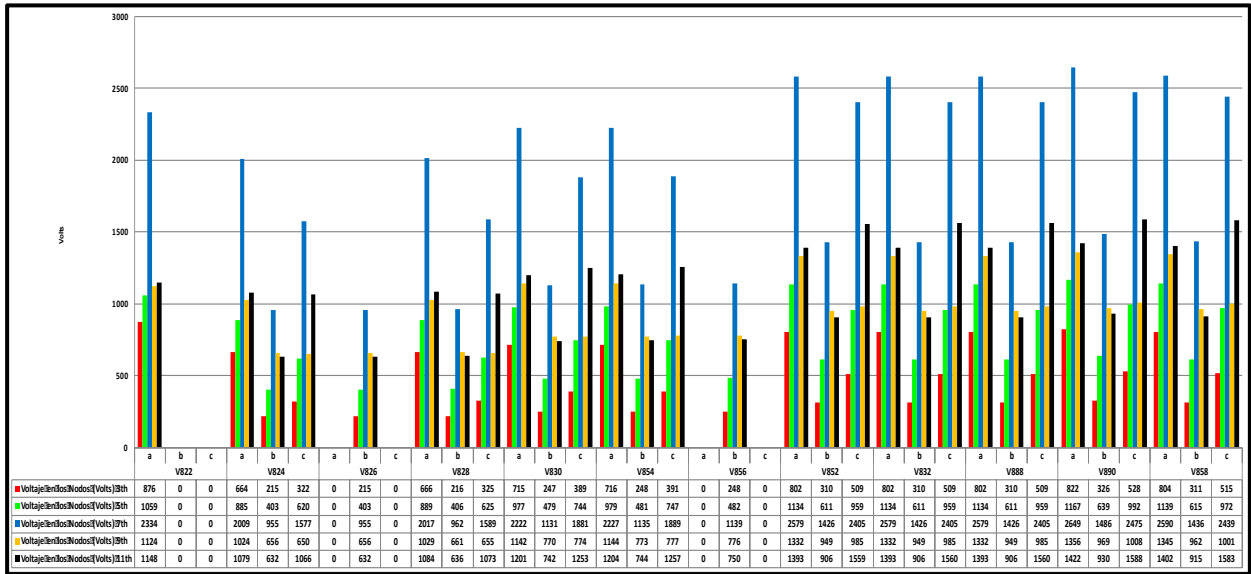


Fig. 32 Voltajes armónicos en nodos 822-858.

El algoritmo se probó con un rango de frecuencia de 60 Hz hasta 660 Hz (11^a armónica). Los resultados calculados en el ejemplo tomaron 6 iteraciones con un criterio de convergencia de 0.00001.



Conclusiones

En este trabajo de tesis se expone la expansión de la técnica de barrido progresivo/regresivo para tomar en consideración frecuencias armónicas. La técnica se comporta adecuadamente logrando una convergencia en 4 y 6 iteraciones para redes de 8 y 32 nodos respectivamente.

El trabajo aquí presentado puede servir para el estudio de frecuencias armónicas de cualquier red eléctrica de distribución, debido a que se exponen las ecuaciones generales para poder representar adecuadamente cualquier elemento.

En la actualidad, debido al alto crecimiento de dispositivos electrónicos se hace más evidente la necesidad de este tipo de estudios para garantizar la calidad de la energía tanto de la red como al usuario final.

Trabajos Futuros

Aunque en el Capítulo 3 se exponen las principales técnicas de mitigación de armónicos, este trabajo de tesis solo se limita a calcular las frecuencias armónicas.

Trabajos Publicados

En el 2014 se presentó a la comunidad científica los primeros resultados de esta tesis (red de 8 nodos) en la Reunión de Verano de Potencia 2014 (RVP-2014). Una copia del trabajo presentado es visto en el Anexo A.



Referencias

- [1] Ley del Servicio Público de Energía Eléctrica.
- [2] G. Enríquez Harper, J.G. Moreno Olmos, artículo IEE, " **Afectación en la Calidad de la Energía Suministrada en un Sistema Industrial, debido a la Presencia de Distorsión Armónica, Normativa y Mitigación**"
- [3] R. Velázquez Sánchez, Boletín IEE, **Metodología para la predicción y solución de la Distorsión Armónica en las redes de distribución.**
- [4] Guía CFE L 0000-45 " **Desviaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente en el suministro y consumo de energía eléctrica**"
- [5] S. Chattopadhyay, M. Mitra Samarjit Sengupta, Electric Power Quality.
- [6] Comisión Federal de Electricidad "Calidad de la Energía CDM0002 C03,"
- [7] E. T. Ramírez, Programa de ahorro de energía " Distorsión Armónica".
- [8] "IEEE 519, **"IEEE Guide for Harmonic Control and Reactive Compensation of Static Power Converters,"** 1981.
- [9] Guía CFE L 0000-70 "**Calidad de la energía: características y límites de las perturbaciones de los parámetros de la energía eléctrica**".
- [10] F. Miraya, "Filtro Activos", Universidad Nacional de Rosario.
- [11] Muhammad H. Rashid, "Power Electronic Handbook", Academic Press, 2001.
- [12] Alarcón R. Gustavo Iván, " Filtro Activo Serie Trifásico para Compensación de Armónicos de Tensión", Tesis de Maestría, CENIDER, Cuernavaca, Morelos, México, 2000.
- [13] J. Hao Teng and C. Yean Chang, "**Backward/Forward Sweep-Based Harmonic Analysis Method for Distribution Systems,**" Paper no. TPWRD-00103-2006

Anexo A

Artículo publicado en la RVP-2014.

DIS-25
PON 156

Calculo de Frecuencias Armónicas en Redes de Distribución

Ing. Ricardo López C.^{1,2}, M. en C. Eric Morales A.²

¹ CFE División Centro Oriente - ² BUAP Posgrado de Ingeniería

¹25 pte 1515, Col. Volcanes, Puebla; Pue., 01(222) 2290581, ricardo.lopez13@cfe.gob.mx

Resumen—En este artículo se presenta un estudio para calcular voltajes y corrientes armónicas en redes de distribución, el análisis se lleva a cabo mediante una versión extendida para N frecuencias del método de barrido progresivo-regresivo. El estudio se realiza en una red radial de 8 nodos donde se introducen inyecciones de corriente armónica como carga en algunos nodos para analizar su penetración-propagación en el sistema.

Palabras clave – Frecuencias Armónicas, barrido progresivo/regresivo, red de distribución.

I. INTRODUCCIÓN

El problema de las armónicas no es un tema nuevo, ya que ha existido desde la creación de los sistemas de potencia. Uno de los primeros documentos que utilizo el termino *armónicas* en el contexto de las Series de Fourier aplicada a sistemas eléctricos de potencia es [1]. En las centrales generadoras se forma una onda de tensión casi perfectamente sinusoidal, sin en cambio, en la mayoría de los casos el voltaje encontrado en niveles de Transmisión y Distribución presenta una distorsión armónica inferior al 1%. Sin embargo, si nos acercamos a la carga la distorsión se incrementa y cerca de algunas cargas la forma de onda de corriente apenas se asemeja a la onda sinusoidal [2]. Los sistemas de distribución son típicamente desbalanceados, por lo tanto, un método de análisis de armónicas con modelos completos trifásicos se requiere para este tipo de redes. Los algoritmos de análisis de armónicas de uso común se pueden dividir en dos categorías. La primera categoría se basa en la técnica de análisis en estado transitorio, tales como el análisis en el dominio de tiempo y análisis Wavelet, [3]-[4]. La segunda categoría es el análisis de estado estable [5]-[6], estos algoritmos se desarrollan sobre la base de programas de flujo de carga y empleando modelos basados en componentes de frecuencia. Los algoritmos basados en estado estacionario son más eficientes que los algoritmos

basados en estado transitorio; por lo tanto, son la mejor opción para el análisis de energía a gran escala debido a la economía del sistema computacional [8]. El método convencional de análisis para armónicas usa el método de Newton-Raphson, la matriz de admitancias, o matriz de impedancias para calcular la penetración de los armónicos en los sistemas eléctricos de potencia. El método de Barrido progresivo/regresivo considera las características especiales de la topología de la red de distribución (configuración radial y/o débilmente mallada), por lo que toma un menor tiempo para la obtención del cálculo de frecuencias armónicas en la red [8].

II. FLUJOS DE CORRIENTE POR EL MÉTODO DE BARRIDO PROGRESIVO/REGRESIVO

Los alimentadores primarios en sistemas de distribución consisten principalmente de líneas aéreas o subterráneas trifásicas, y por lo regular la parte más alejada del alimentador primario se convierten en líneas bifásicas o monofásicas. Este algoritmo de flujos de potencia enumera cada nodo de la red con un índice sin importar que el nodo sea una sección de línea trifásica, bifásica o monofásica. Los nodos son numerados de forma ascendente comenzando en el nodo fuente (subestación) y luego se ordena la red radial por capas o niveles, siendo la primera capa o nivel todos los nodos que están a una rama del nodo fuente, y siendo la segunda capa o nivel todos los nodos que están a una rama de la primera capa o nivel (todos los nodos a dos ramas del nodo raíz). La Fig. 1 muestra la numeración de una red radial de 8 nodos y sus niveles.

RVP-AI/2014 – DIS-25 PONENCIA RECOMENDADA
POR EL COMITÉ DE DISTRIBUCIÓN DEL CA PÍTULO DE
POTENCIA DEL IEEE SECCIÓN MEXICO Y
PRESENTADA EN LA REUNION INTERNACIONAL DE
VERANO, RVP-AI/2014, ACAPULCO GRO.,
DEL 20 AL 26 DE JULIO DEL 2014.

La impedancia de un tramo de línea se expresa en una matriz de 3x3, si alguna de las fases de la línea no existe, la correspondiente columna y fila de esta matriz se llenara con ceros. El nodo fuente se considera el nodo compensador con las magnitudes de voltaje y ángulos conocidos. En este caso de que alguna rama sea un transformador, el voltaje del lado secundario será la razón entre el nodo compensador y la relación de transformación del transformador y todos los nodos que se deriven del lado secundario del transformador tendrán el mismo voltaje secundario. Una vez hecho lo anterior, el método de barrido consiste en 2 pasos principales el barrido progresivo y el barrido regresivo los cuales se describen a continuación:

1. *Barrido Progresivo*

Se calculan los voltajes nodales con (1), comenzando por el nodo fuente hacia los nodos más alejados de este.

$$[V_m] = [A_m] * [V_n] - [Z_{mn}] * [I_m] \quad (1)$$

Donde:

$[V_m]$ = Voltaje en el nodo m , nodos más alejado de la fuente.

$[A_m]$ = Matriz identidad.

$[V_n]$ = Voltaje en el nodo n , nodo más cercano a la fuente.

$[Z_{mn}]$ = Impedancia de los elementos serie (segmentos de línea, transformadores y reguladores de voltaje) conectados entre los nodos m y n .

$[I_m]$ = Corriente de línea entre el nodo m y n .

2. *Barrido Regresivo*

Para un alimentador radial en cada iteración, a partir de los nodos del último nivel y moviéndose hacia el nodo raíz, la corriente $[I_{mn}]$ que es la corriente que va del nodo m al nodo n se calcula como:

$$[I_{mn}] = [C] * [V_m] + [d] [I_n] \quad (2)$$

Donde $[I_{mn}]$ corriente del nodo m a n , $[V_m]$ Voltaje en el nodo m , $[d] = [A_m]$, $[I_n]$ es corriente total entrante al nodo n debido a ramas en capas superiores y $[C]$ representa la matriz de capacitancia, si la línea aérea se clasifica como corta, la capacitancia en derivación es tan pequeña que se puede omitir por completo con una pérdida de exactitud pequeña, en lo que se refiera a la capacitancia, se considera como cortas las líneas de 60Hz de conductor abierto que tienen menos de 80 km de longitud, las líneas de longitud media están entre 80 y 240 km [7], y por ser un caso de distribución estas no rebasan los 80km.

3. *Calculo de error y convergencia*

El voltaje calculado del nodo alimentado " V_c " en cada

iteración se calcula con (3).

$$V_c = [V_m] + [Z_{mn}] * [I_m] \quad (3)$$

El cálculo del error se realiza con la norma de la diferencia del voltaje calculado V_c y el voltaje específico de la fuente V_e con (4).

$$error = |V_e - V_c| \quad (4)$$

La convergencia se logra cuando el error es menor a una tolerancia deseada.

III. CALCULO DE FLUJOS DE CORRIENTES ARMÓNICAS EN REDES DE DISTRIBUCIÓN

Como se menciona anteriormente la base del cálculo de frecuencias armónicas serán las ecuaciones del método barrido progresivo/regresivo las cuales estarán en función de la N frecuencias seleccionadas para el estudio.

Para el cálculo de frecuencias armónicas se toma la configuración de la línea de distribución trifásica 4F-3H mostrada en la Fig.2.

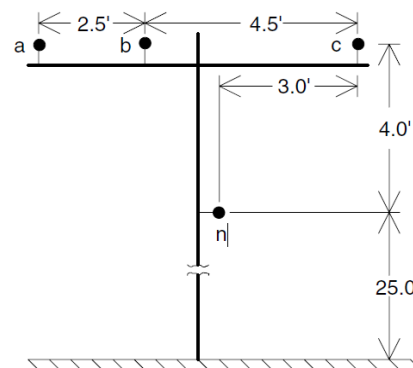


Fig. 2. línea de distribución 4F-3H,[9].

Se tiene los siguientes datos de tablas [9]:

Para los conductores 336, 400 26/7 ACSR, GMR =0.0244 ft y una resistencia= 0.306 Ω /milla

Para el neutro 4/0 6/1 ACSR, GMR=0.00814 ft y una resistencia =0.5920 Ω /milla

Las impedancias de línea son calculadas con (5) y (6) en la que se expresan las ecuaciones modificadas de Carson's en función de la frecuencia [9].

$$Z_{ii} = r_i + 0.00158836 * f + j0.00202237 * f \left(\ln \frac{1}{\rho r_i} + 7.6786 + \frac{1}{2} \ln \frac{L}{r_i} \right) \quad (5)$$

$$Z_{ij} = 0.00158836 * f + j0.00202237 * f \left(\ln \frac{1}{\rho r_{ij}} + 7.6786 + \frac{1}{2} \ln \frac{L}{r_{ij}} \right) \quad (6)$$

Donde:

f = frecuencia múltiplos de 60Hz.

ρ = Resistividad de la tierra = 100 Ohm/metro

La matriz primitiva estaría formada por el número de armónicas x número de fases. Para un sistema de 4 hilos como el mostrado en la Fig.2 a la frecuencia fundamental quedaría una matriz de 4x4 y para un armónico de orden 3 sería de 12 x 12.

$$[Z \text{ primitiva}] = \begin{bmatrix} [Z_{ij}] & [Z_{in}] \\ [Z_{nj}] & [Z_{nn}] \end{bmatrix} \quad \Omega/\text{milla} \quad (7)$$

Posteriormente separamos la matriz de impedancias primitivas con el fin de obtener la reducción por Kron [10], como se muestra de (9) - (12).

$$[Z \text{ primitiva}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & | & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & | & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & | & Z_{cn} \\ \hline Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & | & Z_{nn} \end{bmatrix} \quad \Omega/\text{milla} \quad (8)$$

$$[Z \text{ ij}] = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad \Omega/\text{milla} \quad (9)$$

$$[Z \text{ in}] = \begin{bmatrix} Z_{an} \\ Z_{bn} \\ Z_{cn} \end{bmatrix} \quad \Omega/\text{milla} \quad (10)$$

$$[Z \text{ nn}] = [Z_{nn}] \quad \Omega/\text{milla} \quad (11)$$

$$[Z \text{ nj}] = [Z_{na} \quad Z_{nb} \quad Z_{nc}] \quad \Omega/\text{milla} \quad (12)$$

Obteniendo las matrices (9) – (12) se realiza la reducción por Kron con (13).

$$[Z_{\text{abc}}] = [Z_{ij}] - [Z_{in}] * [Z_{nn}]^{-1} * [Z_{nj}] \quad (13)$$

De tal manera que para una matriz de impedancia armónica de orden 3 resultaría de dimensión 9x9.

A. Cálculo de Corrientes

Para el cálculo de corrientes armónicas se toman algunas consideraciones tales como: las corrientes armónicas aportadas por las cargas no lineales y las corrientes armónicas absorbidas por el banco de capacitores, las cuales estarán en función de la corriente de la frecuencia fundamental, la cual se calcula con:

$$I_{\text{carga}} = \left(\frac{S_k}{V_k} \right)^* \quad (14)$$

Donde:

S_k , es la demanda de potencia compleja en el nodo k .

V_k , es el voltaje en cada nodo, el cual va del nodo n al nodo m .

IV. CASO DE ESTUDIO

Este artículo presenta un estudio de frecuencias armónicas en una red de 8 nodos con la configuración mostrada en la Fig. 1, el voltaje en el nodo fuente se considera ideal (sin armónicos), las cargas a la frecuencia fundamental en los nodos 2 a 8 son mostradas en la tabla I

TABLA I
Cargas en frecuencia fundamental del sistema de 8 nodos

Nodo	Potencias $P + jQ$ en kW y KVAR		
	Fases		
	a	b	c
2	17+10j	66+38j	117+68j
3	20+10j	15+7j	30+9j
4	385+220j	385+220j	385+220j
5	0	170+125j	0
6	160+110j	120+90j	120+90j
7	100+50j	50+25j	100+50j
8	0	230+132j	0

Las matrices de impedancia de línea son calculadas con las características vistas en el capítulo III con las longitudes mostradas en la Tabla II.

TABLA II
Longitud de las líneas

Unidad	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄
ft	2500	2000	1500	3000

Las corrientes armónicas fueron inyectadas en porcentajes de la corriente de carga de la frecuencia fundamental en los nodos 3 y 7 ver Fig. 1

TABLA III
Corriente Inyectada en % de la frecuencia fundamental

	Orden Armónico				
	3. ^a	5. ^a	7. ^a	9. ^a	11. ^a
% de Corriente inyectada Nodo 3	30	40	40	10	7
% de Corriente inyectada Nodo 7	10	25	30	20	17

A. Resultados

En la tabla IV se muestran los voltajes nodales resultantes del estudio realizado, se ve la propagación de las frecuencias armónicas a lo largo de la red, también se puede observar que en los nodos 5 y 8 solo se cuenta con la fase *b*.

TABLA IV
Resultados de la red de 8 nodos.

Nodos	Fases	Voltaje en los Nodos (Volts)					
		Fundamental	3th	5th	7th	9th	11th
Nodo 1	a	7200.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	b	7200.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	c	7200.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Nodo 2	a	7164.800	2.500	8.900	14.400	11.000	11.200
	b	7145.400	0.600	1.800	2.900	1.900	2.000
	c	7176.900	3.100	10.100	16.000	11.400	11.500
Nodo 3	a	7156.500	3.200	10.300	16.300	11.600	11.800
	b	7141.900	0.900	2.500	3.800	2.200	2.200
	c	7170.900	4.300	12.700	19.600	12.500	12.500
Nodo 4	a	7141.000	4.300	16.000	26.300	21.200	21.800
	b	7130.400	0.800	2.700	4.600	3.500	3.600
	c	7154.700	4.800	17.100	27.700	21.400	21.900
Nodo 5	a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	b	7127.200	0.600	1.800	2.900	1.900	2.000
	c	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Nodo 6	a	7145.000	3.200	10.300	16.300	11.600	11.800
	b	7137.200	0.900	2.500	3.800	2.200	2.200
	c	7163.200	4.300	12.700	19.600	12.500	12.500
Nodo 7	a	7135.900	6.300	24.600	40.600	33.400	34.500
	b	7130.100	1.000	3.900	6.700	5.400	5.700
	c	7147.900	6.900	25.500	41.700	33.400	34.300
Nodo 8	a	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	b	7117.400	0.600	1.800	2.900	1.900	2.000
	c	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

V. CONCLUSIONES

El cálculo de frecuencias armónicas basado en el método barrido progresivo/regresivo tomo 4 iteraciones con un criterio de convergencia de 0.00001 mostrando una rápida convergencia.

El algoritmo se probó con un rango de frecuencia de 60 Hz hasta 660 Hz (11^a armónica). De la tabla IV, se puede observar que en el nodo 7 -fases *c* - 7^a armónica se tiene la mayor magnitud de voltaje armónico del sistema, debido a la inyección de corriente armónica superior al 40%, lo que significa que la penetración-propagación afecto a los nodos cercanos a él.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la CFE División Centro Oriente y la Facultad de Ingeniería de la BUAP por el apoyo otorgado para presentar este artículo en el RVP -AL/2014.

VII. REFERENCIAS

- [1] Emmanuel A.E. "Harmonics in early year of electrical engineering: a brief review of events people and documents", in Proc. IEEE ICHQP'2000, Oct. 2000, pp.1-7
- [2] Dugan Robert C., McGranaghan Mark F., Santoso Surya, Beaty H.Wayne. Electric Power System Quality', Second Edition McGraw-Hill, 2003.
- [3] S. Herraiz, L. Sainz, and J. Clua, "Review of harmonic load flow formulations," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 18, no. 3, pp. 1079-1087, Jul. 2003.
- [4] T. Zheng, E. B. Makram, and A. A. Girgis, "Power system transient and harmonic studies using wavelet transform," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 14, no. 4, pp. 1461-1468, Oct. 1999.
- [5] D. Xia and G. T. Heydt, "Harmonic power study part I - Formulation and solution," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-101, no. 6, pp. 1257-1265, Jun. 1982.
- [6] Y. H. Yan, C. S. Chen, C. S. Moo, and C. T. Hsu, "Harmonic analysis for industrial customers," *IEEE Trans. Ind. Appl. Soc.*, vol. 30, no. 2, [1] pp. 462-468, Mar./Apr. 1994.
- [7] W. Stevenson Jr, *Análisis de Sistemas de Potencia*, Mc Graw Hill, p. 183.
- [8] J. Hao Teng and C. Yean Chang, "Backward/Forward Sweep-Based Harmonic Analysis Method for Distribution Systems," Paper no. TPWRD-00103-2006
- [9] W. H. Kersting, *Distribution System Modeling and Analysis*, segunda edición, Las Cruces, New Mexico, p. 87 y 304.
- [10] Kron, G., *Tensorial analysis of integrated transmission system. I. The six basic reference frames.*, *AIEE Transactions*, 71, 1952.

VIII. BIOGRAFÍAS



Ing. Ricardo López Castillo. Obtuvo el Título de Ingeniero Mecánico y Eléctrico por la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla en el año 2010. Actualmente está cursando la Maestría en Sistemas Eléctricos de Potencia en la misma casa de Estudios, se desempeña como Supervisor de la División Centro Oriente (CFE). Áreas de interés principal: modelado, simulaciones y diseño para el análisis de Distorsión Armónica en las Redes de Distribución.



M. en C. Eric Morales recibió el grado de ingeniero electricista del Instituto Tecnológico de Orizaba Ver. En 2006; el grado de Maestro en Ciencias del Instituto Politécnico Nacional en 2009; Actualmente es estudiante de doctorado en el Centro de Investigación y estudios avanzados del IPN (CINVESTAV) y profesor en la Facultad de Ingeniería de la BUAP. Sus áreas de interés son análisis de calidad de la energía y modelado-operación de redes de distribución.



Anexo B

A continuación se muestra el archivo main, es en este donde se desarrolla el barrido progresivo-regresivo, para esto usa los archivos valores iniciales y datos_34n.

```
creamatriz_a_b_c_d_A_B_arm
crea_MatrizV_arm
crea_M_Inodo_arm
barrido_prog_regr

figure (1)
semilogy([1:length(V_error)],V_error, '*k')
title('Patron de Convergencia')
legend('34 nodos')
ylabel('||Vk+1 - Vk||')
xlabel('No. Iteration')

iter_max=10;
tol=0.00001;
Error=1;
iter=0;

while Error>tol && iter_max>iter

% Barrido Progresivo

V802=A800*V800-B800*I_nodo802;
A800;
V800;
B800;
I_nodo802;

V806=A802*V802-B802*I_nodo806;
V808=A806*V806-B806*I_nodo808;
V810=A808_810*V808-B808_810*I_nodo810;
V812=A808_812*V808-B808_812*I_nodo812;
V814=A812*V812-B812*I_nodo814;
V850=A814*V814-B814*I_nodo850;
V816=A850*V850-B850*I_nodo816;
V818=A816_818*V816-B816_818*I_nodo818;
V820=A818*V818-B818*I_nodo820;
V822=A820*V820-B820*I_nodo822;
V824=A816_824*V816-B816_824*I_nodo824;
V826=A824_826*V824-B824_826*I_nodo826;
V828=A824_828*V824-B824_828*I_nodo828;
V830=A828*V828-B828*I_nodo830;
V854=A830*V830-B830*I_nodo854;
```



```
V856=A854_856*V854-B854_856*I_nodo856;  
V852=A854_852*V854-B854_852*I_nodo852;  
V832=A852*V852-B852*I_nodo832;  
V888=A832_888*V832-B832_888*I_nodo888;  
V890=A890_888*V888-B890_888*I_nodo890;  
V858=A832_858*V832-B832_858*I_nodo858;  
V864=A858_864*V858-B858_864*I_nodo864;  
V834=A858_834*V858-B858_834*I_nodo834;  
V842=A834_842*V834-B834_842*I_nodo842;  
V844=A842*V842-B842*I_nodo844;  
V846=A844*V844-B844*I_nodo846;  
V848=A846*V846-B846*I_nodo848;  
V860=A834_860*V834-B834_860*I_nodo860;  
V836=A860*V860-B860*I_nodo836;  
V862=A836_862*V836-B836_862*I_nodo862;  
V838=A838_862*V862-B838_862*I_nodo838;  
V840=A836_840*V836-B836_840*I_nodo840;
```

%Barrido Regresivo

% capa 19

```
I_carga838(1*Max_armonico+1,1)=conj((S838(2,1)*1000)/V838(Max_armonico+1,1));  
  
for aa=1:length(H_Num838)  
  
I_carga838(H_Num838(aa)+1*Max_armonico838,H_Num838(aa))=I_carga838(1*Max_armonico838+1,1)*H_mag838(aa);  
  
end  
I_nodo838=I_carga838;  
I_carga848(0*Max_armonico+1,1)=conj((S848(1,1)*1000)/V848(0*Max_armonico+1,1))  
;  
I_carga848(1*Max_armonico+1,1)=conj((S848(2,1)*1000)/V848(1*Max_armonico+1,1))  
;  
I_carga848(2*Max_armonico+1,1)=conj((S848(3,1)*1000)/V848(2*Max_armonico+1,1))  
;  
  
for aa=1:length(H_Num848)  
  
I_carga848(H_Num848(aa)+0*Max_armonico848,H_Num848(aa))=I_carga848(0*Max_armonico848+1,1)*H_mag848(aa);  
  
I_carga848(H_Num848(aa)+1*Max_armonico848,H_Num848(aa))=I_carga848(1*Max_armonico848+1,1)*H_mag848(aa);  
I_carga848(H_Num848(aa)+2*Max_armonico848,H_Num848(aa))=I_carga848(2*Max_armonico848+1,1)*H_mag848(aa);  
  
end  
  
I_nodo848=I_carga848;
```



% Capa 18

```
I_rama862=C862*V838+d838_862*I_nodo838;
I_nodo862=I_carga862+I_rama862;
I_rama846=C846*V848+d846*I_nodo848;
I_carga846(0*Max_armonico+1,1)=conj((S846(1,1)*1000)/V846(0*Max_armonico+1,1))
;
I_carga846(1*Max_armonico+1,1)=conj((S846(2,1)*1000)/V846(1*Max_armonico+1,1))
;
I_carga846(2*Max_armonico+1,1)=conj((S846(3,1)*1000)/V846(2*Max_armonico+1,1))
;
    for aa=1:length(H_Num846)

I_carga846(H_Num846(aa)+0*Max_armonico846,H_Num846(aa))=I_carga846(0*Max_armonico846+1,1)*H_mag846(aa);
I_carga846(H_Num846(aa)+1*Max_armonico846,H_Num846(aa))=I_carga846(1*Max_armonico846+1,1)*H_mag846(aa);
I_carga846(H_Num846(aa)+2*Max_armonico846,H_Num846(aa))=I_carga846(2*Max_armonico846+1,1)*H_mag846(aa);

    end
    I_nodo846=I_carga846+I_rama846;

I_carga840(0*Max_armonico+1,1)=conj((S840(1,1)*1000)/V840(0*Max_armonico+1,1))
;
I_carga840(1*Max_armonico+1,1)=conj((S840(2,1)*1000)/V840(1*Max_armonico+1,1))
;
I_carga840(2*Max_armonico+1,1)=conj((S840(3,1)*1000)/V840(2*Max_armonico+1,1))
;

    for aa=1:length(H_Num840)

I_carga840(H_Num840(aa)+0*Max_armonico840,H_Num840(aa))=I_carga840(0*Max_armonico840+1,1)*H_mag840(aa);
I_carga840(H_Num840(aa)+1*Max_armonico840,H_Num840(aa))=I_carga840(1*Max_armonico840+1,1)*H_mag840(aa);
I_carga840(H_Num840(aa)+2*Max_armonico840,H_Num840(aa))=I_carga840(2*Max_armonico840+1,1)*H_mag840(aa);

    end
    I_nodo840=I_carga840;
```

%Capa 17

```
I_rama836_862=C836_862*V862+d836_862*I_nodo862;
I_rama836_840=C836_840*V840+d836_840*I_nodo840;
I_carga836(0*Max_armonico+1,1)=conj((S836(1,1)*1000)/V836(0*Max_armonico+1,1))
;
I_carga836(1*Max_armonico+1,1)=conj((S836(2,1)*1000)/V836(1*Max_armonico+1,1))
;
I_carga836(2*Max_armonico+1,1)=conj((S836(3,1)*1000)/V836(2*Max_armonico+1,1))
;
```



```
for aa=1:length(H_Num836)

I_carga836(H_Num836(aa)+0*Max_armonico836,H_Num836(aa))=I_carga836(0*Max_armonico836+1,1)*H_mag836(aa);

I_carga836(H_Num836(aa)+1*Max_armonico836,H_Num836(aa))=I_carga836(1*Max_armonico836+1,1)*H_mag836(aa);
I_carga836(H_Num836(aa)+2*Max_armonico836,H_Num836(aa))=I_carga836(2*Max_armonico836+1,1)*H_mag836(aa);

end

I_nodo836=I_carga836+I_rama836_862+I_rama836_840;
I_rama844=C844*V846+d844*I_nodo846;
I_carga844(0*Max_armonico+1,1)=conj((S844(1,1)*1000)/V844(0*Max_armonico+1,1))
;
I_carga844(1*Max_armonico+1,1)=conj((S844(2,1)*1000)/V844(1*Max_armonico+1,1))
;
I_carga844(2*Max_armonico+1,1)=conj((S844(3,1)*1000)/V844(2*Max_armonico+1,1))
;

for aa=1:length(H_Num844)

I_carga844(H_Num844(aa)+0*Max_armonico844,H_Num844(aa))=I_carga844(0*Max_armonico844+1,1)*H_mag844(aa);
I_carga844(H_Num844(aa)+1*Max_armonico844,H_Num844(aa))=I_carga844(1*Max_armonico844+1,1)*H_mag844(aa);
I_carga844(H_Num844(aa)+2*Max_armonico844,H_Num844(aa))=I_carga844(2*Max_armonico844+1,1)*H_mag844(aa);

end

I_nodo844=I_carga844+I_rama844;

%capa16

I_rama860=C860*V836+d860*I_nodo836;
I_carga860(0*Max_armonico+1,1)=conj((S860(1,1)*1000)/V860(0*Max_armonico+1,1))
;
I_carga860(1*Max_armonico+1,1)=conj((S860(2,1)*1000)/V860(1*Max_armonico+1,1))
;
I_carga860(2*Max_armonico+1,1)=conj((S860(3,1)*1000)/V860(2*Max_armonico+1,1))
;

for aa=1:length(H_Num860)

I_carga860(H_Num860(aa)+0*Max_armonico860,H_Num860(aa))=I_carga860(0*Max_armonico860+1,1)*H_mag860(aa);
I_carga860(H_Num860(aa)+1*Max_armonico860,H_Num860(aa))=I_carga860(1*Max_armonico860+1,1)*H_mag860(aa);
I_carga860(H_Num860(aa)+2*Max_armonico860,H_Num860(aa))=I_carga860(2*Max_armonico860+1,1)*H_mag860(aa);

end

I_nodo860=I_carga860+I_rama860;
I_rama842=C842*V844+d842*I_nodo844;
I_nodo842=I_carga842+I_rama842;
```



%capa 15

```
I_rama834_842=C834_842*V842+d834_842*I_nodo842;
I_rama834_860=C834_860*V860+d834_860*I_nodo860;
I_carga834(0*Max_armonico+1,1)=conj((S834(1,1)*1000)/V834(0*Max_armonico+1,1))
;
I_carga834(1*Max_armonico+1,1)=conj((S834(2,1)*1000)/V834(1*Max_armonico+1,1))
;
I_carga834(2*Max_armonico+1,1)=conj((S834(3,1)*1000)/V834(2*Max_armonico+1,1))
;
    for aa=1:length(H_Num834)

I_carga834(H_Num834(aa)+0*Max_armonico834,H_Num834(aa))=I_carga834(0*Max_armonico834+1,1)*H_mag834(aa);
I_carga834(H_Num834(aa)+1*Max_armonico834,H_Num834(aa))=I_carga834(1*Max_armonico834+1,1)*H_mag834(aa);
I_carga834(H_Num834(aa)+2*Max_armonico834,H_Num834(aa))=I_carga834(2*Max_armonico834+1,1)*H_mag834(aa);

    end

I_nodo834=I_rama834_842+I_rama834_860+I_carga834;

I_carga864(0*Max_armonico+1,1)=conj((S864(1,1)*1000)/V864(0*Max_armonico+1,1))
;
    for aa=1:length(H_Num864)

I_carga864(H_Num864(aa)+0*Max_armonico864,H_Num864(aa))=I_carga864(0*Max_armonico864+1,1)*H_mag864(aa);
    end

I_nodo864=I_carga864;
I_carga890(0*Max_armonico+1,1)=conj((S890(1,1)*1000)/V890(0*Max_armonico+1,1))
;
I_carga890(1*Max_armonico+1,1)=conj((S890(2,1)*1000)/V890(1*Max_armonico+1,1))
;
I_carga890(2*Max_armonico+1,1)=conj((S890(3,1)*1000)/V890(2*Max_armonico+1,1))
;
    for aa=1:length(H_Num890)

I_carga890(H_Num890(aa)+0*Max_armonico890,H_Num890(aa))=I_carga890(0*Max_armonico890+1,1)*H_mag890(aa);
I_carga890(H_Num890(aa)+1*Max_armonico890,H_Num890(aa))=I_carga890(1*Max_armonico890+1,1)*H_mag890(aa);
I_carga890(H_Num890(aa)+2*Max_armonico890,H_Num890(aa))=I_carga890(2*Max_armonico890+1,1)*H_mag890(aa);

    end

I_nodo890=I_carga890;
```

%capa 14

```
I_rama888=C888*V890+d890_888*I_nodo890;
I_nodo888=I_carga888+I_rama888;
I_rama858_864=C858_864*V864+d858_864*I_nodo864;
I_rama858_834=C858_834*V834+d858_834*I_nodo834;
I_carga858(0*Max_armonico+1,1)=conj((S858(1,1)*1000)/V858(0*Max_armonico+1,1))
```



```
;
I_carga858(1*Max_armonico+1,1)=conj((S858(2,1)*1000)/V858(1*Max_armonico+1,1))
;
I_carga858(2*Max_armonico+1,1)=conj((S858(3,1)*1000)/V858(2*Max_armonico+1,1))
;

    for aa=1:length(H_Num858)

I_carga858(H_Num858(aa)+0*Max_armonico858,H_Num858(aa))=I_carga858(0*Max_armonico858+1,1)*H_mag858(aa);
I_carga858(H_Num858(aa)+1*Max_armonico858,H_Num858(aa))=I_carga858(1*Max_armonico858+1,1)*H_mag858(aa);

I_carga858(H_Num858(aa)+2*Max_armonico858,H_Num858(aa))=I_carga858(2*Max_armonico858+1,1)*H_mag858(aa);

    end

I_nodo858=I_rama858_864+I_rama858_834+I_carga858;

%capa 13

I_rama832_858=C832_858*V858+d832_858*I_nodo858;
I_rama832_888=C832_888*V888+d832_888*I_nodo888;
I_nodo832=I_rama832_858+I_rama832_888+I_carga832;

%capa 12

I_rama852=C852*V832+d852*I_nodo832;
I_carga852(0*Max_armonico+1,1)=conj((S852(1,1)*1000)/V852(0*Max_armonico+1,1))
;
I_carga852(1*Max_armonico+1,1)=conj((S852(2,1)*1000)/V852(1*Max_armonico+1,1))
;
I_carga852(2*Max_armonico+1,1)=conj((S852(3,1)*1000)/V852(2*Max_armonico+1,1))
;

    for aa=1:length(H_Num852)

I_carga852(H_Num852(aa)+0*Max_armonico852,H_Num852(aa))=I_carga852(0*Max_armonico852+1,1)*H_mag852(aa);
I_carga852(H_Num852(aa)+1*Max_armonico852,H_Num852(aa))=I_carga852(1*Max_armonico852+1,1)*H_mag852(aa);
I_carga852(H_Num852(aa)+2*Max_armonico852,H_Num852(aa))=I_carga852(2*Max_armonico852+1,1)*H_mag852(aa);

    end

I_nodo852=I_carga852+I_rama852;
I_carga856(1*Max_armonico+1,1)=conj((S856(2,1)*1000)/V856(1*Max_armonico+1,1))
;

    for aa=1:length(H_Num856)

I_carga856(H_Num856(aa)+1*Max_armonico856,H_Num856(aa))=I_carga856(1*Max_armonico856+1,1)*H_mag856(aa);
```



```
end
I_nodo856=I_carga856;

%capa 11

I_rama854_852=C854_852*V852+d854_852*I_nodo852;
I_rama854_856=C854_856*V856+d854_856*I_nodo856;
I_nodo854=I_carga854+I_rama854_852+I_rama854_856;

%CAPA 10

I_rama830=C830*V854+d830*I_nodo854;
I_carga830(0*Max_armonico+1,1)=conj((S830(1,1)*1000)/V830(0*Max_armonico+1,1))
;

I_carga830(1*Max_armonico+1,1)=conj((S830(2,1)*1000)/V830(1*Max_armonico+1,1))
;
I_carga830(2*Max_armonico+1,1)=conj((S830(3,1)*1000)/V830(2*Max_armonico+1,1))
;

for aa=1:length(H_Num830)

I_carga830(H_Num830(aa)+0*Max_armonico830,H_Num830(aa))=I_carga830(0*Max_armonico830+1,1)*H_mag830(aa);
I_carga830(H_Num830(aa)+1*Max_armonico830,H_Num830(aa))=I_carga830(1*Max_armonico830+1,1)*H_mag830(aa);
I_carga830(H_Num830(aa)+2*Max_armonico830,H_Num830(aa))=I_carga830(2*Max_armonico830+1,1)*H_mag830(aa);

end

I_nodo830=I_carga830+I_rama830;
I_carga822(0*Max_armonico+1,1)=conj((S822(1,1)*1000)/V822(0*Max_armonico+1,1))
;

for aa=1:length(H_Num822)

I_carga822(H_Num822(aa)+0*Max_armonico822,H_Num822(aa))=I_carga822(0*Max_armonico822+1,1)*H_mag822(aa);

end

I_nodo822=I_carga822;

%CAPA 9

I_rama828=C828*V830+d828*I_nodo830;
I_carga828(0*Max_armonico+1,1)=conj((S828(1,1)*1000)/V828(0*Max_armonico+1,1))
;
I_carga828(1*Max_armonico+1,1)=conj((S828(2,1)*1000)/V828(1*Max_armonico+1,1))
;
I_carga828(2*Max_armonico+1,1)=conj((S828(3,1)*1000)/V828(2*Max_armonico+1,1))
;

for aa=1:length(H_Num828)
```



```
I_carga828(H_Num828(aa)+0*Max_armonico828,H_Num828(aa))=I_carga828(0*Max_armonico828+1,1)*H_mag828(aa);
I_carga828(H_Num828(aa)+1*Max_armonico828,H_Num828(aa))=I_carga828(1*Max_armonico828+1,1)*H_mag828(aa);
I_carga828(H_Num828(aa)+2*Max_armonico828,H_Num828(aa))=I_carga828(2*Max_armonico828+1,1)*H_mag828(aa);

    end
I_nodo828=I_carga828+I_rama828;
I_rama820=C820*V822+d820*I_nodo822;
I_carga820(0*Max_armonico+1,1)=conj((S820(1,1)*1000)/V820(0*Max_armonico+1,1))
;
    for aa=1:length(H_Num820)

I_carga820(H_Num820(aa)+0*Max_armonico820,H_Num820(aa))=I_carga820(0*Max_armonico820+1,1)*H_mag820(aa);

    end

I_nodo820=I_carga820+I_rama820;
I_carga826(1*Max_armonico+1,1)=conj((S826(2,1)*1000)/V826(1*Max_armonico+1,1))
;
    for aa=1:length(H_Num826)

I_carga826(H_Num826(aa)+1*Max_armonico826,H_Num826(aa))=I_carga826(1*Max_armonico826+1,1)*H_mag826(aa);

    end

I_nodo826=I_carga826;

%CAPA 8

I_rama818=C818*V820+d818*I_nodo820;
I_nodo818=I_carga818+I_rama818;
I_rama824_826=C824_826*V826+d824_826*I_nodo826;
I_rama824_828=C824_828*V828+d824_828*I_nodo828;
I_carga824(0*Max_armonico+1,1)=conj((S824(1,1)*1000)/V824(0*Max_armonico+1,1))
;
I_carga824(1*Max_armonico+1,1)=conj((S824(2,1)*1000)/V824(1*Max_armonico+1,1))
;
I_carga824(2*Max_armonico+1,1)=conj((S824(3,1)*1000)/V824(2*Max_armonico+1,1))
;

    for aa=1:length(H_Num824)

I_carga824(H_Num824(aa)+0*Max_armonico824,H_Num824(aa))=I_carga824(0*Max_armonico824+1,1)*H_mag824(aa);

I_carga824(H_Num824(aa)+1*Max_armonico824,H_Num824(aa))=I_carga824(1*Max_armonico824+1,1)*H_mag824(aa);

I_carga824(H_Num824(aa)+2*Max_armonico824,H_Num824(aa))=I_carga824(2*Max_armonico824+1,1)*H_mag824(aa);

    end
```



```
ico824+1,1)*H_mag824(aa);
```

```
end
```

```
I_nodo824=I_carga824+I_rama824_826+I_rama824_828;
```

```
%CAPA 7
```

```
I_rama816_818=C816_818*V818+d816_818*I_nodo818;  
I_rama816_824=C816_824*V824+d816_824*I_nodo824;  
I_nodo816=I_carga816+I_rama816_818+I_rama816_824;
```

```
% CAPA 6
```

```
I_rama850=C850*V816+d850*I_nodo816;  
I_nodo850=I_carga850+I_rama850;
```

```
% CAPA 5
```

```
I_rama814=C814*V850+d814*I_nodo850;  
I_nodo814=I_carga814+I_rama814;
```

```
%CAPA 4
```

```
I_rama812=C812*V814+d812*I_nodo814;  
I_nodo812=I_carga812+I_rama812;  
I_carga810(1*Max_armonico+1,1)=conj((S810(2,1)*1000)/V810(1*Max_armonico+1,1))  
;  
for aa=1:length(H_Num810)
```

```
I_carga810(H_Num810(aa)+1*Max_armonico810,H_Num810(aa))=I_carga810(1*Max_armonico810+1,1)*H_mag810(aa);
```

```
end
```

```
I_nodo810=I_carga810;
```

```
%CAPA 3
```

```
I_rama808_812=C808_812*V812+d808_812*I_nodo812;  
I_rama808_810=C808_810*V810+d808_810*I_nodo810;  
I_nodo808=I_carga808+I_rama808_812+I_rama808_810;
```

```
%CAPA 2
```

```
I_rama806=C806*V808+d806*I_nodo808;
```



```
I_carga806(0*Max_armonico+1,1)=conj((S806(1,1)*1000)/V806(0*Max_armonico+1,1))
;
I_carga806(1*Max_armonico+1,1)=conj((S806(2,1)*1000)/V806(1*Max_armonico+1,1))
;
I_carga806(2*Max_armonico+1,1)=conj((S806(3,1)*1000)/V806(2*Max_armonico+1,1))
;

    for aa=1:length(H_Num806)

I_carga806(H_Num806(aa)+0*Max_armonico806,H_Num806(aa))=I_carga806(0*Max_armonico806+1,1)*H_mag806(aa);
I_carga806(H_Num806(aa)+1*Max_armonico806,H_Num806(aa))=I_carga806(1*Max_armonico806+1,1)*H_mag806(aa);
I_carga806(H_Num806(aa)+2*Max_armonico806,H_Num806(aa))=I_carga806(2*Max_armonico806+1,1)*H_mag806(aa);

    end
I_nodo806=I_carga806+I_rama806;

%CAPA 1

I_rama802=C802*V806+d802*I_nodo806;
I_nodo802=I_carga802+I_rama802;

% capa 0

I_rama800=C800*V802+d800*I_nodo802;
I_nodo800=I_rama800;

% V800_comp=A300*V802+OLC300*I_nodo802;

V800_comp=a800*V802+z802*I_nodo800;

Error=norm(abs(V800-V800_comp)/14376);

iter=iter+1;

V_error(iter)=Error;

end

% iter

V800mag=(abs(V800)); % saca magnitud para voltajes
V800ang=(angle(V800)*(180/pi)); %saca angulo en grados

V802mag=abs(V802); % saca magnitud para voltajes
V802ang=angle(V802)*(180/pi); %saca ángulo en grados

V840mag=(abs(V840)) % saca magnitud para voltajes
```



```
V840ang=(angle(V840)*(180/pi)) %saca ángulo en grados

DATOS

N_fases=3;
N_neutros=1;

%fase a b c

M_A302=[1 0 0];
M_A303=[0 1 0];

% Coordenadas de conductores
di=[0.0+29j; % a
    2.5+29j; % b
    7.0+29j; % c
    4.0+25j]; % n

% Datos de conductor
% a b c n
GMR=[ 0.0244 0.0244 0.0244 0.00814]; %ft
Resist=[0.306 0.3060 0.3060 0.59200]; %ohm/mile
RDi=[ 0.03004 0.03004 0.03004 0.02346]; %ft

f0=60;
Max_armonico=11;
% distancias 2500 2000 1500 3000 en ft convirtiendo a millas
long_linea=[0.473485 0.378788 0.284091 0.568182];

V1_f0=[14376*(cos(0)+sin(0)*1i);
    14376*(cos((-120*(pi/180)))+sin((-120*(pi/180))*1i);
    14376*(cos((120*(pi/180)))+sin((120*(pi/180))*1i)];

%Acoplado datos p1 y armónicas

% A B C
S802=[ 0; 0; 0 ];
S806=[ 0; 30+15j; 25+14j];
S808=[ 0; 0; 0 ];
S810=[ 0; 16+8j; 0 ];
S812=[ 0; 0; 0 ];
S814=[ 0; 0; 0 ];
S850=[ 0; 0; 0 ];
S816=[ 0; 0; 0 ];
S818=[ 0; 0; 0 ];
S820=[34+17j; 0; 0 ];
S822=[135+70j; 0; 0 ];
S824=[ 0; 5+2j; 0 ];
```



```
S826=[ 0;      40+20j;      0  ];
S828=[ 0;      0 ;      4+2j];
S830=[17+8j;   10+5j;   25+10j];
S854=[ 0;      0 ;      0  ];
S856=[ 0;      4+2j;      0  ];
S852=[ 0;      0 ;      0  ];
S832=[ 0;      0 ;      0  ];
S888=[ 0;      0 ;      0  ];
S890=[150+75j; 150+75j; 150+75j];
S858=[ 7+3j;   2+1j;   6+3j];
S864=[ 2+1j;   0 ;      0  ];
S834=[ 4+2j;   15+8j;   13+7j];
S842=[ 0;      0 ;      0  ];
S844=[144+110j; 135+105j; 135+105j];
S846=[ 0;      25+12j;   20+11j];
S848=[20+16j;  43+27j;  20+16j];
S860=[36+24j;  40+26j;  130+71j];
S840=[27+16j;  31+18j;  9+7j];
S836=[30+15j;  10+6j;   42+22j];
S862=[ 0;      0 ;      0  ];
S838=[ 0;      28+14j;   0  ];
```

```
%Sistema acoplado con porcentaje de frecuencias armónicas hasta la 11va
%armónica
```

```
% los armónicos para el nodo 802
```

```
H_Num802=[3      5      7      9      11];
Max_armonico802=max(H_Num802); % será el numero máximo de las H_num
H_mag802=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];
```

```
% los armónicos para el nodo 806
```

```
H_Num806=[3      5      7      9      11];
Max_armonico806=max(H_Num806); % será el numero máximo de las H_num
H_mag806=[0.30 0.40 0.40 0.10 0.07];
```

```
% los armónicos para el nodo 808
```

```
H_Num808=[3      5      7      9      11];
Max_armonico808=max(H_Num808); % será el numero máximo de las H_num
H_mag808=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];
```

```
% los armónicos para el nodo 810
```

```
H_Num810=[3      5      7      9      11];
Max_armonico810=max(H_Num810); % será el numero máximo de las H_num
H_mag810=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];
```

```
% los armónicos para el nodo 812
```

```
H_Num812=[3      5      7      9      11];
Max_armonico812=max(H_Num812); % será el numero máximo de las H_num
H_mag812=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];
```

```
% los armónicos para el nodo 814
```

```
H_Num814=[3      5      7      9      11];
Max_armonico814=max(H_Num814); % será el numero máximo de las H_num
H_mag814=[0.10 0.25 0.30 0.20 0.17];
```



```
% los armónicos para el nodo 850
H_Num850=[3      5      7      9     11];
Max_armonico850=max(H_Num850); % será el numero máximo de las H_num
H_mag850=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 816
H_Num816=[3      5      7      9     11];
Max_armonico816=max(H_Num816); % será el numero máximo de las H_num
H_mag816=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 818
H_Num818=[3      5      7      9     11];
Max_armonico818=max(H_Num818); % será el numero máximo de las H_num
H_mag818=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 820
H_Num820=[3      5      7      9     11];
Max_armonico820=max(H_Num820); % será el numero máximo de las H_num
H_mag820=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 822
H_Num822=[3      5      7      9     11];
Max_armonico822=max(H_Num822); % será el numero máximo de las H_num
H_mag822=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 824
H_Num824=[3      5      7      9     11];
Max_armonico824=max(H_Num824); % será el numero máximo de las H_num
H_mag824=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 826
H_Num826=[3      5      7      9     11];
Max_armonico826=max(H_Num826); % será el numero máximo de las H_num
H_mag826=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 828
H_Num828=[3      5      7      9     11];
Max_armonico828=max(H_Num828); % será el numero máximo de las H_num
H_mag828=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 830
H_Num830=[3      5      7      9     11];
Max_armonico830=max(H_Num830); % será el numero máximo de las H_num
H_mag830=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 854
H_Num854=[3      5      7      9     11];
Max_armonico854=max(H_Num854); % será el numero máximo de las H_num
H_mag854=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 856
H_Num856=[3      5      7      9     11];
Max_armonico856=max(H_Num856); % será el numero máximo de las H_num
```



```
H_mag856=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 852
H_Num852=[3 5 7 9 11];
Max_armonico852=max(H_Num852); % será el numero máximo de las H_num
H_mag852=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 832
H_Num832=[3 5 7 9 11];
Max_armonico832=max(H_Num832); % será el numero máximo de las H_num
H_mag832=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 888
H_Num888=[3 5 7 9 11];
Max_armonico888=max(H_Num888); % será el numero máximo de las H_num
H_mag888=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 890
H_Num890=[3 5 7 9 11];
Max_armonico890=max(H_Num890); % será el numero máximo de las H_num
H_mag890=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 858
H_Num858=[3 5 7 9 11];
Max_armonico858=max(H_Num858); % será el numero máximo de las H_num
H_mag858=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 864
H_Num864=[3 5 7 9 11];
Max_armonico864=max(H_Num864); % será el numero máximo de las H_num
H_mag864=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 834
H_Num834=[3 5 7 9 11];
Max_armonico834=max(H_Num834); % será el numero máximo de las H_num
H_mag834=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 842
H_Num842=[3 5 7 9 11];
Max_armonico842=max(H_Num842); % será el numero máximo de las H_num
H_mag842=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 844
H_Num844=[3 5 7 9 11];
Max_armonico844=max(H_Num844); % será el numero máximo de las H_num
H_mag844=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 846
H_Num846=[3 5 7 9 11];
Max_armonico846=max(H_Num846); % será el numero máximo de las H_num
H_mag846=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 848
H_Num848=[3 5 7 9 11];
Max_armonico848=max(H_Num848); % será el numero máximo de las H_num
```



```
H_mag848=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 860
H_Num860=[3 5 7 9 11];
Max_armonico860=max(H_Num860); % será el numero máximo de las H_num
H_mag860=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 840
H_Num840=[3 5 7 9 11];
Max_armonico840=max(H_Num840); % será el numero máximo de las H_num
H_mag840=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 836
H_Num836=[3 5 7 9 11];
Max_armonico836=max(H_Num836); % será el numero máximo de las H_num
H_mag836=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 862
H_Num862=[3 5 7 9 11];
Max_armonico862=max(H_Num862); % será el numero máximo de las H_num
H_mag862=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% los armónicos para el nodo 838
H_Num838=[3 5 7 9 11];
Max_armonico838=max(H_Num838); % será el numero máximo de las H_num
H_mag838=[0.00 0.00 0.00 0.00 0.00];

% creando la matriz de coeficientes de potencial primitiva

long_MP=N_fases+N_neutros;

%N_fases=3;
%N_neutros=1;

for aa=1:long_MP

    for bb=1:long_MP
        if aa==bb
            P(aa,bb)=11.17689*log(S(aa,bb)/RDi(1,aa));
        else
            P(aa,bb)=11.17689*log(S(aa,bb)/D(aa,bb));
        end
    end

end

% separa la matriz de coeficientes de potencial primitiva para reduccion de
kron
Pij=P(1:N_fases,1:N_fases);
Pin=P(1:N_fases,N_fases+1:end);
Pnj=P(N_fases+1:end,1:N_fases);
Pnn=P(N_fases+1:end,N_fases+1:end);
```



```
% Se realiza la reducción por Kron
Pabc=Pij-Pin*inv(Pnn)*Pnj;
% determinando la matriz de capacitancia en derivación

C=inv(Pabc);

f=zeros(1,Max_armonico);
for aa=1:Max_armonico
    f(aa)=aa*f0;
end

% Crea la matriz de admitancias en función de las frecuencias

Y_armonico=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);

for aa=1:N_fases
    for bb=1:N_fases
        C_ind=C(aa,bb);
        for cc=1:Max_armonico
            Y_armonico(aa*Max_armonico+cc-Max_armonico,bb*Max_armonico+cc-
Max_armonico)=j*2*pi*f(cc)*C_ind;
        end
    end
end

% este es el trifásico es igual a A300 configuración de la red
Y_armonico=Y_armonico*0.000001;

% % se extrae fase B
% Z4abc=Zabc*long_linea(3);
% Z4=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);
%
% Z4(Max_armonico*1+1:Max_armonico*2,Max_armonico*1+1:Max_armonico*2)=Z4abc(Max_
armonico*1+1:Max_armonico*2,Max_armonico*1+1:Max_armonico*2);

% se extrae fase A, en el cual para poder colocar el valor dentro una
% matriz de nxn y obtener las fases mutuas, debemos multiplicar el
% Max_armonicos por 0 para la fase A, si es la fase B se debe multiplicar
% por 1 y fase C por 2, lo que significa que solo se suma 1 cada vez que se
% quiera extraer un valor.

% se extrae fase A
Y302abc=Y_armonico;
Y302=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);
Y302(Max_armonico*0+1:Max_armonico*1,Max_armonico*0+1:Max_armonico*1)=Y302abc(
Max_armonico*0+1:Max_armonico*1,Max_armonico*0+1:Max_armonico*1);

% se extrae fase B
Y303_304abc=Y_armonico;
Y303_304=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);
Y303_304(Max_armonico*1+1:Max_armonico*2,Max_armonico*1+1:Max_armonico*2)=Y303
_304abc(Max_armonico*1+1:Max_armonico*2,Max_armonico*1+1:Max_armonico*2);
```



```
FT=(1/5278.97);

Y800=2580*FT*Y_armonico;
Y802=1730*FT*Y_armonico;
Y806=32230*FT*Y_armonico;
Y808_810=5804*FT*Y303_304;
Y808_812=37500*FT*Y_armonico;
Y812=29730*FT*Y_armonico;
Y814=10*FT*Y_armonico;
Y850=310*FT*Y_armonico;
Y816_824=10210*FT*Y_armonico;
Y816_818=1710*FT*Y302;
Y824_828=840*FT*Y_armonico;
Y824_826=3030*FT*Y303_304;
Y818=48150*FT*Y302;
Y820=13740*FT*Y302;
Y828=20440*FT*Y_armonico;
Y830=520*FT*Y_armonico;
Y854_852=36830*FT*Y_armonico;
Y854_856=23330*FT*Y303_304;
Y852=10*FT*Y_armonico;
Y832_858=4900*FT*Y_armonico;
Y832_888=1*FT*Y_armonico;
Y858_864=1620*FT*Y302;
Y858_834=5830*FT*Y_armonico;
Y888=10560*FT*Y_armonico;
Y834_842=280*FT*Y_armonico;
Y834_860=2020*FT*Y_armonico;
Y842=1350*FT*Y_armonico;
Y844=3640*FT*Y_armonico;
Y846=530*FT*Y_armonico;
Y860=2680*FT*Y_armonico;
Y836_862=280*FT*Y_armonico;
Y836_840=860*FT*Y_armonico;
Y862=4860*FT*Y303_304;

% Crea el vector de frecuencias a analizar
f=zeros(1,Max_armonico);
for aa=1:Max_armonico
    f(aa)=aa*f0;
end

% Crea la matriz de impedancias primitivas
M_Z_imprimiva_arm=zeros(fil*Max_armonico,fil*Max_armonico);
cont1=0;
cont2=0;
cont3=0;
cont4=0;
for aa=1:fil
    for bb=1:fil
        for cc=1:Max_armonico
            cont2=cont2+1;
            for dd=1:Max_armonico
```



```
if aa==bb

    % Impedancias propias

    if cc==dd
        cont1=cont1+1;

M_Z_imprimiva_arm(cont1,cont1)=Resist(aa)+0.00158836*f(cc)+0.00202237j*f(cc)*.
..
(log(1/GMR(aa))+7.6786+(0.5*log(100/f(cc))));

        end

    else
        % Impedancias mutuas

        if cc==dd
            cont3=cont3+1;
            cont5=cont3+cont4;

M_Z_imprimiva_arm(cont2,cont5)=0.00158836*f(cc)+0.00202237i*f(cc)*(log(1/D(aa,
bb))+7.6786+0.5*log(100/f(cc)));
            end

        end

    end

    end

    cont3=0;

    end
cont2=0;
cont4=cont4+Max_armonico;

end

M_Z_imprimiva_arm;

% separa la matriz de impedancias primitivas para reduccion de kron
Zij=M_Z_imprimiva_arm(1:N_fases*Max_armonico,1:N_fases*Max_armonico);
Zin=M_Z_imprimiva_arm(1:N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico+1:end);
Znj=M_Z_imprimiva_arm(N_fases*Max_armonico+1:end,1:N_fases*Max_armonico);
Znn=M_Z_imprimiva_arm(N_fases*Max_armonico+1:end,N_fases*Max_armonico+1:end);

% Se realiza la reducci3n por Kron Zabc= Z300 configuraci3n de la linea
% 3fases
```



```
Zabc=Zij-Zin*inv(Znn)*Znj;

% Z1=Zabc*long_linea(1);
% Z2=Zabc*long_linea(2);
% Z5=Zabc*long_linea(4);

% se extrae fase A
Z302abc=Zabc;
Z302=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);
Z302(Max_armonico*0+1:Max_armonico*1,Max_armonico*0+1:Max_armonico*1)=Z302abc(
Max_armonico*0+1:Max_armonico*1,Max_armonico*0+1:Max_armonico*1);

% se extrae fase B
Z303_304abc=Zabc;
Z303_304=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);
Z303_304(Max_armonico*1+1:Max_armonico*2,Max_armonico*1+1:Max_armonico*2)=Z303
_304abc(Max_armonico*1+1:Max_armonico*2,Max_armonico*1+1:Max_armonico*2);

FT=(1/5278.97);

Z802=2580*FT*Zabc;
Z806=1730*FT*Zabc;
Z808=32230*FT*Zabc;
Z810=5804*FT*Z303_304;
Z812=37500*FT*Zabc;
Z814=29730*FT*Zabc;
Z850=10*FT*Zabc;
Z816=310*FT*Zabc;
Z818=1710*FT*Z302;
Z820=48150*FT*Z302;
Z822=13740*FT*Z302;
Z824=10210*FT*Zabc;
Z826=3030*FT*Z303_304;
Z828=840*FT*Zabc;
Z830=20440*FT*Zabc;
Z854=520*FT*Zabc;
Z856=23330*FT*Z303_304;
Z852=36830*FT*Zabc;
Z832=10*FT*Zabc;
Z888=1*FT*Zabc;
Z890=10560*FT*Zabc;
Z858=4900*FT*Zabc;
Z864=1620*FT*Z302;
Z834=5830*FT*Zabc;
Z842=280*FT*Zabc;
Z844=1350*FT*Zabc;
Z846=3640*FT*Zabc;
Z848=530*FT*Zabc;
Z860=2020*FT*Zabc;
Z836=2680*FT*Zabc;
Z840=860*FT*Zabc;
Z862=280*FT*Zabc;
Z838=4860*FT*Z303_304;
```



```
A300= ones(1,N_fases*Max_armonico);
A300=diag(A300);

% creando matriz fase A armónico (CONFIGURACION A302 QUE PROVIENE DEL
% ARCHIVO datos_34n
A302=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);

cont1=0;

% %fase  a b c
% M_A302=[1 0 0];
% M_A303=[0 1 0];

for aa=1:N_fases
    for bb=1:N_fases
        for cc=1:Max_armonico
            for dd=1:Max_armonico
                if aa==bb
                    if cc==dd
                        cont1=cont1+1;
                        A302(cont1,cont1)=M_A302(aa);
                    end
                end
            end
        end
    end
end

A302;

% creando matriz fase B armónico (CONFIGURACION A303 Y A304 QUE PROVIENE DEL
% ARCHIVO datos_34n

A304=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);

cont1=0;

for aa=1:N_fases
    for bb=1:N_fases
        for cc=1:Max_armonico
            for dd=1:Max_armonico
                if aa==bb
                    if cc==dd
                        cont1=cont1+1;
                        A304(cont1,cont1)=M_A303(aa);
                    end
                end
            end
        end
    end
end
```



A304;

```
%Creando matriz "C"
```

```
%C=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);
```

```
% se calcula la matriz  $c=Y_{abc}+(1/4)*Y_{abc}*Z_{abc}*Y_{abc}$  ec. 6.17
```

```
C800=Y800+(1/4)*Y800*Z802*Y800;  
C802=Y802+(1/4)*Y802*Z806*Y802;  
C806=Y806+(1/4)*Y806*Z808*Y806;  
C808_810=Y808_810+(1/4)*Y808_810*Z810*Y808_810;  
C808_812=Y808_812+(1/4)*Y808_812*Z812*Y808_812;  
C812=Y812+(1/4)*Y812*Z814*Y812;  
C814=Y814+(1/4)*Y814*Z850*Y814;  
C850=Y850+(1/4)*Y850*Z816*Y850;  
C816_824=Y816_824+(1/4)*Y816_824*Z824*Y816_824;  
C816_818=Y816_818+(1/4)*Y816_818*Z818*Y816_818;  
C824_828=Y824_828+(1/4)*Y824_828*Z828*Y824_828;  
C824_826=Y824_826+(1/4)*Y824_826*Z826*Y824_826;  
C818=Y818+(1/4)*Y818*Z820*Y818;  
C820=Y820+(1/4)*Y820*Z822*Y820;  
C828=Y828+(1/4)*Y828*Z830*Y828;  
C830=Y830+(1/4)*Y830*Z854*Y830;  
C854_852=Y854_852+(1/4)*Y854_852*Z852*Y854_852;  
C854_856=Y854_856+(1/4)*Y854_856*Z856*Y854_856;  
C852=Y852+(1/4)*Y852*Z832*Y852;  
C832_858=Y832_858+(1/4)*Y832_858*Z858*Y832_858;  
C832_888=Y832_888+(1/4)*Y832_888*Z888*Y832_888;  
C858_864=Y858_864+(1/4)*Y858_864*Z864*Y858_864;  
C858_834=Y858_834+(1/4)*Y858_834*Z834*Y858_834;  
C888=Y888+(1/4)*Y888*Z890*Y888;  
C834_842=Y834_842+(1/4)*Y834_842*Z842*Y834_842;  
C834_860=Y834_860+(1/4)*Y834_860*Z860*Y834_860;  
C842=Y842+(1/4)*Y842*Z844*Y842;  
C844=Y844+(1/4)*Y844*Z846*Y844;  
C846=Y846+(1/4)*Y846*Z848*Y846;  
C860=Y860+(1/4)*Y860*Z836*Y860;  
C836_862=Y836_862+(1/4)*Y836_862*Z862*Y836_862;  
C836_840=Y836_840+(1/4)*Y836_840*Z840*Y836_840;  
C862=Y862+(1/4)*Y862*Z838*Y862;
```

```
%CALCULANDO LA MATRIZ [ d ]
```

```
%[d]= [U]+(1/2)*[Zabc]*[Yabc]
```

```
d800=A300+(1/2)*Z802*Y800;  
d802=A300+(1/2)*Z806*Y802;  
d806=A300+(1/2)*Z808*Y806;  
d808_810=A304+(1/2)*Z810*Y808_810;  
d808_812=A300+(1/2)*Z812*Y808_812;  
d812=A300+(1/2)*Z814*Y812;  
d814=A300+(1/2)*Z850*Y814;
```



d850=A300+(1/2)*Z816*Y850;
d816_818=A302+(1/2)*Z818*Y816_818;
d818=A302+(1/2)*Z820*Y818;
d820=A302+(1/2)*Z822*Y820;
d816_824=A300+(1/2)*Z824*Y816_824;
d824_826=A304+(1/2)*Z826*Y824_826;
d824_828=A300+(1/2)*Z828*Y824_828;
d828=A300+(1/2)*Z830*Y828;
d830=A300+(1/2)*Z854*Y830;
d854_856=A304+(1/2)*Z856*Y854_856;
d854_852=A300+(1/2)*Z852*Y854_852;
d852=A300+(1/2)*Z832*Y852;
d832_888=A300+(1/2)*Z888*Y832_888;
d890_888=A300+(1/2)*Z890*Y888;
d832_858=A300+(1/2)*Z858*Y832_858;
d858_864=A302+(1/2)*Z864*Y858_864;
d858_834=A300+(1/2)*Z834*Y858_834;
d834_842=A300+(1/2)*Z842*Y834_842;
d842=A300+(1/2)*Z844*Y842;
d844=A300+(1/2)*Z846*Y844;
d846=A300+(1/2)*Z848*Y846;
d834_860=A300+(1/2)*Z860*Y834_860;
d860=A300+(1/2)*Z836*Y860;
d836_840=A300+(1/2)*Z840*Y836_840;
d836_862=A300+(1/2)*Z862*Y836_862;
d838_862=A304+(1/2)*Z838*Y862;

a800=d800;
a802=d802;
a806=d806;
a808_810=d808_810;
a808_812=d808_812;
a812=d812;
a814=d814;
a850=d850;
a816_818=d816_818;
a818=d818;
a820=d820;
a816_824=d816_824;
a824_826=d824_826;
a824_828=d824_828;
a828=d828;
a830=d830;
a854_856=d854_856;
a854_852=d854_852;
a852=d852;
a832_888=d832_888;
a890_888=d890_888;
a832_858=d832_858;
a858_864=d858_864;
a858_834=d858_834;
a834_842=d834_842;
a842=d842;
a844=d844;
a846=d846;



```
a834_860=d834_860;  
a860=d860;  
a836_840=d836_840;  
a836_862=d836_862;  
a838_862=d838_862;
```

```
%se calcula la inversa de la matriz de identidad [a]
```

```
A800=inv(a800);  
A802=inv(a802);  
A806=inv(a806);  
A808_812=inv(a808_812);  
A812=inv(a812);  
A814=inv(a814);  
A850=inv(a850);  
A816_824=inv(a816_824);  
A824_828=inv(a824_828);  
A828=inv(a828);  
A830=inv(a830);  
A854_852=inv(a854_852);  
A852=inv(a852);  
A832_888=inv(a832_888);  
A890_888=inv(a890_888);  
A832_858=inv(a832_858);  
A858_834=inv(a858_834);  
A834_842=inv(a834_842);  
A842=inv(a842);  
A844=inv(a844);  
A846=inv(a846);  
A834_860=inv(a834_860);  
A860=inv(a860);  
A836_840=inv(a836_840);  
A836_862=inv(a836_862);
```

```
% se calcula la inversa de la matriz solo con la fase a
```

```
A816_818=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);
```

```
%A816_818(1,1)=inv(a816_818(1,1));
```

```
A816_818(Max_armonico*0+1:Max_armonico*1,Max_armonico*0+1:Max_armonico*1)=inv(  
a816_818(Max_armonico*0+1:Max_armonico*1,Max_armonico*0+1:Max_armonico*1));  
A818=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);
```

```
% A818(1,1)=inv(a818(1,1));
```

```
A818(Max_armonico*0+1:Max_armonico*1,Max_armonico*0+1:Max_armonico*1)=inv(a818  
(Max_armonico*0+1:Max_armonico*1,Max_armonico*0+1:Max_armonico*1));  
A820=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);
```

```
% A820(1,1)=inv(a820(1,1));
```

```
A820(Max_armonico*0+1:Max_armonico*1,Max_armonico*0+1:Max_armonico*1)=inv(a820  
(Max_armonico*0+1:Max_armonico*1,Max_armonico*0+1:Max_armonico*1));  
A858_864=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);
```

```
% A858_864(1,1)=inv(a858_864(1,1));
```

```
A858_864(Max_armonico*0+1:Max_armonico*1,Max_armonico*0+1:Max_armonico*1)=inv(  
a858_864(Max_armonico*0+1:Max_armonico*1,Max_armonico*0+1:Max_armonico*1));
```



```
% se calcula la inversa de la matriz solo con la fase b

A808_810=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);

%A808_810(2,2)=inv(a808_810(2,2));
A808_810(Max_armonico*1+1:Max_armonico*2,Max_armonico*1+1:Max_armonico*2)=inv(
a808_810(Max_armonico*1+1:Max_armonico*2,Max_armonico*1+1:Max_armonico*2));
A824_826=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);

%A824_826(2,2)=inv(a824_826(2,2));
A824_826(Max_armonico*1+1:Max_armonico*2,Max_armonico*1+1:Max_armonico*2)=inv(
a824_826(Max_armonico*1+1:Max_armonico*2,Max_armonico*1+1:Max_armonico*2));
A854_856=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);

%A854_856(2,2)=inv(a854_856(2,2));
A854_856(Max_armonico*1+1:Max_armonico*2,Max_armonico*1+1:Max_armonico*2)=inv(
a854_856(Max_armonico*1+1:Max_armonico*2,Max_armonico*1+1:Max_armonico*2));
A838_862=zeros(N_fases*Max_armonico,N_fases*Max_armonico);

%A838_862(2,2)=inv(a838_862(2,2));
A838_862(Max_armonico*1+1:Max_armonico*2,Max_armonico*1+1:Max_armonico*2)=inv(
a838_862(Max_armonico*1+1:Max_armonico*2,Max_armonico*1+1:Max_armonico*2));

%[B]=[a]-1*[b] dado que A = a-1, se utiliza A para simplificar
% [B]=[A]*[b]

B800=A800*Z802;
B802=A802*Z806;
B806=A806*Z808;
B808_812=A808_812*Z812;
B812=A812*Z814;
B814=A814*Z850;
B850=A850*Z816;
B816_824=A816_824*Z824;
B824_828=A824_828*Z828;
B828=A828*Z830;
B830=A830*Z854;
B854_852=A854_852*Z852;
B852=A852*Z832;
B832_888=A832_888*Z888;
B890_888=A890_888*Z890;
B832_858=A832_858*Z858;
B858_834=A858_834*Z834;
B834_842=A834_842*Z842;
B842=A842*Z844;
B844=A844*Z846;
B846=A846*Z848;
B834_860=A834_860*Z860;
B860=A860*Z836;
B836_840=A836_840*Z840;
B836_862=A836_862*Z862;
B808_810=A808_810*Z810;
B824_826=A824_826*Z826;
```



```
B854_856=A854_856*Z856;  
B838_862=A838_862*Z838;  
B816_818=A816_818*Z818;  
B818=A818*Z820;  
B820=A820*Z822;  
B858_864=A858_864*Z864;
```

```
I_nodo802=zeros(N_fases*Max_armonico,Max_armonico);
```

```
I_nodo806=I_nodo802;  
I_nodo804=I_nodo802;  
I_nodo808=I_nodo802;  
I_nodo810=I_nodo802;  
I_nodo812=I_nodo802;  
I_nodo814=I_nodo802;  
I_nodo850=I_nodo802;  
I_nodo816=I_nodo802;  
I_nodo818=I_nodo802;  
I_nodo820=I_nodo802;  
I_nodo822=I_nodo802;  
I_nodo824=I_nodo802;  
I_nodo826=I_nodo802;  
I_nodo828=I_nodo802;  
I_nodo830=I_nodo802;  
I_nodo854=I_nodo802;  
I_nodo856=I_nodo802;  
I_nodo852=I_nodo802;  
I_nodo832=I_nodo802;  
I_nodo888=I_nodo802;  
I_nodo890=I_nodo802;  
I_nodo858=I_nodo802;  
I_nodo864=I_nodo802;  
I_nodo834=I_nodo802;  
I_nodo842=I_nodo802;  
I_nodo844=I_nodo802;  
I_nodo846=I_nodo802;  
I_nodo848=I_nodo802;  
I_nodo860=I_nodo802;  
I_nodo836=I_nodo802;  
I_nodo840=I_nodo802;  
I_nodo862=I_nodo802;  
I_nodo838=I_nodo802;
```

```
I_carga838=zeros(N_fases*Max_armonico,Max_armonico);  
I_carga840=I_carga838;  
I_carga862=I_carga838;  
I_carga836=I_carga838;  
I_carga860=I_carga838;  
I_carga834=I_carga838;  
I_carga842=I_carga838;  
I_carga844=I_carga838;  
I_carga846=I_carga838;  
I_carga848=I_carga838;  
I_carga864=I_carga838;  
I_carga858=I_carga838;  
I_carga890=I_carga838;
```



```
I_carga888=I_carga838;  
I_carga832=I_carga838;  
I_carga852=I_carga838;  
I_carga856=I_carga838;  
I_carga854=I_carga838;  
I_carga830=I_carga838;  
I_carga828=I_carga838;  
I_carga826=I_carga838;  
I_carga824=I_carga838;  
I_carga816=I_carga838;  
I_carga818=I_carga838;  
I_carga820=I_carga838;  
I_carga822=I_carga838;  
I_carga850=I_carga838;  
I_carga814=I_carga838;  
I_carga812=I_carga838;  
I_carga810=I_carga838;  
I_carga808=I_carga838;  
I_carga806=I_carga838;  
I_carga802=I_carga838;
```

Crea el vector de voltajes en funcion de armonicos

```
V800=zeros(N_fases*Max_armonico,Max_armonico);
```

```
cont1=0;  
for aa=1:N_fases  
    for bb=1:Max_armonico  
        cont1=cont1+1;  
        for cc=1:Max_armonico  
            if bb==1 && cc==1  
  
                V800(cont1,cc)=V1_f0(aa);  
  
            end  
        end  
    end  
end  
  
V800;  
  
[fil col]=size(di);  
  
D=zeros(fil,fil);  
  
for aa=1:fil  
    for bb=1:fil  
  
        D(aa,bb)=norm(di(aa,1)-di(bb,1));  
  
    end  
end
```



```
S=zeros(fil,fil);  
  
for aa=1:fil  
    for bb=1:fil  
  
        S(aa,bb)=norm(di(aa,1)- conj(di(bb,1)));  
  
    end  
end
```