

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS
PERTURBACIONES ARMÓNICAS EN LOS SISTEMAS
INDUSTRIALES EN BAJA TENSIÓN**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
CON ESPECIALIDAD EN INGENIERIA ELECTRICA**

P R E S E N T A

LUNA VALDES LUIS ENRIQUE



MEXICO D.F

JUNIO 2007

ZACATENCO



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

SIP-14

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D. F. siendo las 17:00 horas del día 25 del mes de Junio del 2007 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de E.S.I.M.E. ZAC para examinar la tesis de grado titulada:

"METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE LAS PERTURBACIONES ARMÓNICAS EN LOS SISTEMAS INDUSTRIALES EN BAJA TENSIÓN "

Presentada por el alumno:

LUNA <small>Apellido paterno</small>	VALDES <small>materno</small>	LUIS ENRIQUE <small>nombre(s)</small>
		Con registro: B 0 4 0 9 5 2

aspirante al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS CON ESPECIALIDAD EN INGENIERÍA ELÉCTRICA

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

LA COMISIÓN REVISORA

Director de tesis M. EN C. GILBERTO ENRIQUEZ HARPER	Presidente DR. DANIEL OLGUÍN SALINAS
Segundo Vocal DR. DAVID SEBASTIAN BALTAZAR	Tercer Vocal DR. JAIME ROBLES GARCÍA
Secretario DR. RICARDO OCTAVIO MOTA PALOMINO	Suplente DR. ELMER SANTOS MORA

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. JAIME ROBLES GARCÍA





INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de México, Distrito Federal, el día 25 del mes Junio del año 2007, el (la) que suscribe Luna Valdés Luis Enrique alumno(a) del Programa de Maestría en Ciencia con Especialidad en Ingeniería Eléctrica con número de registro B-040952, adscrito a la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación de la ESIME Unidad Zacatenco, manifiesta que es autor(a) intelectual del presente Trabajo de Tesis bajo la dirección del M. en C. Gilberto Enriquez Harper y cede los derechos del trabajo intitulado: Metodología para el Análisis de las Perturbaciones Armónicas en los Sistemas Industriales en Baja Tensión al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, graficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección: luiggiluna@hotmail.com , zedd2728@hotmail.com.

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

Luna Valdés Luis Enrique
Nombre y firma



RESUMEN

Debido al constante crecimiento de las fuentes generadoras de corrientes armónicas, así como la problemática que origina en los sistemas eléctricos industriales. Hoy en día, se está poniendo un mayor énfasis en comprender la naturaleza de su comportamiento en la red, ya que es una parte esencial para la solución de dicho problema.

En este trabajo, se presentan el estudio realizado a una red eléctrica, describiendo el impacto armónico que se presenta en la red ante la presencia de una o más fuentes de corrientes armónicas. Dicho estudio emplea los modelos analíticos empleados por Comisión Federal de Electricidad, los cuales están certificados por la IEEE e IEC y están en función de la impedancia armónicas de la red. Con los resultados obtenidos, se determinará una metodología con fines prácticos para dar una solución real a una red general y plantear diferentes soluciones, para mitigar los armónicos generados por sus cargas no-lineales y prevenir el problema de resonancia,

Esta metodología, parte del análisis de la compensación de reactivos y la aplicación del método de barrido de frecuencia, que determinará una estimación inicial de las condiciones armónicas, ayudando a evitar posibles incrementos de las armónicas existentes y a la vez, contemplar ciertos criterios de evaluación durante el proceso de compensación de reactivos y la colocación de filtros pasivos.

Por último, el análisis y resultados de este trabajo, permitirá desarrollar nuevos procedimientos para analizar futuros trabajos de CFE en el lado de baja tensión, así como verificar la efectividad de sus programas empleados para el análisis armónico.



ABSTRACT

Due to the constant growth of the generating sources of harmonic currents, as well as the problem that originates in the industrial electric systems. At present, it know this putting a bigger emphasis on understanding the nature of their behavior in the net, since it is an essential part for the solution of this problem.

In this work, the study carried out to an electric net are presented, describing the harmonic impact that is presented in the net before the presence of one or more sources of harmonic currents. This study uses the analytic models used by Federal Commission of Electricity, which are certified for the IEEE and IEC and they are in function of the harmonic impedance of the net. With the obtained results, a methodology was determined with practical ends to give a real solution to a general net and to create different solutions, to mitigate the harmonic generated by its non-linear loads and to foresee the problem of resonance,

This methodology, leaves of the analysis of the compensation of reactivos and the application of the method of sweeping of frequency that it determined an initial estimate of the harmonic conditions, helping to avoid possible increments of the existent harmonicas and at the same time, to contemplate certain evaluation approaches during the process of compensation of reactivos and used of passive filters.

Finally, the analysis and results of this work will allow to develop new procedures to analyze future works of CFE in the side of low tension, as well as to verify the effectiveness of their programs employees for the harmonic analysis.



CONTENIDO

Resumen.....	III
Abstract.....	IV
Índice de figuras.....	VII
Índice de tablas.....	IX
Glosario de términos.....	XIII

1.- INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES.....	1
1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	5
1.5 ESTADO DEL ARTE.....	6
1.6 APORTACIONES.....	9
1.7 ESTRUCTURA DE TESIS.....	10

2.- ORIGEN Y EFECTO DE LOS ARMÓNICOS

2.1.- Origen de los Armónicos.....	11
2.2.- Fuentes de Armónicos.....	12
2.3.- Efectos de los Armónicos en los Sistemas Eléctricos.....	13
2.4.- Algunos Efectos de los Armónicos en los dispositivos de electrónica.....	13
2.5.- Definiciones básicas de Cantidades Armónicas y Normas.....	15
2.6.- Normatividad para el control de armónicos.....	16
2.7.- Controladores de Velocidad.....	18
2.7.1.- Controladores Trifásicos para Motores de CD.....	19
2.7.2.- Armónicas Generadas por Controladores de Motores de CD.....	20
2.7.3.- Controladores de Motores de CA.....	20
2.7.4.- Rectificador de 6 pulsos.....	22
2.7.5.- Rectificador de 12 pulsos.....	23

3.- TÉCNICAS DE MITIGACIÓN DE ARMÓNICOS

3.1.- Introducción de filtros.....	29
3.2.- Características de un filtro.....	30
3.3.- Filtros en derivación.....	31
3.3.1.- Filtro de doble sintonía.....	32
3.3.2.- Filtros Paso altas.....	33
3.4.- Diseño de filtros en derivación.....	35
3.5.- Otras técnicas de mitigación de armónicas.....	36
3.5.1.- Aterrizamiento y conexiones del transformador.....	37



3.5.2.- Multifaseo ó multipulsación.....	38
3.5.3.- Mitigación de Armónicas de Convertidores Estáticos de VAR's (svc's).....	39
3.5.4.- Cancelación de armónicas por inyección armónica.....	41

4.- PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA DE ARMÓNICOS

4.1.- consideraciones.....	45
4.2.- Datos Esenciales para llevar acabo el análisis de armónicos.....	46
4.3.- Propuesta de la metodología para el análisis armónico de una red.....	47
4.4.- Modelado de Digsilent Cargas No-lineales.....	51

5.- PRUEBA Y RESULTADO DEL SISTEMA ELÉCTRICO ANTE LA PRESENCIA DE ARMÓNICOS.

5.1.-Procedimiento para el análisis de armónicas.....	56
5.2. -Análisis de las Simulaciones en las cuatro trayectorias de la red principal.....	60
5.3.- Red Balanceada con Armónicos y sin Capacitores.....	62
5.3.1. - Comportamiento de la Ruta 1 ante la presencia de Armónicos.....	65
5.3.2. - Comportamiento de la Ruta 2 ante la presencia de Armónicos.....	67
5.3.3. - Comportamiento de la Ruta 3 ante la presencia de Armónicos.....	69
5.3.4. - Comportamiento del Bus Principal ante la presencia de Armónicos.....	71
5.4. - Red Desbalanceada con Armónicos y sin Capacitores.....	73
5.5. - Instalación de Capacitores para compensación de reactivos.....	77
5.6. - Instalación de Filtros para mitigar los Armónicos.....	83

6.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

REFERENCIA

APÉNDICES 1, 2, 3, 4.

APÉNDICE 2. - ANÁLISIS DE ARMONICOS

- A.2.1.-Teoría Básica para el Análisis de Armónicos.
- A.2.2.- Definiciones básicas de cantidades de Armónicos
- A.2.3.- Cantidades eléctricas Bajo la Situación Senoidal y No senoidal.
- A.2.4.- Secuencias de Fases de Armónicos.

Apéndice 3.- MODELADO DE LOS DISPOSITIVOS CONTENIDOS EN UN SISTEMA ELÉCTRICO

- A.3.1.-Las líneas Aéreas y los Cables Subterráneos.
- A.3.2.-Los Transformadores.
- A.3.3.-Cargas Rotatorias Grandes.
 - A.3.3.1.- Máquina Síncrona.
 - A.3.3.2.- Motores de Inducción.
 - A.3.3.3.- Cargas Pequeñas.
- A.3.4.-Condensadores.
- A.3.5.-Reactores.



INDICE DE TABLAS		PAG
Tabla 2.1.	Clasificación de Fuentes Armónicas de acuerdo a la carga No-lineal.	13
Tabla 2.2.	Efectos generales que ocasionan los armónicos sobre Dispositivos Eléctricos.	14
Tabla 2.4.	Índices más comunes para la evaluación de la calidad del voltaje.	15
Tabla 2.5.	Límites de Distorsión de Voltaje.	16
Tabla 2.6.	Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas de Distribución.	16
Tabla 2.7.	Límites de Distorsión de Corriente para Sistemas de Subtransmisión.	17
Tabla 2.8.	Valores de Tensión armónico individual en los puntos de suministro hasta el armónico 25, expresados en porcentaje de V_n .	17
Tabla 2.9.	Inyecciones de corriente de un convertidor de seis pulsos.	23
Tabla 2.10.	Inyecciones de corriente de un convertidor de doce pulsos.	23
Tabla 5.1.	Valores reales de la red Kimberley tomados por el mismo personal de Kimberley.	58
Tabla 5.2.	Valores obtenidos en la simulación de la red Kimberley por los programas Digsilent y Easy-Power.	59
Tabla 5.3.	Comportamiento THD_V y HD_{V5} en los buses de las cuatro rutas de estudio sin capacitores, con interruptor abierto y sistema balanceado.	63
Tabla 5.4.	Comportamiento THD_V y HD_{V5} en los buses 0.48 kV y 13.8 kV de las cuatro rutas de estudio sin capacitores, con interruptor cerrado y sistema balanceado.	63
Tabla 5.5.	Comportamiento de THD_V & HD_V en los buses de la trayectoria de las rutas sin capacitores, con interruptor cerrado y sistema desbalanceado.	73
Tabla 5.5.1	Características esenciales del diseño del banco de capacitores en as cuatro rutas de estudio.	78
Tabla 5.6.	Comportamiento de Voltaje en los buses de cada trayectoria de las rutas con o sin capacitores, con interruptor cerrado y sistema balanceado.	78
Tabla 5.7.	Comportamiento de THD_V y HD_V en los buses de cada ruta con o sin capacitores, con interruptor cerrado y sistema balanceado.	78



Tabla 5.8.	Comportamiento THDv & HDv de las rutas de manera independiente cuando se conecta el banco de capacitores en cada ruta.	80
Tabla 5.8.1	Parámetros calculados para el reactor del filtro.	84
Tabla 5.9.	Comportamiento del HD_{V5} y HD_{V7} en las cuatro rutas de estudio de a red con filtros.	84



INDICE DE FIGURAS		PAG
Figura 2.7.1.	Rectificador estático de seis pulsos.	19
Figura 2.7.2.	Amplitudes de corrientes armónicas teóricas y prácticas.	20
Figura 2.7.3	Arreglo típico de un controlador de CA.	21
Figura 2.7.4	Frecuencia ajustable suministrada por un inversor.	22
Figura 2.7.5	Rectificador trifásico de seis pulsos con la inductancia del sistema de CA.	22
Figura 2.7.6	Corriente en el lado CA de un convertidor de seis pulsos y su espectro armónico.	23
Figure 3.1.	Resonancia Serie.	25
Figure 3.1.2.	Resonancia Paralela.	26
Figure 3.1.3.	Resonancia Distribuida.	27
Figura 3.2.1.	a) filtro en derivación; (b) filtro de bloqueo ó serie.	30
Figura 3.2.3.	Filtro en derivación: (a) diagrama esquemático (b) impedancia característica vs. Frecuencia	31
Figura 3.3.1.	Filtro de doble sintonía; (a) diagrama esquemático y (b) característica de impedancia vs. Frecuencia	32
Figura 3.3.2.	Filtro paso altas de 2º orden; (a) diagrama esquemático y (b) característica de impedancia vs. Frecuencia.	34
Figura 3.3.3.	Filtros paso altas; (a) de 1 ^{er} orden (b) 3 ^{er} orden; (c) tipo c.	34
Figura 3.4.1.	Circuito equivalente del sistema de potencia y filtro.	35
Figura 3.5.1.	Típico transformador delta-estrella aterrizado para usuarios industriales y comerciales.	37
Figura 3.5.2.	Arreglo dos puentes de 6 pulsos que alimentan al motor.	38
Figura 3.5.3.	Diagrama esquemático de un convertidor de 24 pulsos.	39
Figura 3.5.4	Corrientes Armónicas Generadas por el SVC en función varios ángulos de retardo en el control.	40
Figura 3.5.5.	Corriente armónica de 3 ^{er} orden inyectada a la forma de onda	41



	Cuadrada de un rectificador para reducir el contenido armónico.	
Figura 3.5.6.	Diagrama esquemático que muestra la fuente de corriente armónica de tercer orden conectado al neutro del sistema.	42
Figura 4.1.	Red Completa Kimberley de Puebla.	44
Figura 4.5.3	Modelo del transformador de dos devanados.	52
Figura 4.5.4	Modelo del transformador de dos devanados para el análisis de armónicos.	52
Figura 4.5.5	Modelo general de la maquina inducción.	53
Figura 4.5.6	Modelo del motor de inducción con el controlador.	53
Figura 4.5.7	Modelo del convertidor de Vcd a Vca.	53
Figura 4.5.8	Modelo de la impedancia del rotor del motor jaula de ardilla con efecto de desplazamiento de la corriente.	54
Figura 5.1.2.	Diagrama Unifilar de las Rutas de estudio para el análisis de armónicos.	56
Figura 5.1.3.	a) Comportamientos armónicos del bus. b) de la carga. c) de las líneas.	59
Figura 5.1.4.	Comportamiento de las frecuencias resonantes en el estudio de barrido de frecuencia.	59
Figura 5.2.1.	Comportamiento armónico en el bus de 0.48 kV en la ruta1, con otra carga cuyo espectro armónico es diferente al de la fuente generadora de armónicos.	62
Figura 5.3.1.	Comportamiento de HD_V en los buses de la trayectoria de la ruta 1 sin capacitores y sistema balanceado.	66
Figura 5.3.2.	Comportamiento HD_V en los buses de la trayectoria de la ruta 1, con línea paralelas al bus de la carga y sistema balanceado.	67
Figura 5.3.3.	Comportamiento de HD_V en los buses de la trayectoria de la ruta 2 sin capacitores y sistema balanceado.	68
Figura 5.3.4.	Comportamiento de HD_V en los buses de la trayectoria de la ruta 3 sin capacitores y sistema balanceado.	70
Figura 5.3.5.	Comportamiento de HD_V en los buses de la trayectoria de la ruta 4 sin capacitores y sistema balanceado.	70
Figura 5.3.6.	Comportamiento de HD_V en los buses de la trayectoria del bus general sin capacitores y sistema balanceado.	71



Figura 5.3.7.	a) Espectro Armónico en el Bus de la ruta 2 de 0.48 kV con 3 motores de 1100 Hp, con tiempos de operación alternos. b) y c) Espectros Armónicos en los Buses de 13.8 KV de la misma ruta 2 y con interruptor de amarre cerrado y con el horno de arco eléctrico.	72
Figura 5.4.1.	Comportamiento HD_V en el bus general sin capacitores y sistema desbalanceado sec (+).	74
Figura 5.4.2.	Comportamiento de HD_V en la trayectoria de la ruta 1 sin capacitores y sistema desbalanceado sec (+).	75
Figura 5.4.3.	Comportamiento de HD_V en la trayectoria de la ruta 2 sin capacitores y desbalanceado sec (+).	75
Figura 5.4.4.	Comportamiento HD_V de la trayectoria de la ruta 3 sin capacitores, y sistema desbalanceado sec (+).	76
Figura 5.4.5.	Comportamiento de HD_V de la trayectoria de la ruta 4 sin capacitores y sistema desbalanceado sec (+).	76
Figura 5.5.1	Frecuencia Resonante de 5 ^a armónica de la ruta 1 conectando un capacitor a 480 Volt.	81
Figura 5.5.2.	Frecuencia Resonante de 5 ^a armónica de la ruta 2 conectando un capacitor a 480 Volt..	81
Figura 5.5.3.	Frecuencia Resonante de 7 ^a armónica de la ruta 2 conectando un capacitor a 480 Volt..	82
Figura 5.5.4.	Frecuencia de Resonancia a la 5 ^a armónica con el capacitor en la ruta 2 a 13.8 kV, lado del usuario.	82
Figura 5.5.5.	Comportamiento del HD_V en la ruta 2 con los filtros en las rutas [1,2,3,4] en cada bus.	58
Figura 5.5.6.	Barrido de Frecuencia en los niveles de voltaje de 0.48 kV y 13.8 KV de la ruta 1.	86
Figura 5.5.7.	Comportamiento del HD_V en la ruta 2 con los filtros en las rutas [1,2,3,4] en cada bus.	87
Figura 5.5.8.	Barrido de Frecuencia en los niveles de voltaje de 0.48 kV y 13.8 KV de la ruta 2.	87
Figura 5.5.9.	Comportamiento del HD_V en la ruta 3 con los filtros en las rutas [1,2,3,4] en cada bus.	88
Figura 5.6.	Barrido de Frecuencia en los niveles de voltaje de 4.16 kV y 13.8 KV de la ruta 3.	88
Figura 5.6.1.	Comportamiento del HD_V en la ruta 4 con los filtros en las rutas [1,2,3,4] en cada bus.	89



Figura 5.6.2.	Barrido de Frecuencia en los niveles de voltaje de 4.16 kV y 13.8 KV de la ruta 4.	89
Figura 5.6.3.	Comportamiento del bus general de 13.8 kV y 115 kV, con filtros en las rutas [1,2,3,4].	90
Figura 5.6.4.	Barrido de Frecuencia en los niveles de voltaje de 13.8 KV y 115 KV del bus general.	90



GLOSARIO DE TERMINOS

h_{th}	Orden armónico de la magnitud.
λ	Longitud de onda a la frecuencia fundamental.
l_i	Longitud de la línea i.
h	Armónicas características de un convertidor.
k,n	Numero entero del dispositivos convertidor: 1, 2,3,....
q	Número de pulsos del circuito.
F_h	Frecuencia armónica en la corriente de la línea de CA.
F_{sis}	Frecuencia del sistema.
C_o	Valor DC de la función.
C_n	Valor pico de la componente n-armónicas.
θ_n	Angulo de fase.
R_{CA}	Resistencia alterna equivalente.
R_p	Resistencia Paralelo.
R_s	Resistencia Serie.
φ	Angulo de fase fundamental o armónicas.
δ	Angulo de desfasamiento de la corriente respecto al voltaje.
P_t	Magnitud de la potencia real total en rms.
P_c	Valor de las pérdidas del cobre.
Q_o	Potencia reactiva fundamental.
R_h	Resistencias fundamentales o armónicas.
X_{lh}	Reactancia inductiva fundamental o armónicas. Secuencia angular del sistema del alimentador.
X_{Ch}	Reactancia capacitiva fundamental o armónicas.
L	Inductancia.
C	Capacitancia.
G	Conductancia.
B	Subceptancia
X_d	Reactancia subtransitoria del eje directo.
X_q	Reactancia subtransitoria del eje en cuadratura.
p	Número de polos.
F_o	Frecuencia fundamental.
Z_h	Impedancia equivalente de la línea fundamental o armónicas.
Y_h	Admitancia equivalente de la línea fundamental o armónicas.
Z_h	Matriz impedancia armónica del sistema.
Y_h	Matriz de admitancia armónica del sistema.
V_h	Vector del voltaje armónico de orden n para cada bus.
I_h	Vector de medido o estimado de corriente de armónicos.
X_s	Reactancia Serie.
X_p	Reactancia Paralelo.
PB	Paso banda.
h_r	Orden armónico de frecuencia resonante.
X_{LF}	Reactancia inductiva a la frecuencia resonante.
X_{CF}	Reactancia capacitiva a la frecuencia resonante.
R_F	Resistencia del filtro.
X_{FR}	Reactancia del filtro a la frecuencia de resonancia.
P_m	Potencia promedio.
CD	Corriente Directa.
CA	Corriente Alterna.
P	Potencia Real.
Q	Potencia Reactiva.
BUSGEN	Bus General de la red en 13.8 kV.



BSG	Bus general.
RTi	Ruta n de Estudio de armónico, donde $n = 1,2,3,4$.
Zth	Impedancia equivalente de Thevenin.
S_n	Potencia Aparente.
S	Potencia Nominal de la carga no lineal.
KVA	Kilo Volt-Amperes.
V	Voltaje.
I	Corriente.
V_{bus}	Voltaje de nodo o bus.
V_{rms}	Voltaje rms.
V_n	Voltaje de fase neutro.
V_{LL}	Voltaje entre línea o fases.
Vp.u	Voltaje en por unidad.
I_{rms}	Corriente rms.
MVAcc _i	Potencia de Cortocircuito en el nodo i.
MVARcap	Potencia Nominal del capacitor.
Qc	Potencia reactiva del capacitor.
Q_f	Factor de calidad del filtro.
Q_{sis}	Factor de calidad del pico resonante.
ICC _i	Corriente de cortocircuito trifásico en el nodo i.
Ic	Corriente Nominal del capacitor.
KVA _T	Potencia Nominal del transformador.
Z_T	Impedancia del transformador.
F_R	Frecuencia resonante.
Pi	Potencia Real en el nodo i.
Qi	Potencia Reactiva en el nodo i.
F.P	Factor de potencia.
Cos(α)	Factor de potencia.
V_h, I_h	Orden h-th de voltaje y corriente armónico.
HDvn	Distorsión Individual de Voltaje.
HDin	Distorsión Individual de Corriente.
THDv	Distorsión Total de Voltaje en el bus.
THDi	Distorsión Total de Corriente en el Alimentador.
TDD	Distorsión de la demanda Total.
Pf_{tot}	Factor de potencia Total.
PCC	Punto de acoplamiento común.
pf_{dist}	Factor de Potencia de Distorsión.
EHV	Red de Alto Voltaje.
HVDC	Alta tensión de corriente directa.
U.I.E	Unidad de Ingeniería Especializadas,
CFE	Comisión Federal de Electricidad.



CAPITULO 1

INTRODUCCION

En este capítulo se exponen las generalidades, objetivos, justificaciones, descripción de problemas, estados del arte, aportaciones y la estructura de la tesis. Se realiza una breve reseña de los elementos empleados en la solución del problema, se plantean las metas y hacia dónde va enfocado el trabajo y finalmente se describe la estructura del trabajo por capítulos.

1.1 GENERALIDADES

En los recientes años los esfuerzos considerables, para resolver la problemática que implica la existencia de armónicos en la red, que ha derivado en el estudio de la calidad energía de las compañías suministradoras de electricidad a un sistema eléctrico, usando indicadores de confiabilidad para proporcionar el servicio en los sistemas eléctricos.

Hoy, sin embargo, los muchos consumidores de electricidad son afectados por las perturbaciones de voltaje más sutiles como la distorsión de la forma de onda senoidal del voltaje y la corriente causado por los armónicos. Por consiguiente, la expectativa del nivel de distorsión debido a los armónicos es una de las mayores preocupaciones en la calidad de energía que afecta a la industria en la potencia eléctrica.

Uno de los factores principales que generan los armónicos es, en respuesta al incremento de sensibilidad del uso de equipo, para proporcionar un mayor porcentaje de eficacia de energía eléctrica y la flexibilidad ofrecida por dichos dispositivos electrónicos de potencia.



Los dispositivos de electrónica de potencia (convertidores estáticos de potencia reactiva (VAR's), controladores de velocidad (ASD's), equipo de control, soldadoras, hornos de arco y de inducción, lámparas de arco y electrónicas), presentan un problema a cubrir con respecto al armónico. No sólo ellos producen el armónico, sino también son afectados por la misma distorsión resultante o de algún otro equipo generador de armónicos.

El problema no solo puede afectar al usuario del equipo generador de corrientes de armónicos, sino que a través de la línea de distribución y/o transmisión puede propagarlo a otros usuarios conectados en el punto de acoplamiento común (PAC).

Como consecuencia de los problemas de los armónicos y otras consideraciones de calidad, se está poniendo un mayor énfasis en estudiar el comportamiento y el impacto que se tiene por la circulación de los armónicos en una red. Por medio de un análisis de flujo armónicos en todo lo largo de los sistemas de distribución y transmisión, estableciendo índices que cuantifiquen las distorsiones de voltaje y corriente contables a niveles tolerables.

Para llevar acabo esto, se requiere de la selección de modelos que representen un componente de la red, los cuales dependerán de la exactitud deseada, en la disponibilidad de datos y en el rango de frecuencia considerada para propósito de estudio, cuyo fin es determinar los flujos de corrientes armónicas, voltajes armónicos en los buses, factores de distorsión de voltaje y corriente.

Lo anterior implica que en los estudios de armónicos, se deben realizar en estado estable y balanceado, con el fin de obtener los parámetros de diseño para capacitores, filtros pasivos. Para lograr los flujos de corrientes y voltajes armónicos se utilizara la matriz de impedancia, calculando el flujo armónico mediante la inyección de corrientes armónicas, las cuales son determinadas en función de la red.



Una alternativa aprovechada para análisis no lineal en estos programas, es la consideración de cada uno de los elementos de sistemas, obtenidos de la matriz de impedancia a cada frecuencia. Posteriormente se calculan los factores de distorsión de los nodos por medio de la Transformada Rápida de Fourier [2] y elementos que se requieran para la solución de los mismos.

En general se trabajó con dos programas digitales (Easy-Power y Digsilent) en donde se analizó las condiciones del sistema eléctrico ante la presencia de armónicas utilizando sus propios modelos, estos programas tienen la posibilidad de caracterizar las fuentes generadoras de armónicas dependiendo del problema analizar y así determinar el impacto o la influencia que tiene en toda la red, además con los resultados obtenidos se podrá hacer una comparación adecuadas con prueba reales realizadas por Comisión Federal de Electricidad y así establecer un nivel de exactitud en sus programas al momento de la simulación de sistemas eléctricos industriales reales con la inserción de capacitores y filtros.

1.2 OBJETIVOS DE LA TESIS

-El objetivo de la tesis, es evaluar las condiciones operativas realizadas del lado de baja tensión como de alta tensión de una red ante la presencia de armónicos, generadas por los controladores de motores de inducción y que son transmitidas en toda la red y hacia otras cargas vecinas, desde la carga generadora de armónicos.

-Proponer una metodología de solución adecuada con fines reales llevados a la práctica, para mitigar los problemas de los armónicos en la red y evitar el uso excesivo de los filtros pasivos en los sistemas eléctricos.

-Comparar la diferencia en los resultados de valores teóricos obtenidos por las simulaciones de Digsilent, Easy-Power y los resultados reales de las mediciones de campo obtenidos de la red, con el fin de proporcionar modelos reales en el análisis de armónicos, para futuros trabajos de Comisión Federal de Electricidad en baja tensión.



1.3 JUSTIFICACIÓN

Las compañías suministradoras no pueden hacerse a la idea de que los disturbios (armónicos) ocasionados por un consumidor no afectan a otros consumidores y a la misma red de suministro. Por lo tanto se requiere analizar el comportamiento y el impacto de la distorsión de armónicos en los nodos y alimentadores de un sistema eléctrico industrial, tanto en el lado del usuario como de la compañía suministradora.

También el hecho de que para entrar en el mercado internacional, tendrán que actualizarse en la tecnología de electrónica de potencia (generadores de armónicos) para los elementos y equipos eléctricos que ayuden a un adecuado funcionamiento de la red y la aplicación de técnicas de solución correctas y con un costo económico bajo, para resolver estos problemas.

Otra consideración, es el incremento en el uso de capacitores para compensación de reactivos. Esto introduce la posibilidad de presentar resonancias con mayor frecuencia entre los elementos inductivos de la red y las reactancias capacitivas de elementos vecinos, lo cual puede generar la amplificación de las corrientes armónicas.

En el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Sección de Estudios de Posgrado, ESIME-ZACATENCO, no se cuenta con una bibliografía extensa referente al análisis de armónicos en los sistemas eléctricos. Los estudios relacionados con el análisis de armónicos, son escasos y los pocos que se tienen, se han enfocados principalmente en buscar métodos para el estudio de la formulación y resolución del problema de flujos armónicos de cargas[43], aportaciones al estudio del flujo armónico de cargas [44], Formulación Trifásica Multifrecuencias para estudios de redes eléctricas en estado estable [42], análisis para la propuesta de filtros de las armónicas en los sistemas eléctricos [45], por mencionar algunos]. Por esta razón, la finalidad de este trabajo es ofrecer alternativas prácticas en sistemas reales, para controlar, mitigar las distorsiones de armónicas para una mejor efectividad en el funcionamiento del mismo y que se sujeta a las necesidades propias de un sistema en general.



1.4 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En un sistema eléctrico ideal la energía generada y suministrada con ondas de voltaje y corriente, son senoidales a una sola frecuencia, pero en los sistemas reales lo anterior no es aplicable, ya que existen elementos internos y externos a la red eléctrica, que producen distorsiones armónicas de corrientes y posteriormente de Voltajes. La generación de estos armónicos se debe a la proliferación de dispositivos de electrónica de potencia en los sistemas eléctricos. También el hecho de que existen otros factores que contribuyen de manera indirecta como son; las condiciones precarias de sus instalaciones, la falta de un mantenimiento correctivo y preventivo, condiciones climáticas (descargas) que incrementan la inyección de estas corrientes.

Normalmente, el análisis de flujos armónicos se realiza en el dominio de la frecuencia. Para obtener una respuesta característica de una red en función de la frecuencia fundamental para después obtener las frecuencias armónicas de todos nodos de la red, a partir de la potencia activa, reactiva, voltaje y demás datos que determinen el comportamiento de dichos dispositivos no lineales.

Con el objetivo de poder comprender el impacto de los armónicos en el sistema, se requiere aplicar estudios flujos de cargas para la utilización de capacitores en la compensación de reactivos, barrido de frecuencia para conocer la frecuencia que podrían generar una resonancia y un estudio de flujo de armónicos enfocados principalmente en los niveles de voltaje en cada nodo y la corriente en los alimentadores a frecuencias mayores de 60 hertz y menores de 1500 hertz.



1.5 ESTADO DEL ARTE

Los Armónicos no es un fenómeno nuevo en un sistema eléctrico, pero desde tiempo atrás se ha tenido conocimiento de la presencia de armónicos en las redes eléctricas, los cuales producían pequeñas distorsiones que eran generadas por causas internas debida al diseño y punto de operación del sistema. En esos tiempos también las distorsiones eran causadas por la saturación magnética de los transformadores o por ciertas cargas de tipo industrial, tales como hornos de arco eléctrico o soldadoras, motores, generadores y otras cargas [12, 29, 32, 33, 38]. Una solución ante esos problemas de armónicos, era construir equipos más robustos y reduciendo el acoplamiento magnético entre circuitos.

A principios de los 70's, se fue acentuando mas el problema de armónicos con el uso de dispositivos semiconductores y de convertidores estáticos de potencia, estos últimos con el fin de ajustar las velocidades de motores eléctricos en diferentes actividades en la industria. Sabiendo que estos dispositivos generaban corrientes armónicas, estos tenían un efecto mínimo en el sistema y sin causar problema alguno. Sin embargo, la introducción de rectificadores de bajo costo y alta eficiencias en 1973, vino a incrementar enormemente la inyección de armónicos en el sistema.

Hoy en día, este crecimiento de los dispositivos electrónicos de potencia, por ejemplo; Los variadores de velocidad, que es un control para el motor de inducción que energiza, proteger y permite la variación de la velocidad en el mismo, sin ningún accesorio entre el motor y la carga y cuya ventaja principal, es que disminuyen los consumos de energía eléctrica en algunos de los procesos que controla, dando como resultado considerables disminuciones de costos de operación. Con el fin de ofrecer mayor ahorro de energía, utilizan las tecnologías de motores y esquemas de control alternativos que comúnmente para el accionamiento de motores de corriente alterna utilizan los convertidores de potencia como pueden ser el rectificador y el inversor, que son una principal fuente de armónicos.



En lo que respecta a metodologías empleadas para los estudios de los armónicos, estas pueden ser manejadas en el dominio del tiempo, en el dominio de las frecuencias y Metodologías Híbridas, es decir, en el dominio de la frecuencia y el tiempo [20, 24, 39].

La metodología empleada en el **Dominio Armónico o dominio de la frecuencia**, está basado en un proceso de linealización alrededor de un particular punto de operación de componentes no lineales y variantes en el tiempo. Se obtiene así una relación lineal entre voltajes y corrientes armónicas. Esta condición es válida únicamente en una proximidad muy cercana al punto de operación. Como resultado del proceso de linealización se obtiene un equivalente Norton armónico en donde explícitamente está representado el efecto de acoplamiento entre armónicos y desbalance entre fases.

El cálculo de dicho equivalente puede no ser fácil y para obtener resultados precisos debe ser actualizado iterativamente. Este esfuerzo computacional se incrementa en proporción directa al tamaño del sistema analizado y al número de armónicos representados explícitamente. La solución iterativa unificada del sistema es de la forma;

$$\Delta I = [Y]\Delta V \quad (1)$$

Donde ΔI es el vector de corrientes incrementales, que contiene la contribución de componentes no lineales, ΔV es el vector de voltajes incrementales y $[Y]$ es la matriz de admitancias de componentes lineales y no lineales. Estas últimas corresponden en cada caso al equivalente Norton armónico obtenido.

Metodología en el Dominio del Tiempo. Es este la descripción general de elementos no lineales y variantes en el tiempo se realiza en función de la ecuación diferencial siguiente;

$$\dot{X} = f(x,t) \quad (2)$$

Donde x es el vector de estados de n elementos. La ineficiencia de la solución convencional de la ecuación anterior, es mediante algún proceso de integración numérica, tal como el Runge-Kutta, ha imposibilitado su aplicación generalizada

para obtener la solución periódica en estado estacionario de sistemas eléctricos con componentes no lineales y variantes en el tiempo, aún cuando en principio y en ausencia de inestabilidad numérica este proceso conduce a su solución precisa o “exacta.”

Método Híbrido. Las ventajas esenciales de los dominios de la frecuencia y del tiempo se utilizan en la metodología híbrida, en donde los componentes del sistema de potencia se representan directamente en sus marcos de referencia naturales. Es decir, los lineales en el dominio de la frecuencia y los no lineales y variantes en el tiempo en el dominio del tiempo, aplicando en estos últimos las técnicas de aceleración al Ciclo Limite descritas previamente para la eficiente determinación de su estado estacionario periódico.

La Figura 1. ilustra la representación conceptual de la metodología híbrida. Los voltajes V en los nodos de carga en que los componentes no lineales se encuentran conectados se obtienen iterativamente.

Partiendo de valores estimados de V se calculan las corrientes I_L de la parte lineal para cada armónico h utilizando $[Y_K]$. Para la parte no lineal, V se considera en el dominio del tiempo como la función periódica $v(t)$ para obtener $I(t)$, la cual es transformada a I_N en el dominio de la frecuencia. La solución iterativa para todo el sistema es de la forma de la Ecuación $\Delta I = [Y]\Delta V$. En convergencia $\Delta Y = I_L + I_N$ tiende a cero.

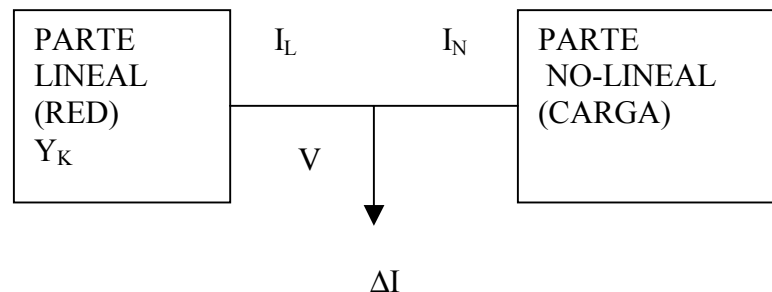


Figura 1. Sistema visto desde los nodos de las cargas.



Actualmente, los trabajos de tesis referente a estudio de flujos armónicos en sistemas eléctricos, son pocos [39,42, 43, 44], debido estrictamente a la etapa de modelación de las cargas no-lineales que es un campo en experimentación, esto es por que no se cuenta con una variedad de modelos reales para utilizar, algunos modelos reales certificados para utilizar son; los modelos de las IEEE, IEC Y CIGRE.

1.6 APORTACIONES

Proponer un planteamiento para llevar a cabo en a la practica en los sistemas industriales de baja tensión, el cual se fundamenta bajo normas especificas, sujeto a las condiciones del propio sistema, dando una solución efectiva y económica a la problemática que se tiene en un sistema real, por la circulación de armónicos. Así como exponer ciertas carencias y diferencias que hay en los programas comerciales como la limitada disponibilidad de utilizar modelos reales de cargas no-lineales, para el análisis de armónicos y de la efectividad que estos tienen.



1.7 ESTRUCTURA DE LA TESIS

En el primer capítulo, se presenta un breve resumen del contenido de este trabajo como son; objetivos, justificación, descripción del problema, estado del arte y capitulado que persigue esta tesis.

En el capítulo 2, se presenta una introducción breve referente al origen, efecto y fuentes principales de los armónicos tanto en los elementos que integran un Sistema Eléctrico, la teoría básica de los conceptos, definiciones de cantidades armónicas más relevantes para el análisis de armónicos, así como descripción general de controladores de velocidad.

En el capítulo 3, se realiza una descripción referente a las técnicas, aplicación, diseño y usos de filtros para mitigar las armónicas, así como otras técnicas de reducción de armónicos.

En el capítulo 4, Se describe el planteamiento utilizado para describir la metodología. Además, los modelos que utilizan los programas de simulación.

En el capítulo 5, se presenta los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas al sistema eléctrico de prueba con presencia de armónicos, por medio de los programas comerciales.

En el último capítulo, se presenta las conclusiones respecto a los objetivos planteados en este capítulo, así como recomendaciones y aportaciones en trabajos futuros. Los apéndices 1, 2, 3, 4 complementan la información necesaria(notas, tablas y graficas) para este trabajo.



CAPITULO 2

**ORIGEN Y EFECTO DE LOS
ARMÓNICOS****2.1 ORIGEN DE LOS ARMÓNICOS**

En un sistema eléctrico, los aparatos y equipos que se conectan a él, tanto por la propia empresa así como por los clientes están diseñados para operar 60 Hertz, con una tensión y corriente senoidal. Por diferentes razones, se puede presentar un flujo eléctrico a otras frecuencias diferentes de 50 o 60 Hertz, conocidos como **Armónicos** que son normalmente definidos como las distorsiones periódicas de la forma de onda de voltaje y/o corrientes de un estado estable en los sistemas eléctricos.

El efecto principal causado por los armónicos consiste en la aparición de voltajes no senoidales en diferentes puntos del sistema. Estos son producidos por la circulación de corrientes distorsionadas a través de las líneas. La circulación de estas corrientes provoca caídas de voltaje deformadas que obliga en los nodos del sistema, no lleguen voltajes puramente senoidales. Mientras mayores sean las corrientes armónicas circulantes a través de los alimentadores de un sistema eléctrico, más distorsionadas serán los voltajes en los nodos del circuito y más agudos los problemas que pueden presentarse por esta causa.

En general, los armónicos son producidos por cargas no-lineales, lo cual significa que su impedancia no es constante (está en función de la Frecuencia). Estas cargas no-lineales a pesar de ser alimentadas con una tensión senoidal absorben una intensidad no senoidal, donde puede estar la corriente desfasada un ángulo δ respecto a la tensión, pudiendo considerarse como fuentes de intensidad que inyectan armónicos en la red. En la mayoría de los casos los armónicos son un disturbio en estado estable, por lo que no se deben confundir con fenómenos transitorios [34].



2.2 FUENTES DE ARMÓNICOS

Las fuentes principales de armónicos dentro de los sistemas de potencia convencional se resumen abajo[12].

1. Dispositivos que involucran el switcheo electrónico: Equipos de Electrónica de potencia que utiliza el proceso de switcheo en los dispositivos.
2. Dispositivos con las relaciones voltaje-corriente no-lineal, es decir, cuando se excita con un voltaje de entrada periódico donde la curva V-I No-linear lleva a la generación de corrientes armónicas.
3. Dispositivos o elementos que tienen una impedancia dependiente de la frecuencia que pueden generar armónicos.

Un resumen breve del comportamiento de algunas fuentes generadoras de armónicas, se muestra en la tabla 2.1 [11,12].

Tabla 2.1. Clasificación de Fuentes Armónicas de acuerdo a la carga No-lineal [11,12,20].

ELEMENTO DEL SISTEMA ELECTRICO	CARACTERISTICA POR LA ARMÓNICA	ORDEN DE ARMONICA	SOLUCION PREVIA										
TRANSFORMADOR TRIFASICOS	Afecta la impedancia del transformador donde la onda senoidal no es simétrica con respecto a su valor máximo	La distorsión se debe a las armónicas 3,9,12, pero principalmente a la 3ª armónica. También se puede presentar la Ferrosresonancia debida a la Impedancia del transformador.	proporcionar una trayectoria para estas armónicas triples lo que generalmente se logra con una conexión en Δ -Y aterrizada										
MAQUINAS ROTATIVAS (MAQUINA DE INDUCCION Y SINCRONA)	La distorsión afecta a la Fuerza Magnetomotriz fundamental (f.m.m), donde se produce debido a la armónica en el tiempo que son dependientes de la velocidad.	La distorsión se debe a la 5ª, 7ª armónica principalmente.											
HORNO DE ARCO ELÉCTRICO	Por su gran gama de frecuencias, los niveles de armónicas varia en función del tiempo y a la misma componente fundamental.	De acuerdo con el porcentaje de distorsión respecto a la componente fundamental al inicio de la fundición tenemos <table style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <tr> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>7.7</td> <td>5.8</td> <td>2.5</td> <td>9.2</td> <td>3.1</td> </tr> </table>	2	3	4	5	7	7.7	5.8	2.5	9.2	3.1	
2	3	4	5	7									
7.7	5.8	2.5	9.2	3.1									
CONTROLADORES DE MOTORES DE CA	En este caso depende del controlador, esto es si es de 6-pulsos o 12 pulsos, también si tiene inversor y filtró capacitivo.	Para un controlador de 6-pulsos se tiene 5ª,7ª,11ª,13ª,17ª,19ª y si es de 12-pulsos tenemos orden de armónicas de 11ª,13ª,23ª,25ª especialmente.	Los controladores deben ser de un numero mayor de pulsos para generar armónicas de gran orden para no afectar demasiado la red.										
COMPENSADOR ESTATICO DE VAR'S	El comportamiento depende del sistema de control de cada compensador como el usar Tiristores en el sistema trifásico.		Se puede eliminar con la conexión de los tiristores en delta										



2.3 EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS

En los sistemas eléctricos, los Armónicos son a menudo usados para definir distorsiones de la onda senoidal, asociados con las amplitudes de corrientes y voltajes a frecuencias diferentes de la onda fundamental, que tienen efectos combinados sobre los equipos y dispositivos conectados a las redes de distribución [8, 29, 38].

Entre estos efectos, se pueden mencionar la reducción de la vida útil del equipo así como la degradación de su eficiencia y mal funcionamiento de los elementos (conductores, alimentadores, transformadores, subestaciones y las cargas.) de un sistema eléctrico en general. Otras características del efecto armónico con otros dispositivos del sistema eléctrico [12, 30,38], se muestran en la tabla 2.2. Los efectos perjudiciales de estos armónicos dependen del tiempo de la carga instalada como son los efectos instantáneos y a largo plazo.

2.4 ALGUNOS DE LOS EFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN DISPOSITIVOS ELÉCTRICOS DE POCA CORRIENTE

Las corrientes armónicas provocan en los nodos de alimentación, voltajes armónicos que afectan a dispositivos electrónicos más sensibles. Cuando los conductores de baja intensidad o de transmisión de datos, están muy próximos a cables de gran potencia por los que circulan corrientes armónicas, por medio de inducción pueden ser receptores de estas corrientes, provocando fallas en el funcionamiento de los elementos conectados a ellos o de los diversos equipos que no quedan a una misma tensión.

Además, hay circulación de corrientes por las estructuras metálicas de los edificios y por consecuencia hay la existencia de campos electromagnéticos perturbadores. Por último, la circulación de corrientes armónicas por el neutro provoca una caída de tensión elevada en el conductor [8, 12,18].



Tabla 2.2. Algunos Efectos generales que ocasionan los armónicos sobre los Dispositivos Eléctricos de una red [20, 29]].

DISPOSITIVO	EFFECTOS DE LOS ARMÓNICOS	CONSECUENCIAS
LOS CONDUCTORES (líneas, cables)	<p>-Las intensidades armónicas provocan el aumento de la I_{RMS}.</p> <p>-El efecto corona (efecto piel) reduce la sección efectiva de los conductores a medida que aumenta la frecuencia.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Disparos intempestivos de las protecciones. ◆ Sobrecalentamiento de los conductores.
EL CONDUCTOR DEL NEUTRO	<p>-Cuando se tiene un sistema de trifásico mas el neutro (4 hilos) equilibrado, genera armónicos impares múltiplos de 3 orden.</p> <p>-Bajo condiciones de desbalance, el neutro común lleva corrientes armónicas comprendidas por las corrientes de secuencia positiva y secuencia negativa procedente del desbalance del sistema y las corrientes aditivas de secuencia cero procedente de los armónicos triples.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Cierre de los armónicos sobre el neutro que provoca calentamiento y sobrecorrientes. ◆ La barra del conductor neutro también puede sobrecargarse debido a los efectos de cancelación de las corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa entre los conductores que sirven a diferentes cargas. ◆ Las corrientes armónicas de secuencia positiva y negativa, asumiendo cargas balanceadas, se cancelan en cualquier punto común de conexión.
LOS TRANSFORMADORES	<p>-Provoca un incremento de la resistencia del conductor con la frecuencia,</p> <p>-La circulación de corrientes armónicas monofásicas y trifásicas de secuencia positiva y negativa transportadas en los conductores de fase provenientes de cargas generadoras y la circulación de las corrientes armónicas triples de secuencia cero que son transportadas en los conductores neutros desde las cargas no-lineales generadoras de armónicos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Aumento de temperatura por efecto Joule en los devanados. También habrá un incremento de las pérdidas por histéresis y las corrientes de Eddy o Foucault en el circuito magnético. ◆ Aumento de las perdidas en el cobre. ◆ Las Corrientes armónicas de frecuencias más altas provocan pérdidas de núcleo incrementadas en proporción al cuadrado de la corriente de carga rms y en proporción al cuadrado de frecuencia debido al efecto corona.
LOS MOTORES	<p>Se tienen pérdidas suplementarias en el estator (cobre y hierro) y principalmente en el rotor (devanado de amortiguamiento, y circuito magnético) de las máquinas causadas por la diferencia considerable en velocidad entre el campo rotatorio inducido por los armónicos y el rotor y perdidas de rendimiento.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Causa pérdidas por efecto joule y generación de un campo adicional en el estator.-Calentamiento debido a pérdidas adicionales en máquinas.
LOS CAPACITORES	<p>-Disminución de la impedancia del capacitor con el aumento de la frecuencia.</p> <p>-Excesivo voltaje a la frecuencia fundamental o a la presencia de tensiones armónicas.</p> <p>-Fenómeno de resonancia cuando hay la existencia de inductancias en algún punto de la instalación con los condensadores,</p> <p>-Ocasionar un calentamiento necesario para perforar el aislamiento de los capacitores, provocando daños severos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Envejecimiento prematuro de los condensadores. ◆ Pérdidas causadas por calentamiento debidas a dos fenómenos: conducción e histéresis en el dieléctrico El calor producido puede conducir rompimiento dieléctrico. Como una primera aproximación, ellas son proporcionales al cuadrado del voltaje aplicado para conducción y a la frecuencia para histéresis. ◆ Aumento de la amplitud de los armónicos existentes.



2.5 DEFINICIONES BÁSICAS DE CANTIDADES ARMÓNICAS

Convencionalmente, existen definiciones usadas para describir las cantidades eléctricas del estudio de sistema de potencia que operan senoidalmente en estado estable. Pero en un ambiente contaminado de armónico, la teoría que considera las cantidades eléctricas necesita ser redefinirlas para distinguir esas cantidades armónicas y adecuarlos a una frecuencia fundamental del mismo sistema eléctrico. En la Tabla 2.3 muestra el resumen de los índices más comunes para la evaluación de la calidad del voltaje [11].

Tabla 2.3. Índices más comunes para la evaluación de la calidad del voltaje.

<p>Valor RMS</p> $V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{h=1}^N V_h^2}$	<p>Distorsión armónica</p> $THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^N V_h^2}}{V_1} \cdot 100\%$
<p>Factor de potencia</p> $FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{rms} I_{rms}}$	<p>Factor de desbalance</p> $FD = \frac{ V_- }{ V_+ }$
<p>Potencia activa</p> $P = \sum_{h=1}^N \frac{V_h I_h}{2} \cos \theta_h$	<p>Factor cresta</p> $FC = \frac{V_{pico}}{V_{rms}}$
<p>Potencia aparente</p> $S = V_{rms} I_{rms}$	<p>Factor Flicker</p> $FF = \frac{\Delta V}{ V }$

Algunos de estos índices que indican la calidad del voltaje pueden ocasionar confusiones al momento de llevarlos a la práctica. Por ejemplo, el usar F.P. (verdadero) para el cálculo de bancos de capacitores, es una forma errónea de hacerlo, dado que ello podría llevar a empeorar al F.P. en lugar de corregirlo.

2.6 NORMATIVIDAD PARA CONTROL DE ARMÓNICOS

Los niveles de distorsión causados por los armónicos pueden ser caracterizados por el espectro completo de armónicos mediante magnitudes y ángulos de fase de cada componente armónico individual. Normalmente es común usar una medida como índice para la calidad de una forma de onda periódica como es la Distorsión Armónico Total (THD), en valor efectivo [APÉNDICE 2].

Existen ciertas recomendaciones para los límites de Distorsión de Voltaje, tabla 2.5, al igual que para los Límites de Distorsión de corriente en los sistemas de distribución, como se muestran en la tabla 2.6 y los límites de Distorsión de corriente para sistemas de Transmisión tabla 2. 7, a diferentes rangos de voltaje [11, 12,42]. La filosofía detrás de estas tablas es que el cliente deberá ser responsable de los límites de las corrientes armónicas de acuerdo con las tablas 2.5, tabla 2.6 y la empresa deberá ser responsable de los límites de voltajes armónicos de acuerdo con la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Límites de Distorsión de Voltaje (en % de V_1) [11].

Voltage PCC	MAGNITUD ARMONICA INDIVIDUAL (%)	THD _v (%)
≤ 69 kV	3.0	5.0
69-161 kV	1.5	2.5

Tabla 2.5. Límites de Distorsión de Corriente (en % de I_L) para Sistemas de Distribución (120-69,000 V) [11].

I_{sc}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤ h<35	35≤h	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0



Tabla 2.6. Límites de Distorsión de Corriente (en % de I_L) para Sistemas de Subtransmisión (69,001-161,000 V) [11].

I_{sc}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Las normas armónicas proporcionan las soluciones preventivas útiles al Armónico. Las recientes normas como IEEE 519-1992 [11] e IEC 1000-3-2 [20] enfatizan la colocación de límites de corrientes armónicas producidas por las cargas no lineales para clientes y buses de la red la distorsión de voltaje armónica para las utilidades eléctricas.

Las normas UNE-EN50160, enfatiza las tensiones armónicas individuales en los puntos de suministro de redes de distribución, hasta el armónico de orden 25, Como lo muestra la tabla 2.7.

Tabla 2.7. Valores de tensión armónicos individual en los puntos de suministro hasta el armónico 25, expresados en porcentaje de V_n .

ARMÓNICOS IMPARES				ARMÓNICOS PARES	
NO MÚLTIPLOS DE 3		MÚLTIPLOS DE 3			
ORDEN H	TENSIÓN RELATIVA	ORDEN H	TENSIÓN RELATIVA	ORDEN H	TENSIÓN RELATIVA
5	6%	3	5%	2	2%
7	5%	9	1.5%	4	1%
11	3.5%	15	0.5%	6...24	0.5%
13	3%	21	0.5%		
17	2%				
19	1.5%				
23	1.5%				
25	1.5%				



Los valores que corresponden a los armónicos de orden superior a 25, que son generalmente débiles e imprevisibles debido a los efectos de resonancia y no están indicados en esta tabla.

2.7 CONTROLADORES DE VELOCIDAD

Dentro de los dispositivos de electrónica más utilizados en los sistemas eléctricos, nos encontramos con los controladores de velocidad, ya gran parte de los equipos y procesos utilizados en la industria moderna funcionan a velocidades variables como es el motor de inducción cuya velocidad se logra con variadores de velocidad que son fuentes generadores de armónicos.

Muchos usuarios de motores eléctricos saben que los controladores de velocidad están basados en convertidores de potencia estáticos, que proveen alta eficiencia, un control de velocidad mas precisa y menor mantenimiento que otros tipos de controladores de velocidad. Por lo anterior, los controladores estáticos son ampliamente usados para todos los tipos de motores industriales. Aunque los motores industriales consumen el 30% de la potencia eléctrica total consumida, se pone mayor atención debido a la inyección de armónicas que los controladores estáticos generan.

Los controladores estáticos utilizan rectificadores monofásico o trifásicos para la variación de frecuencias. Existen diversos estudios que analiza el comportamiento de los rectificadores monofásico y trifásicos [11, 12, 23, 29,32], pero generalmente en el tratamiento de flujos armónicos, los estudios van fundamentalmente dirigidos a predecir las corrientes armónicas que estas cargas no lineales inyectan al sistema [18,34]. En base a estos trabajos realizados se determinó el espectro armónico generado por estos rectificadores es de acuerdo a la figura 2.7.1.

2.7.1 CONTROLADORES TRIFÁSICOS PARA MOTORES DE CD

Aunque prácticamente toda la energía eléctrica producida comercialmente es generada, transmitida y distribuida en potencia de alterna, una buena porción de esta energía es utilizada en la forma de CD. Motores de CD son usados por todas partes en la industria para muchas aplicaciones especiales, son preferidos sobre los de CA cuando la carga del motor requiere de un alto par. Los motores de CD operan a relativa baja velocidad, tales como laminadoras, grúas, perforadoras, propulsores de barcos y locomotoras eléctricas. En todas éstas aplicaciones el control de la velocidad es muy importante. Los motores deben funcionar a alguna velocidad, en dirección de las manecillas del reloj o en contra.

El circuito típico de los controladores se muestra en la Fig. 2.7.1, que es un simple rectificador estático de 6 pulsos, que alimenta voltaje de CD a la armadura del motor.

Históricamente el campo del motor fue conectado de la alimentación a la armadura con un reóstato para ajustar la corriente de campo (motor con campo en derivación), actualmente, el devanado de campo del motor es alimentado independientemente por un puente monofásico de onda completa. Este es el tipo más común de motores de CD usados en la industria.

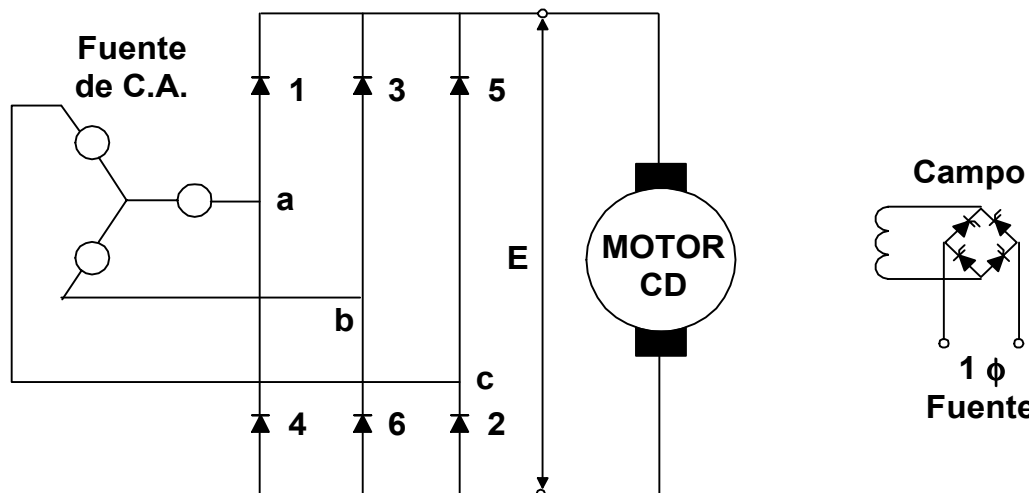


Figura 2.7.1. Rectificador estático de seis pulsos.

2.7.2 ARMÓNICAS GENERADAS POR CONTROLADORES DE MOTORES DE CD

Las corrientes armónicas generadas por este tipo de controladores de velocidad, son las mismas que aquellas generadas por el rectificador estático de seis pulsos. La 5^a, 7^a, 11^a y 13^a armónicas. Las magnitudes armónicas teóricas son iguales a 1 dividido por el orden armónico. Las magnitudes armónicas prácticas son reducidas como se muestra en la figura 2.7.2, por que la inductancia en el sistema de CA. Tiende a redondear las esquinas de los pulsos de corriente.

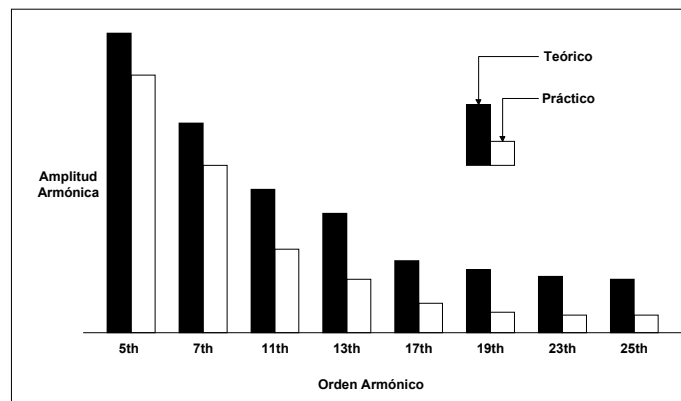


Figura. 2.7.2. Amplitudes de corrientes armónicas teóricas y prácticas [32].

2.7.3 CONTROLADORES DE MOTORES DE CA

Los controladores de velocidad de motores de CA son también usados en la industria, de hecho, los motores de inducción trifásicos son los más frecuentemente encontrados. Mientras los motores de CD. se prefieren cuando se requieren bajas velocidades y altos pares, los motores de CA se emplean en aplicaciones de alta velocidad tales como bombas, ventiladores y compresores. Estos motores de inducción típicamente operan a velocidades de 1200, 1800, 3600 rpm. y mayores. Los motores de CA son generalmente más robustos, requieren menos mantenimiento y son más baratos que los motores de CD.

La velocidad del motor de CA es usualmente controlada por el ajuste del voltaje y la frecuencia, esto puede ser realizado con un controlador de C. de voltaje ajustable y frecuencia ajustable. El controlador de la fig. 2.7.3 consiste de un rectificador e inversor trifásico de seis pulsos conectado por un enlace de CD. un reactor de amortiguamiento y un gran filtro son incluidos en el enlace de CD. Este provee un voltaje a la sección inversora. El rectificador es conectado a la alimentación trifásica y el inversor a la armadura (localizada en el estator) del motor de inducción trifásico. Este tipo de convertidor es a menudo referido como un convertidor de enlace de CD.

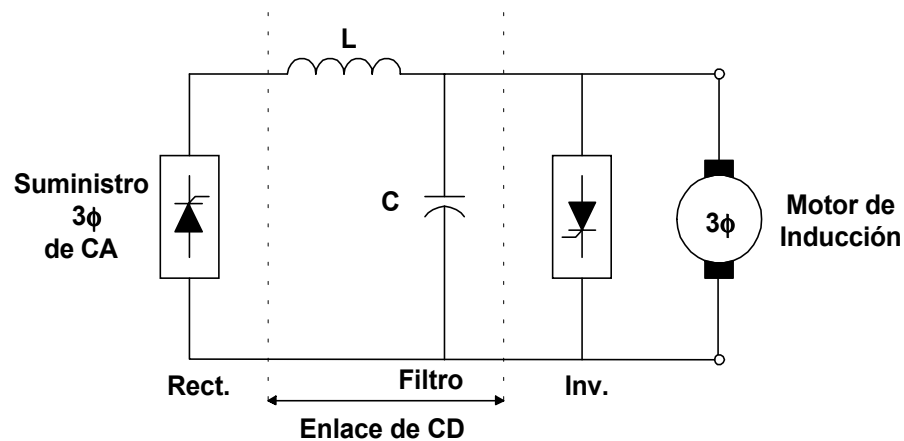


Figura. 2.7.3 Arreglo típico de un controlador de CA.

El voltaje ajustable es suministrado por el rectificador, mientras la frecuencia ajustable por la sección inversora mostrada en la fig. 2.7.4. El inversor es capaz de generar su propia frecuencia porque es un inversor de conmutación forzada. Los elementos necesarios para la conmutación están incluidos dentro del mismo inversor.

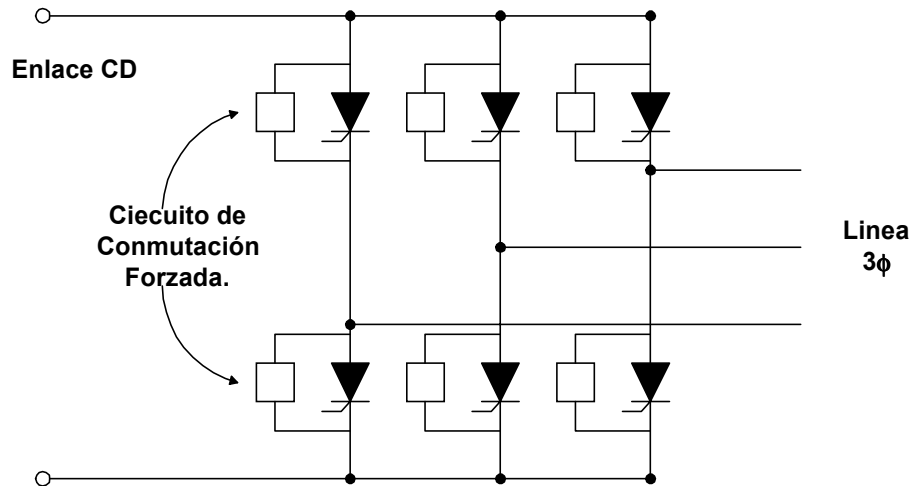


Figura. 2.7.4 Frecuencia ajustable suministrada por un inversor

Durante el funcionamiento normal de estos equipos, aparecen armónicas de tensión y/o corrientes en las redes. Para el caso de los rectificadores se generan armónicos en el lado alterno del orden; $h = k p \pm 1$.

2.7.4 Rectificador de 6 pulsos

En la figura 2.7, se presenta el circuito típico de entrada típica en CA de un rectificador de 6 pulsos alimentado por un transformador Y-Y [28, 29] de un rectificador trifásico de 6 pulsos, así como la forma de onda resultante Figura 2.7.1 y la magnitud de inyección de sus corrientes armónicas en la tabla 2.7.5.

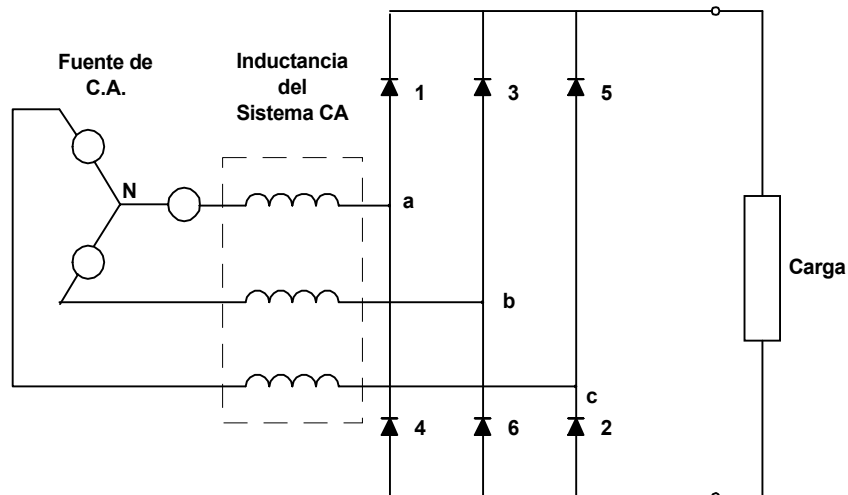


Figura 2.7.5. Rectificador trifásico de seis pulsos con la inductancia del sistema de CA.

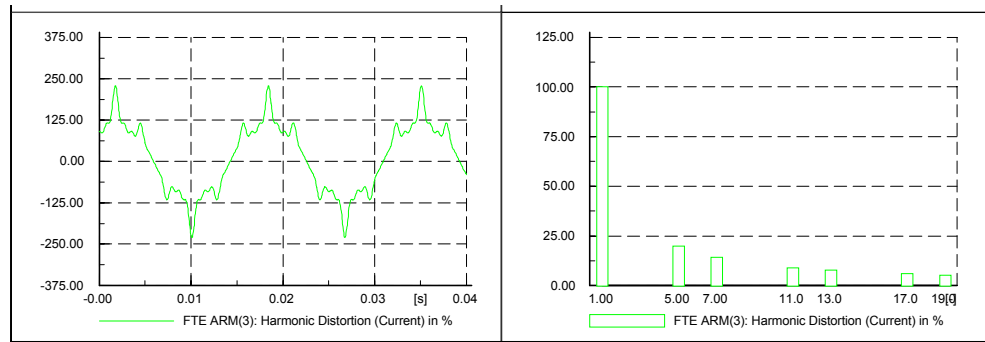


Figura 2.7.6 Corriente en el lado AC de un convertidor de seis pulsos y su espectro armónico.

Tabla 2.9. Inyecciones de Corrientes de un convertidor de seis pulsos.

ARM	5	7	11	13	17	19	23	25
%Fund	20.0	14.3	9.0	7.6	5.8	5.2	4.3	4.0
Angulo	-180	0	-180	0	-180	0	-180	0

2.7.5 Rectificador de 12 pulsos

Un rectificador de 12 pulso consiste en la conexión de dos rectificadores de 6 pulsos alimentados mediante un transformador con dos secundarios o a través de dos transformadores. En ambos casos, la conexión de la alimentación del rectificador debe ser uno en "estrella" y el otro en "delta". Esto produce un desfase de 30° entre los respectivos voltajes de alimentación, lo que se traduce en un voltaje en la carga con un menor nivel de rizado, además de una corriente de entrada al rectificador con una característica bastante más senoidal (con menos distorsión), [28, 29] como lo muestra la tabla 4.

Tabla 2.10. Inyecciones de Corriente de un convertidor de doce pulsos.

ARM	11	13	23	25	35	37	47	49
%Fund	9.0	7.6	4.3	4.0	2.8	2.7	2.1	2.0
Angulo	-180	0	-180	0	-180	0	-180	0

CAPITULO 3

**TECNICAS DE MITIGACION PARA
LOS ARMÓNICOS**

En esta sección, se presentan técnicas de mitigación para los armónicos. Estas técnicas varían por lo que se refiere a los requisitos de los datos, la complejidad del modelo, la formulación y la solución del problema [12, 32, 33,39]. Otras ideas similares, tales como la reinyección de CD, están siendo desarrolladas, por lo tanto continúan en la etapa experimental.

En un sistema eléctrico balanceado la aparición de armónicos pueden presentarse en todos los elementos del sistema y es bastante consistente para resistir cantidades considerables de corrientes armónicas sin causarle problemas. Esto significa que la impedancia del sistema es menor comparada con la impedancia de carga, por lo tanto no es una fuente significativa de armónicos. Sin embargo, se vuelve un contribuyente de problemas por vía de la resonancia cuando la distorsión existe severamente.

También en un sistema eléctrico, los problemas más significantes son causados por la resonancia, debido a condensador de gran capacidad instalado, para corrección de factor de potencia de o propósitos de regulación de voltaje. Para un circuito de LC monofásico excitado por una corriente armónica, la reactancia del inductivo y reactancia de los capacitores vistos de la fuente corriente de armónica están iguales en la frecuencia resonante.

$$f_r = 1/(2\sqrt{LC}) \quad (3.1)$$

La frecuencia resonante del sistema con respecto a la reactancia inductiva y la reactancia del capacitor ocurre a menudo cerca de la quinta o la séptima armónica. Sin embargo, el problema resonante a la undécima o decimotercero armónico no es inusual.

Hay dos tipos de resonancias probablemente para ocurrir en el sistema: la resonancia serie y la resonancia paralela. En la resonancia serie la impedancia es baja al flujo de corriente armónica, y la resonancia paralela es una impedancia alta al flujo de corriente armónica.

Resonancia serie

Como es mostrado en la Figura 3.1, si el banco de capacitores está en serie con la reactancia del sistema y crea un camino de impedancia baja a la corriente armónica, una condición de resonancia serie puede resultar. La resonancia serie puede causar altos niveles de distorsión de voltaje entre la inductancia y el capacitor en el circuito, debido a la corriente armónica concentrada en el camino de impedancia baja que se ve. La resonancia serie a menudo es causada por capacitores o la falla del fusible por sobrecarga. La condición de resonancia serie se da:

$$h_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (3.2)$$

h_r es el orden armónico de frecuencia resonante.

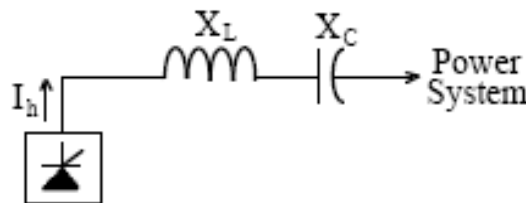


Figure 3.1. Resonancia Serie referencia [11,36]

Resonancia paralela

La Figure 3.1.2 muestra la topología del circuito en que es probable que la resonancia paralela ocurra. La resonancia paralela ocurre cuando la reactancia inductiva en paralelo y la reactancia del capacitor en paralelo del sistema están iguales en cierta frecuencia, y la combinación paralela parece ser una impedancia muy grande a la fuente armónica. La frecuencia dónde la impedancia grande ocurre es la frecuencia resonante.

Cuando la resonancia paralela existe en el sistema de potencia, significativamente la distorsión de voltaje y la amplificación corriente pueden ocurrir. La alta distorsión de voltaje en el bus puede causar distorsiones de corrientes que fluyen en los circuitos adyacentes. La corriente amplificada puede producir la falla del equipo [12, 34].

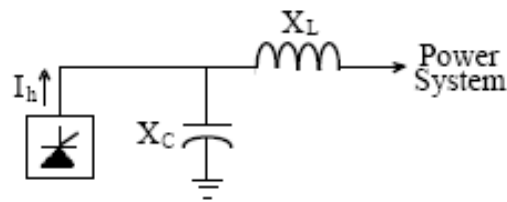


Figure 3.1.2. la Resonancia Paralela [11,36].

Cuando la resonancia paralela ocurre en el circuito de Figura 3.1.2, la frecuencia resonante puede determinarse por;

$$F_r = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVAR_{CAP}}} \quad (3.3)$$

MVA_{SC} son MVA cortocircuitados en el armónico generado por la carga en el punto de conexión al sistema y $MVAR_{CAP}$ es MVAR nominal del capacitor. Esto debe ser entendido que esta aproximación sólo es exacta para los sistemas con la relación de X/R altas. El sistema responde de manera distinta a diferentes valores MVA_{SC} a un mismo voltaje y un mismo banco de capacitores.

Otro esquema resonante se muestra en la red de la distribución de Figura 3.1.3. Si alguna de la inductancia del alimentador aparece entre los grupos de bancos de capacitores muy pequeños, el sistema puede presentar una combinación de muchos circuitos resonantes serie y paralelos, aunque los efectos resonantes están en menor proporción que causado por un elemento resonante grande.

Para este tipo de problema de resonancia, deben emplearse los programas del análisis armónicos más sofisticados para predecir las características armónicas del sistema.

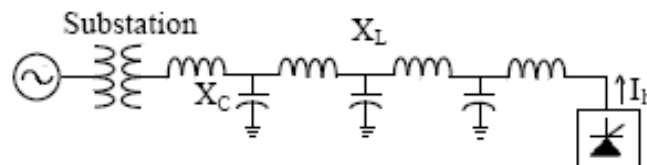


Figure 3.1.3. la Resonancia Distribuida[11, 36].

Una de las formas para mitigar o reducir la aportación de corrientes armónicas provenientes de algunas fuentes generadoras es mediante la siguiente manera [12]:

- Cuando se trata de fuentes de armónicas provenientes de lámparas electrónicas es recomendable utilizar conexión delta-estrella del transformador de alimentación, con el fin de atrapar las armónicas de secuencias cero.
- Las armónicas provenientes del transformador lo mejor será cambiar de transformador o liberar la carga. También usando un sistema trifásico con la conexión, estrella sin aterrizada a tierra o delta en las conexiones del transformador en un sistema balanceado, para bloquear los múltiplos del tercer armónico y los triples armónicos son completamente de la secuencia cero. Por estas razones, el orden tipo par y los triples se ignoran a menudo en el análisis de armónico.



- Si se trata de un controlador de velocidad, una buena opción es conectar un reactor limitador en alimentación de tal manera que atenúe las magnitudes de las armónicas, además de servir como protección para estados transitorios. Si se trata de un rectificador de seis pulsos, la opción es cambiarlo por uno de 12 pulsos, aunque económicamente no puede ser factible.
- El caso de tener varias cargas que utilizan rectificación conectadas aún mismo bus, lo recomendable es que uno de los rectificadores se alimenta de un transformador delta estrella y otro de un delta, esta conexión ayudaría a que tengan cancelación de armónicas.

Cuando se tiene la operación de fusibles en bancos de capacitores en el sistema, es recomendable modificar la frecuencia de resonancia a través de la colocación de un reactor (no significa que se esté poniendo un filtro sintonizado) en las terminales del banco de los capacitores, de tal manera que se modifique los MVAcc.

Por otro lado se puede variar el valor de los capacitores de tal manera que su frecuencia no provoque resonancia con las frecuencias de la red o cambiar los capacitores a otros puntos donde se tengan diferentes capacidades de cortocircuitos, en el caso extremo definitivamente se quitarán los capacitores.

La utilización de filtros es una buena opción pero no siempre es la más económica o factible, pues depende mucho de la situación que requiere la solución del problema, ya que basándose en esto se realiza el diseño del filtro.

Generalmente, las frecuencias de intereses para el análisis armónico se limitan hasta el múltiplo de la 50^a armónica.



3.1 INTRODUCCIÓN DE FILTROS

Esta sección puntualiza la aplicación y diseño de filtros para mitigar los efectos dañinos de las armónicas y algunas nuevas técnicas experimentales.

El filtrado es una técnica de mitigación de armónicas aplicado en los sistemas industriales y de empresas suministradoras. Sin embargo, la aplicación de filtros no elimina corrientes armónicas que son generadas por cargas no-lineales. El objetivo es desviar el flujo de corriente armónico del sistema de potencia ó porciones específicas de un sistema de potencia, en otras palabras, controlar el flujo de corrientes armónicas.

A menudo, las corrientes armónicas fluyen libremente sin restricción en las redes eléctricas, provocando problemas tales como fusión de fusibles que protegen a capacitores, interferencia telefónica, mala operación de equipo sensible, etc.

La aplicación de filtros en sistemas de transmisión de corriente directa (HVDC), limita que las corrientes armónicas generadas por los convertidores fluyan por el sistema. En situaciones donde corrientes armónicas viajan grandes distancias por las redes de alto voltaje pueden afectar líneas telefónicas cercanas. El grado al que una línea telefónica en particular es afectada depende de muchas variables tales como: tipo de alambre, distancia al circuito de EHV, la configuración de conductores, la resistividad del terreno y ángulo entre las líneas [32].

Debido a que los sistemas eléctricos las cargas industriales y comerciales están creciendo, es fácil identificar problemas potenciales y planear su mitigación.

Sin embargo, las fuentes armónicas pueden haber existido en un sistema desde hace mucho tiempo, sin ser detectadas y sin causar problemas, hasta que se realiza un cambio en la red. Si una condición resonante causa problemas, en este tipo de circunstancia la causa no es siempre obvia. Planificadores del sistema y operadores son a menudo los que están conscientes de esta situación. Se ha estimado que de

30% a 60% de la nueva carga para procesos industriales es no lineal y genera corrientes armónicas [27,30].

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 ó 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 figura 3.2.1 muestra la composición de estos dos tipos.

Un tipo particular de filtro de bloqueo es el reactor de alizamiento usado en el sistema de transmisión HVDC. Éste no es sintonizado a una frecuencia particular ya que es un sólo elemento inductivo. Sin embargo, actúa como una alta impedancia a las armónicas del lado de CD y también actúa como alizador 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 alizamiento para el mismo propósito.

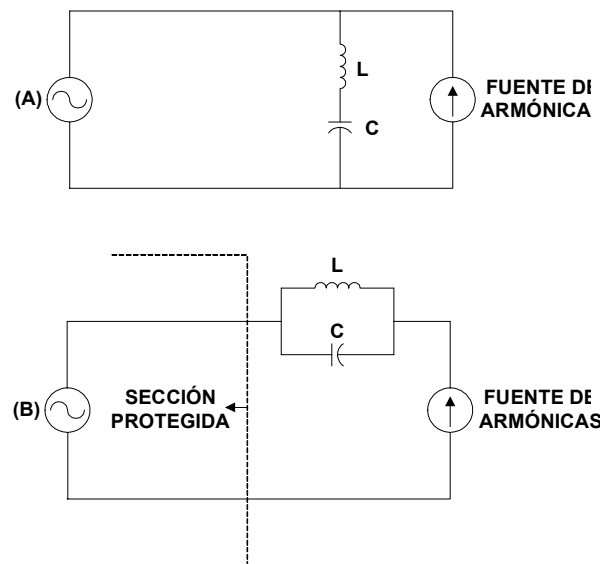


Figura 3.2.1. - (a) filtro en derivación; (b) filtro de bloqueo ó serie.

3.3 FILTROS EN DERIVACIÓN

Los filtros en derivación son ampliamente usados en los sistemas de potencia. El diseño más común es el sintonizado a una sola frecuencia, ver figura 3.2.2. La resistencia mostrada es la del reactor ya que las pérdidas del capacitor son despreciables.

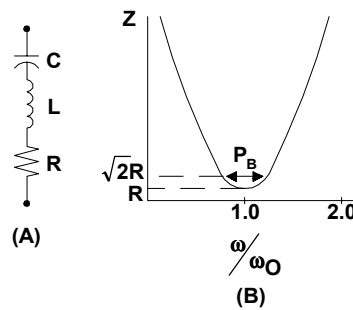


Figura 3.2.2. - filtro en derivación: (a) diagrama esquemático;
(b) impedancia característica vs. Frecuencia

La frecuencia resonante del filtro está dada por la expresión:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.4)$$

Alternativamente, la frecuencia resonante puede expresarse en función de las reactancias a la frecuencia fundamental:

$$f_r = 60 \sqrt{\frac{X_{Cf}}{X_{Lf}}} \quad (3.5)$$

El valor de la resistencia determina el factor de calidad (Q_f) del filtro y es igual a la reactancia inductiva ó capacitiva a la frecuencia de resonancia entre la resistencia:

$$Q_F = \frac{X_{L(fr)}}{R_F} = \frac{X_{C(fr)}}{R_F} \quad (3.6)$$

Cuanto mayor es Q indica menores pérdidas y más aguda la característica de Impedancia vs. Frecuencia del filtro. La agudeza de la característica del filtro se define con el "paso banda," que es el rango de frecuencia definido por los puntos donde la reactancia del filtro es iguala a la resistencia del mismo filtro. En estos límites, el ángulo de la impedancia es 45° . El paso banda (PB) se define como:

$$\text{PB} = \frac{\omega_0}{Q} \quad (3.7)$$

Los valores típicos de Q para un filtro sintonizado son de 20 a 50, el valor de 50 es muy común.

3.3.1 FILTROS DE DOBLE SINTONÍA.

Donde sólo se usan dos filtros de una sintonía cada uno, por ejemplo de 5^a y 7^a armónicas, un filtro de doble sintonía puede usarse en lugar de aquellos dos. La impedancia característica de este tipo de filtro se muestra en Figura 3.3.1. Un filtro de doble sintonía tiene dos ventajas sobre el de una sola sintonía:

1. A frecuencia fundamental, las pérdidas de potencia son menores.
2. Un inductor, en lugar de dos, está sujeto a la aplicación de sobretensiones de impulso pleno.

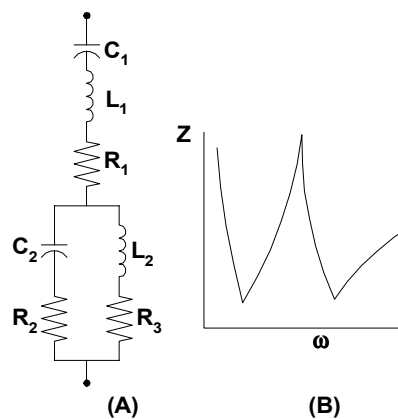


Figura 3.3.1. - filtro de doble sintonía; (a) diagrama esquemático; (b) característica de impedancia vs. Frecuencia.

Este tipo de filtro se utiliza en estaciones convertidoras de transmisión de corriente directa (HVDC). Los filtros de doble sintonía de gran capacidad son baratos y por lo tanto, no se usan en aplicaciones industriales y comerciales.

3.3.2 FILTROS PASO ALTAS

Un tercer tipo de filtro en derivación es el filtro paso altas. En la Figura 3.3.2. se muestra el circuito y impedancia de la característica. Con este filtro, las frecuencias más altas pueden pasar por la resistencia y el capacitor.

Para altas frecuencias la reactancia inductiva es alta y la reactancia capacitiva es baja, resultando entonces una impedancia del filtro aproximadamente igual a la resistencia.

El valor de Q para éste filtro es el recíproco de Q para un filtro de una sola sintonía:

$$Q = \frac{R}{X_{f_{FR}}} \quad (3.8)$$

Para este tipo de filtro, a mayor resistencia mayor Q y más aguda la característica del filtro. En contraste con el de una sintonía, este filtro tiene un paso banda relativamente ancho y Q está típicamente en el rango de 0.5 a 5.0.

Éstos filtros son utilizados en conjunción con los de una sola sintonía, para atrapar armónicas superiores a la 11^a. En la figura 4.3.2 se muestra la característica de un filtro paso altas del tipo de 2^o orden, con el eje x la frecuencia y el eje y , el valor de la impedancia.

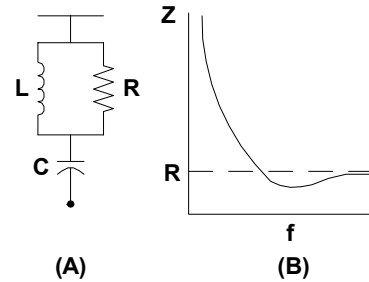


Figura 3.3.2. - filtro paso altas de 2^o orden; (a) diagrama esquemático; (b) característica de impedancia vs. Frecuencia.

La figura 3.3.3 muestra otros diseños de filtros paso altas. La rama sola es un tipo de primer orden que raramente se usa porque requiere una gran capacitancia y tiene pérdidas significativas. El filtro de tercer orden se prefiere sobre el de segundo orden debido a que sus pérdidas son más bajas. El filtro tipo C- filtra mejor que el de 3^{er} orden, con menores pérdidas, pero es más sensible a variaciones de frecuencia y a cambios en los valores de los componentes.

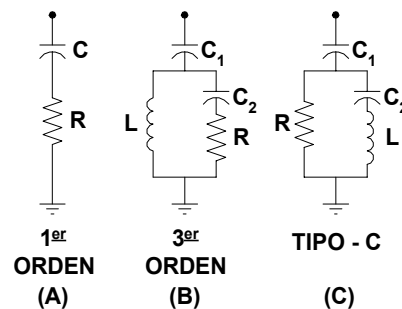


Figura 3.3.3. - filtros paso altas; (a) de 1^{er} orden (b) 3^{er} orden; (c) tipo c.

Las pérdidas en un filtro paso altas pueden ser significativas. Pueden ser usados en sistemas industriales donde corrientes armónicas de alta frecuencia causan interferencia telefónica.

3.4 DISEÑO DE FILTROS EN DERIVACIÓN

La llave para el diseño de filtros es reconocer la interdependencia de la red de sistema de potencia y el filtro. Como se observa en la figura 3.4.1, las corrientes armónicas generadas por cargas no-lineales fluirán hacia el filtro y hacia la impedancia de la red. Esto significa que el filtrado nunca será perfecto a menos que la impedancia del filtro al orden armónico de interés sea cero, lo cuál no puede ser.

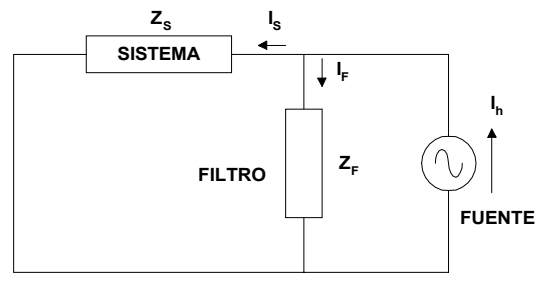


Figura 3.4.1. - Circuito Equivalente del Sistema y el filtro.

El proceso de diseño es un compromiso entre lo agudo de la característica del filtro y sus pérdidas, ambos son gobernados por la calidad del filtro (Q_F). Con filtros de característica muy aguda, existe el problema de desintonización debido a varios factores:

1. La frecuencia del sistema no siempre está en 50 o 60 Hertz.
2. Las tolerancias de fabricación de componentes dan como resultado, valores de reactancia diferentes a las especificadas.
3. Cambio de impedancias de los componentes con la temperatura.
4. Fusión de fusibles dan como resultado la pérdida de unidades capacitivas.
5. Cambios continuos de la impedancia del sistema.

La variación de la frecuencia resonante debido a los factores anteriores, hace que se seleccione una Q_F del filtro que permita una tolerancia en el filtrado sin incurrir en pérdidas grandes. Estos inconvenientes, normalmente son tomados en cuenta en los tres pasos siguientes para el diseño de filtros:



1. Se inyectan las corrientes armónicas producidas por la carga no-lineal al sistema como se mostró en la figura 3.4.1. Se calculan los voltajes armónicos y la penetración de corrientes armónicas.
2. Se calculan los diferentes factores que incluyen, las distorsiones armónicas, producto $I \cdot T$ y TIF, que se comparan con el criterio de diseño.
3. Se calculan los voltajes aplicados y las corrientes que circulan a través de los componentes del filtro así como las pérdidas.

La impedancia del sistema debe variarse sobre un rango esperado. Ese rango debe contemplar contingencias en la red, tal como salida de líneas y equipo.

En los filtros pasivos también pueden aparecer problemas de sobreesfuerzo del aislamiento por sobretensiones o sobrecorrientes en sus componentes que lo integran. Como estos filtros son los más empleados en la descontaminación armónica de los sistemas eléctricos debido a su bajo costo económico y facilidad de operación; también se hace necesario tener en cuenta en el diseño de los mismos la presencia de armónicos.

3.5 OTRAS TÉCNICAS DE MITIGACIÓN DE ARMÓNICAS

La sección anterior trató acerca de la aplicación y diseño de filtros que son usados para desviar el flujo de corrientes armónicas fuera del sistema de potencia. Otras técnicas han sido aplicadas y están siendo desarrolladas para reducir la corriente armónica total que aparece en las terminales de la carga y por lo tanto, se requiere menos equipo de filtrado.

La técnica más común utiliza la conexión de los devanados de transformadores. Técnicas más nuevas que están siendo desarrolladas, involucran la inyección de corrientes al sistema [31].

3.5.1 ATERRIZAMIENTO Y CONEXIONES DEL TRANSFORMADOR

El aterrizamiento y la conexión del transformador son usados para reducir el flujo de corrientes armónicas a la red del sistema de potencia. Lámparas fluorescentes y transformadores que generan corrientes de 3^a armónica.

Usuarios industriales y comerciales son conectados al sistema de la empresa suministradora a través de un transformador delta-estrella aterrizado (Fig. 3.5.1). En sistemas balanceados, la 3^a armónica y las triples son de secuencia cero, y con el uso de la conexión delta ó estrella flotante del transformador se evita el flujo de esas armónicas al sistema de potencia.

Las armónicas generadas en el lado de la estrella del transformador circularán en los devanados de la delta y no aparecerá en las líneas de ése lado.

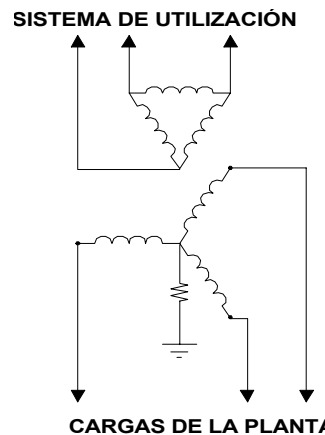


Figura. 3.5.1. Típico transformador delta-estrella aterrizado para usuarios industriales y comerciales.

Se debe recordar que los sistemas no siempre son balanceados. Por lo tanto, incluso con la carga conectada en delta, pueden aparecer armónicas triples en el sistema de potencia si algún desbalance está presente. Si el desbalance es pequeño no se necesita un filtro de 3^a armónica. La mayoría de las cargas industriales son balanceadas si operan correctamente.

3.5.2 MULTIFASEO Ó MULTIPULSACIÓN

El incremento de los convertidores estáticos en aplicaciones domésticas y control industrial ha elevado la generación de corrientes armónicas. Mientras la conexión delta del transformador y prácticas de aterrizamiento han mitigado tradicionalmente los efectos de las corrientes de secuencia cero, ellos no tienen efecto sobre las armónicas impares que son generadas por los convertidores de 6 pulsos, que son: la 5^a, 7^a, 11^a, 13^a etc.. En grandes instalaciones, una técnica conocida como multifases o multipulsos ha sido empleada para reducir la generación de armónicas. En la Fig.3.5.2. Muestra dos puentes de 6 pulsos, donde cada uno alimenta la mitad de la carga del motor con diferente conexión de los transformadores. El resultado es un defazamiento de 30° entre las dos corrientes de carga fundamental. Si el espectro armónico es analizado, se verá que la 5^a, 7^a, 17^a, 19^a armónicas son iguales en magnitud en las dos corrientes de carga pero de signo contrario, dando como resultado una cancelación de estas armónicas en la corriente de carga total. Así debemos esperar ver la 11^a y 13^a armónicas, haciendo que las otras armónicas se cancelen.

Éste arreglo de 12 pulsos es muy utilizado en instalaciones industriales de gran capacidad y en convertidores de potencia de los sistemas de transmisión de corriente directa (HVDC), dando como resultado una disminución significativa de filtros requeridos.

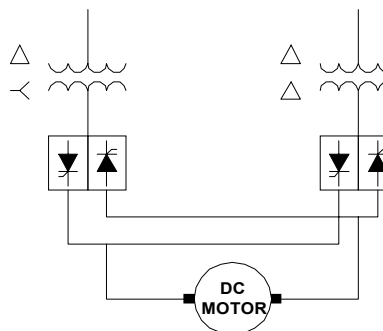


Figura. 3.5.2. Arreglo de dos puentes de 6 pulsos que alimentan al motor.

El utilizar Multifaseo de mayor orden, es decir, conectar 2 convertidores de 6 pulsos en paralelo se tiene un convertidor de 12 pulsos, cancelándose armónicas de manera significativa. Éste mismo principio puede ser extendido a 24 pulsos. El usar 4 puentes de 6 pulsos con conexión de transformadores que tienen 15 grados de defazamiento entre ellos [32], como se muestra en la fig. 3.5.3. Nuestra que la corriente total (suma de los 4 rectificadores) será casi senoidal con la 23^a y 25^a armónicas dominantes. Habrá armónicas de menor orden tales como la 5^a y 7^a debido a desbalance en componentes y controles, pero la necesidad de filtros podría ser eliminada. Similarmente un arreglo de 48 pulsos podría ser obtenido usando 8 puentes de 6 pulsos separados eléctricamente por 7.5°.

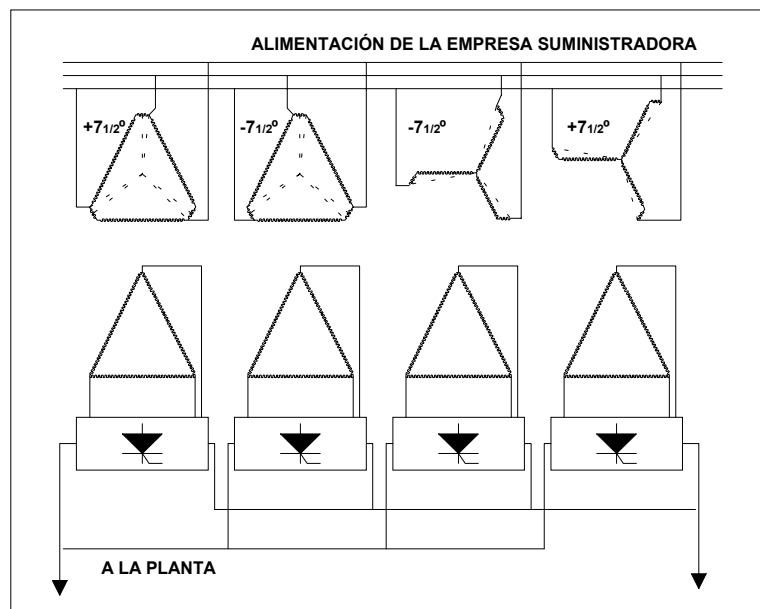


Figura.3.5.3 Diagrama esquemático de un convertidor de 24 pulsos.

3.5.3 MITIGACIÓN DE ARMÓNICAS POR CONVERTIDORES ESTÁTICOS DE VAR's (CEV).

Un CEV operará sobre un amplio rango de ángulos de retardo y en instalaciones de gran capacidad generará armónicas muy significativas. Las triples no son mostradas en la figura 4.5.4, porque normalmente son atrapadas en la conexión delta del reactor.

Generalmente, el reactor controlado por tiristores se instala con bancos de capacitores que son necesarios para suministrar la potencia reactiva del compensador. Éstos bancos de capacitores forman parte de los filtros sintonizados a armónicas características predominantes.

El reactor controlado por tiristores produce armónicas debido a la conducción discontinua del propio reactor [12]. El resultado es una generación significativa de armónicas como se describe en las curvas de la fig. 3.5.4. Las curvas describen la variación de las corrientes armónicas (en % de la fundamental) en función del ángulo de retardo en el encendido de los tiristores.

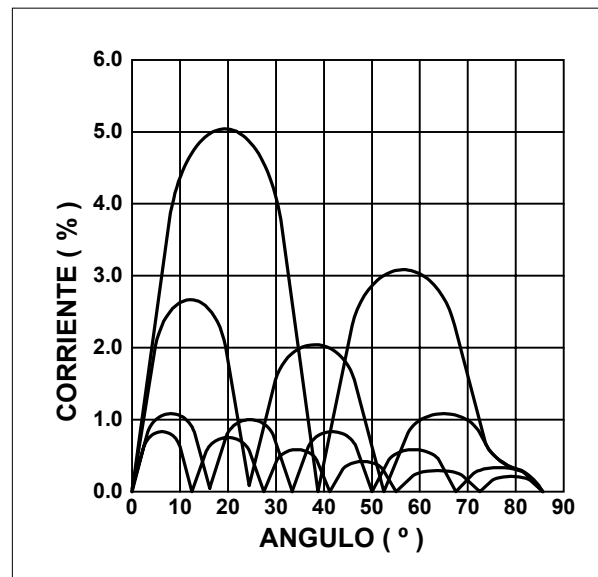


Figura.3.5.4. Corrientes armónicas generadas por el SVC en función varios ángulos de retardo en el control.

Usualmente se emplean filtros para absorber las corrientes armónicas. Además de estas dos técnicas, existen otros métodos de mitigación de armónicas. Un método es dividir el compensador estático de VARs (SVC) en dos partes y operarlos conjuntamente como un compensador de 12 pulsos. Una variación sobre este tema es compensar los dos controladores a una armónica específica, tal como la 13^a que es minimizada sobre el rango total de operación de la instalación.

3.5.4 CANCELACIÓN DE ARMÓNICAS POR INYECCIÓN DE CORRIENTES ARMÓNICA.

Corrientes armónicas inyectadas por convertidores estáticos de potencia pueden ser reducidas por medio de la inyección de corrientes armónicas [32,33]. En la figura 3.5.5, una corriente armónica de 3^{er} orden se inyecta a la onda cuadrada del rectificador para producir una forma de onda combinada con un bajo contenido armónico.

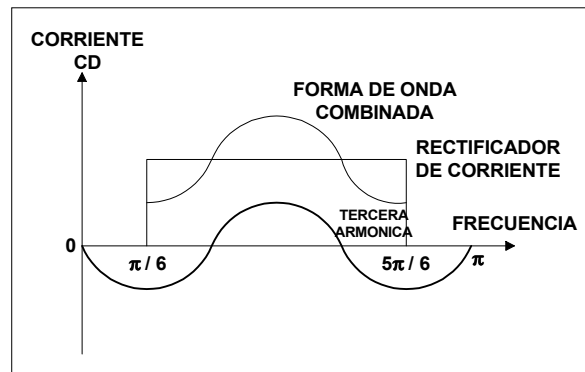


Figura 3.5.5. - corriente armónica de 3^{er} orden inyectada a la forma de onda cuadrada de un rectificador para reducir el contenido armónico.

Esta técnica es implementada en el sistema mostrado en la figura 3.5.6, la cuál ilustra un rectificador de seis pulsos con una fuente de corriente armónica de 3^{er} orden, conectada al neutro del transformador del convertidor. Los capacitores impiden el flujo de corriente de CD en el neutro del circuito.

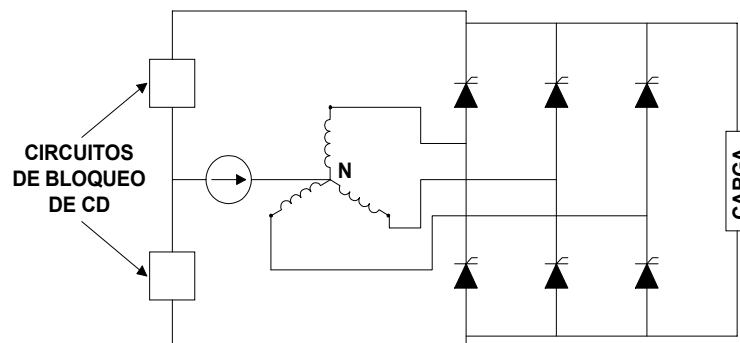


Figura 3.5.6. - Diagrama esquemático que muestra la fuente de corriente armónica de tercer orden conectado al neutro del sistema.

CAPITULO 4

**PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA
ELECTRICO**

Para observar la respuesta característica de la red eléctrica ante la presencia de armónicas, se recrea la red eléctrica Kimberly en un sistema radial simple de 30 nodos, suministrado por un solo alimentador conectado al nodo 1 cuya tensión es de 115 kV. Además, el sistema emplea diferentes voltajes nominales de 115 kV, 13.8 kV, 4.16 kV, 0.48 kV, con 14 transformadores y 11 cargas no lineales (motores de inducción de diferente capacidad entre 1100, 1000, 200, 150, 60 Hp por mencionar algunos) figura 4.1.

En las simulaciones, las cargas no-lineales son modeladas como una fuente de inyección de corriente tomando en cuenta la potencia real y reactiva de las máquinas, factor de potencia, cantidad de motores así como los voltajes nominales donde están conectadas.

Para simular estas fuentes generadoras de armónicos, los programas de **DIGSELINT** y **Easy-Power** [apéndice 1] pueden caracterizan fuentes de corrientes con el ESPECTRO ARMONICO de un controlador de 6-pulsos e inyectar los armónicos de 5^a, 7^a, 11^a, 13^a, 19^a con un porcentaje teórico de distorsión individual de 20%, 14.28%, 9.09%, 7.69% y 5.26% respectivamente y un Angulo de defazamiento de 0° en todas las fuentes, debido a que este valor de ángulo mostró mayor porcentaje de distorsión en las pruebas previas que se pueden consultar en el **apéndice 1**.



Además, de manera independiente se determino la capacidad de cada fuente generadora de armónico, basándose en la capacidad del motor para cada ruta de estudios, considerando como información importante el THD_V , HD_V , $V_{p.u}$, V_{rms} de voltaje en los buses y en los alimentadores el THD_I , HD_I , I_{rms} , P , Q , $F.P$, de la corriente y la aplicación de un interruptor de amarre en la posición abierto y/o cerrado, con el fin de simular diferentes situaciones del sistema, por ejemplo, Utilizar un sistema completo o 2 o 4 sistemas independientes observando el impacto que tiene la corriente armónica en toda la red, hacia ellas mismas y otras cargas.

Para el estudio de los niveles de voltaje se consideró las Normas IEEE 519-1992 y CFE L0000-45, que especifican el límite de distorsión requerido en Baja tensión, el cual debe ser menor 5 % THD_V y en Alta tensión menor del 3% THD_V , pero por experiencia de trabajos realizados anteriormente por CFE, en Baja tensión se debe de tener menos del 3 % THD_V y en Alta tensión menos del 2% THD_V en el punto de acoplamiento común. Para determinar las especificaciones en los capacitores se empleo la norma IEEE std-18 o IEC 60871-1. Respecto al diseño de los filtros no existen estándares ANSI o IEEE específicos relacionados a los reactores para filtros de armónicos, el documento más cercano es IEEE C57.16-1996.

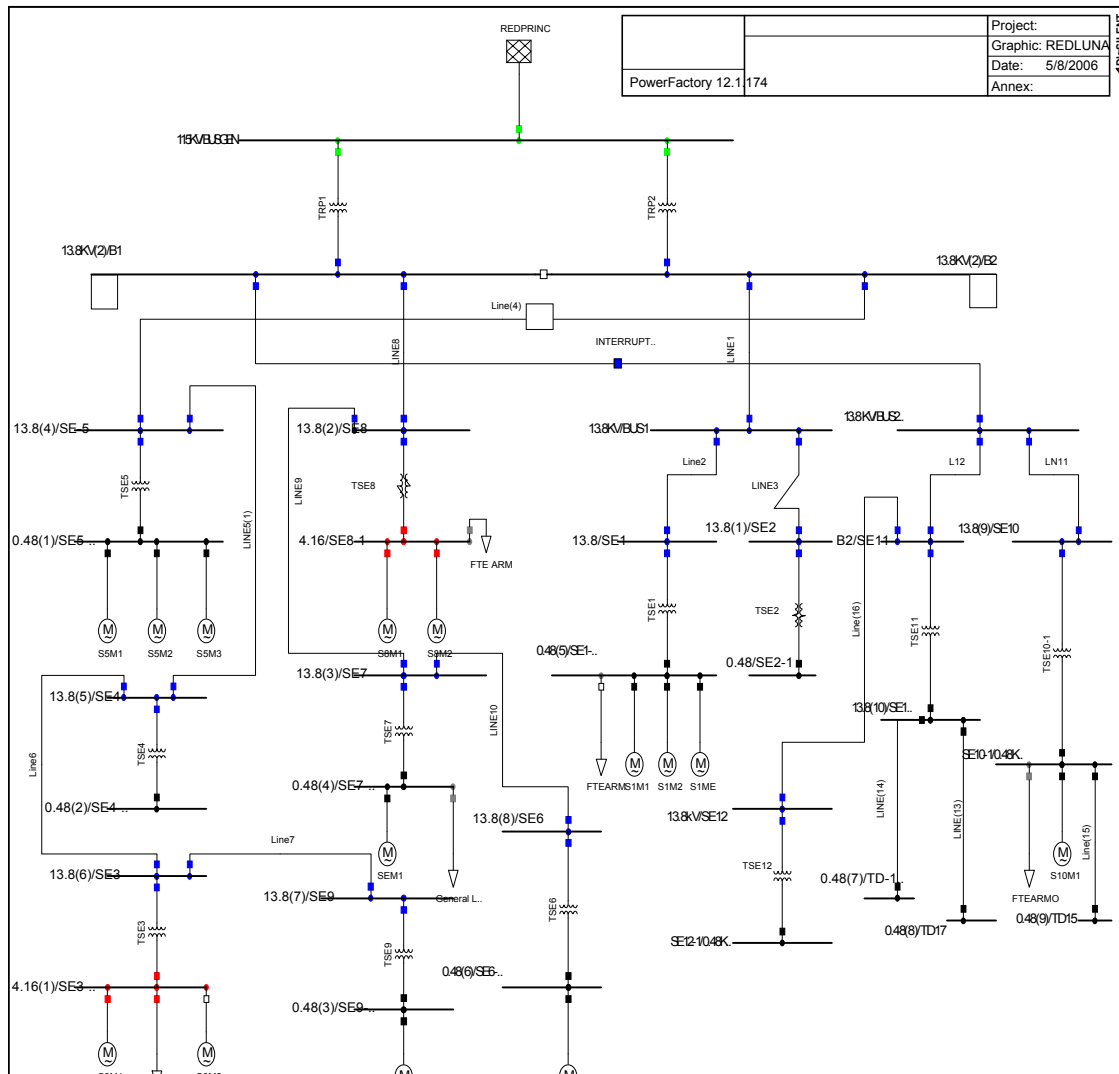


Figura 4.1.- Red Completa de Kimberly de Puebla.

Los resultados obtenidos de la simulación sobre el nivel de distorsión individual y total de voltaje en cada nodo de la red, se determinan en función de las corrientes armónicas inyectadas por las cargas no-lineales. Estos valores son graficados para observar en detalle el comportamiento del sistema ante la presencia de armónicos.

Para desarrollar el procedimiento adecuado para su análisis, tomamos las siguientes consideraciones. Nota; Previamente se realizó la captura de la Adquisición de datos necesarios para la normalización, estudio de flujo de potencia, corto circuito y flujos de armónicos.



4.1 CONSIDERACIONES

1.- Se considera a la red un sistema estable y con un controlador de velocidad de 6 y 12 pulsos, para todos los motores existentes en el bus de baja tensión. En este caso, las fuentes generadoras de armónicos se caracterizaron como un rectificador de seis pulsos, por lo que el orden del espectro de armónico es $6n \pm 1$, obteniendo el orden de armónicos de 5^a, 7^a, 11^a, 13^a.

2.- Se realizó simulaciones con el porcentaje teórico de distorsión individual anteriormente mencionado y diferentes valores de Angulo de manera independiente para cada ruta, tomando como información el THD_v, HD_v, V_{p.u}, V_{rms} en los buses y el THD_i, HD_i, I_{rms}, P, Q, F.P en los alimentadores.

3.- Durante el proceso de simulación se determino dos casos de estudio, con el interruptor de amarre en la posición de abierto y/o cerrado, observando el impacto que tiene las corrientes armónicas en toda la red en un sistema completo o dos sistemas independientes o 4 sistema independientes.

4.- Posteriormente de manera individual y conjunta, se realizó la inyección de armónicos de cada ruta con todo su espectro armónico, es decir, todas las fuentes inyectaban al mismo tiempo todas las corrientes armónicas y así obtener un espectro completo y la forma de onda producida en el bus o alimentador, en función de la frecuencia fundamental. La información que se maneja es la misma que en el punto 2.

5.- Se realizó una comparación de resultados con todos los armónicos en la misma ruta y con las otras rutas, observando el desempeño de los programas para un sistema con distorsiones armónicas y ver su efectividad al proporcionar los resultados.

6.- Posteriormente se realizó simulaciones introduciendo capacitores y filtros para observar la respuesta del sistema.



Durante las simulaciones se observó que los armónicos del orden de 11^a y 13^a para un controlador del motor de 6 pulsos no tienen un impacto considerable y los armónicos de 23^a y 25^a para los controladores de 12 pulsos se tiene un valor insignificante en la red de 0.00125 THD_V, tanto que podrían despreciarse. En este caso los armónicos a considerar fueron (5^a, 7^a, 11^a, 13^a, 17^a, 19^a) para comparar con los datos prácticos realizados en CFE.

De acuerdo con la información obtenida, se determinaron **cuatro rutas** de trabajo para el estudio de análisis de armónicos, ya que cumple con las expectativas antes mencionadas como lo muestra la figura 5.1.2. El sistema mostrado en la figura 5.1.2 del capítulo 5, es una red RLC y un circuito balanceado, a una frecuencia de fundamental 60 hertz.

4.2 DATOS ESENCIALES PARA LLEVAR ACABO EL ANÁLISIS DE ARMÓNICOS.

En el planteamiento para la metodología se debe contemplar cinco áreas de interés para el efecto de las armónicas en sistemas eléctricos CA, de las cuales comprenden:

1. **El modelo del sistema** debe considerar el número de nodos, tipo y número de cargas, conexiones de transformadores, cargas y arreglos de línea (líneas en paralelo, sencillas, longitud de la línea, capacitación de la línea y cables) apéndice 3. Por una parte cuánto más exactos sean modelos utilizados más correcto serán los resultados de la solución del problema, en este sentido los modelos sencillos empleados buscan proporcionar resultados suficientemente próximos a la realidad. Las modelos utilizados por el programa de Digsilent, que se muestran en la figura 4.7.3 - 4.7.9. mostradas al final de este capítulo.



2. **Número de armónicas a considerar** contemplando el tipo de las fuertes generadas de armónicos de acuerdo a las norma IEEE 519-1992 y IEC-60150. y a la colocación de capacitores para la compensación de reactivos [19, 20].

3. **Flujo de armónicas balanceadas o Desbalanceadas**, es decir, se debe considerar al sistema eléctrico trifásico balanceado, así como las cargas no lineales y suponer que los voltajes y las corrientes armónicas son de magnitud y secuencia de fase conocida, con la finalidad que agilizar el cálculo a través de la resolución de una fase del sistema implicando la reducción del tiempo en el orden del problema. Al sistema eléctrico con condiciones desbalanceadas, todos los elementos que integran la red deberán tratarse en forma particular considerando las tres secuencias para el flujo armónico.

4. **Contingencia que se pretende considerar**. Debe considerarse desde un inicio las condiciones de operación de la red, para determinar el tipo de análisis que se llevará a cabo para su resolución, considerando maniobras de conexión y desconexión de bancos de capacitores para la compensación, niveles de cargas ya sea en baja o plena carga, salidas y entrada de líneas y transformadores o subestaciones para su mantenimiento y condiciones del tiempo de operación de las cargas.

5. **Técnicas analíticas** a utilizar procurando una referencia metodología adecuada al realizar un análisis armónicos contemplando los requerimientos esenciales y aplicando diferentes técnicas para la resolución de dicho análisis.

4.3 METODOLOGÍA PARA EL ANALISIS ARMONICO DE UNA RED

La metodología que se propone esta bajo los criterios y consideraciones antes mencionadas en los puntos 4.1 y 4.2. De una manera general y sujeta a la condición de adaptarse a la res, considerando todo el tiempo el aspecto de costo económico para llevarse acabo.

Una vez completado los puntos 4.1 y 4.2, la metodología a seguir es la siguiente:



1.-Antes de realizar el proceso de compensación de reactivos a través de bancos de capacitores, se debe llevar a cabo un estudio de frecuencia previo, para conocer la existencia de corrientes armónicas diferentes con respecto al espectro armónico de las cargas en la misma red, con el fin de prevenir la amplificación de corrientes armónicas, así como frecuencias de resonancias. También debe contemplarse la condición de necesidad, facilidad de colocación y recomendación en el uso de los bancos de capacitores en ese punto (PCC).

En caso de presentarse la necesidad de conectar bancos de capacitores para corregir el factor de potencia o compensar, la conexión de los bancos de capacitores a utilizar es delta para baja tensión (En estrella por norma IEEE std 1036-1992 requiere arreglos especiales, voltajes y potencias nominales, número de fases y de unidades capacitoras estandarizadas) donde su colocación deberá realizarse en aquellos puntos alternos y distantes a las fuentes generadoras que faciliten la compensación, esto puede ser colocando el banco de capacitores un nivel más arriba del bus donde se encuentra la carga no-lineal o colocarlos bancos lo más cerca de la carga.

Otra forma es buscar un punto lo más cercano a las cargas generadoras de armónicos retirándose del bus para no propagar las corrientes armónicas hacia las cargas paralelas conectadas en ese bus, en caso de existir una trayectoria paralela a la carga generadora se recomienda la instalación en este punto de dicho banco de capacitores. Normalmente estos bancos se conectan cerca de los motores. Cuando se tiene conectados varios motores en el bus donde se requiere compensar, lo adecuado es conectarlo directamente en el propio bus, si tuviera un motor acompañado con varias cargas pequeñas en este caso y recomendable conectar el capacitor lo más cercano al motor.

Es recomendable el uso de bancos de capacitores ya existentes en la red bajo ciertas limitantes siempre y cuando tengan la capacidad de cubrir las necesidades de compensación, la efectividad que se tiene ante su utilidad y condiciones físicas adecuadas para su uso.



Por otro lado, si existe la facilidad de modificar el valor nominal del capacitor a través de una inductancia u otro dispositivo de tal manera que su frecuencia no provoque resonancia con las frecuencias de la red sin tener cambio alguno en la compensación se podrían utilizar, en el caso extremo definitivamente se quitarán los capacitores.

2.-Una vez identificado los puntos de conexión efectivos para los capacitores en la red, se debe realizar un barrido de frecuencia con el fin de identificado y observar que orden de armónicos existente hay o se encuentre dentro del rango del espectro armónico de las cargas generadoras de armónicos para evitar la resonancia, si alguna de las corrientes armónicas de la red son iguales al espectro armónico de las de las cargas o de preferencia alejarse de la 5^a y 7^a armónicas siempre.

La mayor parte de los sistemas contienen este tipo de armónicas, para el caso de adaptar los capacitores, es recomendable, partir del valor nominal de capacidad del banco del capacitor elegido con un menos 1% del valor nominal, para alejar el orden de los armónicos de la red a frecuencia del espectro Armónico de las cargas.

Normalmente se trata de evitar que se tenga en la red las armónicas 5 y 7 por la frecuencia con que aparece en los sistemas eléctricos y por que la mayor parte de las cargas no-lineales son generadoras de esta armónica y contiene la mayor magnitud de distorsión en comparación de las demás armónicas.

Durante este proceso se encontró impedancias de frecuencia armónicas diferentes a la 5^a y 7^a, cuyo porcentaje de distorsión es mayor, pero el valor de la magnitud de la impedancia es menor en comparación a los valores de porcentaje de distorsión y magnitud de la impedancia de una 5^a y 7^a, lo cual indica que depende mucho del valor de la magnitud para la contribución en el armónico y que puede ser insignificante o significativa de acuerdo al valor de su magnitud.



También las armónicas pares o de 3 orden, porque en el crecimiento de la propia red, el valor de impedancia de frecuencia armónica se va alterando hacia valores de corrientes armónicas existente en la red, que pueden incrementar y provocar amplificaciones en la misma, lo importante es evitar la 5ª y 7ª armónicas aunque el valor de impedancia de la frecuencia armónica sea un valor pequeño (mayor de 20 ohms),

3.-Otra alternativa para evitar la amplificación de armónicos y es la técnica más común utilizada y de bajo coste es el cambio en la conexión de los devanados de transformadores. El aterrizamiento y la conexión del transformador delta-estrella aterrizado y con el uso de la conexión delta ó estrella flotante del transformador que eviten el flujo de esas armónicas al sistema.

También puede limitar la circulación de armónicos a la parte más pequeña posible de la instalación con la ayuda de transformadores de acoplamiento adecuado pero el costo es mayor. También se puede limitar los armónicos al conectar una inductancia anti-armónica que consiste en proteger los condensadores destinados a mejorar el F.P con una inductancia en serie que se calcula para que las frecuencias de resonancia no correspondan con ningún de los armónicos presentes.

4.-Utilizar los filtros pasivos cuyo costo es bajo y factible para reducir al mínimo una corriente armónica y parte de otras en menor proporción de acuerdo al factor de calidad Q_F cuyo valor adecuado se encuentra entre 20 - 50. La colocación adecuada de acuerdo al análisis de la red tiene mejor funcionamiento en los buses de baja tensión a 480 Volt y 4.16 kV donde se conecta la carga, debido a que las corrientes generadas se reducen desde de la carga y van decreciendo cuando se dirigen en forma radial hacia niveles de tensión superior debido al valor de impedancia menor que hay respecto a la de las cargas.

En el caso de las tensiones de 13.8 kV, la reducción de las corrientes armónicas no fue menor a la que muestra en el lado de la carga, ya que la mayor parte de la distorsión total se dirigió hacia las cargas paralelas conectadas en el bus inferior, aparte que es más costoso por el nivel de tensión para su diseño.



4.4 RED Y MODELOS DE CARGA

La dificultad principal en la preparación de un modelo de la red es: Determinar cuánto de la red necesita ser modelado. La representación de la magnitud de la red está limitada por los datos disponibles y los recursos computacionales. Algunas observaciones que se consideran son.

- Para los sistemas de potencia industriales conectados a fuentes o alimentadores de distribución de tres-fases, es generalmente suficientes para modelar dos transformaciones desde el punto de carga, generalmente transformadores con impedancias dominantes. Deben planearse los circuitos de la rama si ellos conectan capacitores para corrección del factor de potencia o motores. La capacitancia de líneas aéreas es normalmente abandonado, pero la capacitancia del cable deben ser contemplada para cables largos de más de 500 pies.
- La circulación de corrientes y/o tensiones adicionales en el sistema eléctrico hace que se presenten problemas como el aumento de pérdidas de potencia activa, sobretensiones en los condensadores, errores de medición, mal funcionamiento de protecciones, daño en los aislamientos, deterioro de dieléctricos y disminución de la vida útil de los equipos, entre otros.

Las observaciones anteriores están basadas en la práctica común. Quizá la mejor manera de determinar la magnitud de red modelada, es realizando un estudio de sensibilidad; es decir, uno puede progresivamente ampliar el modelo de la red hasta que los resultados no cambien significativamente.

Muchos estudios de armónicos que involucran plantas industriales, cuyo sistema de suministro se representa como una impedancia dependiente de la frecuencia, cercas al punto de acoplamiento común [12, 13, 28, 30,32].

Los elementos de un sistema eléctrico pueden representarse a través de impedancias lineales o impedancias no lineales. El primer caso, corresponde a aquellos elementos en los que existe una relación proporcional entre la tensión y la corriente para las mismas componentes de frecuencia, mientras en el segundo caso, los elementos no presentan esta relación proporcional en todo su espectro. Entre los elementos con impedancias no lineales se destacan los dispositivos de estado sólido y su técnica de modelado es conocida como *modelado por inyección de corriente*.

4.5 MODELOS DE CARGA DE DIGSILENT

En el programa Digsilent, los modelos empleados son los de la IEEE y IEC , que están en el dominio de la frecuencia y a continuación se ilustran

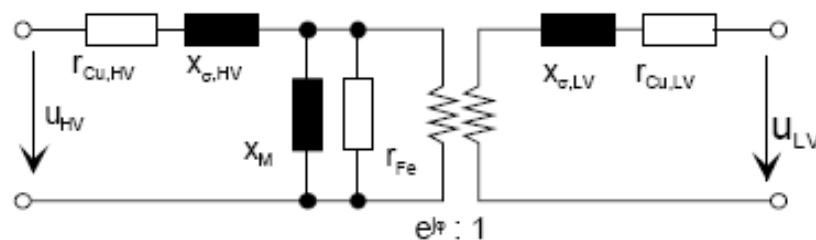


Figura 4.5.3 Modelo del transformador de dos devanados.

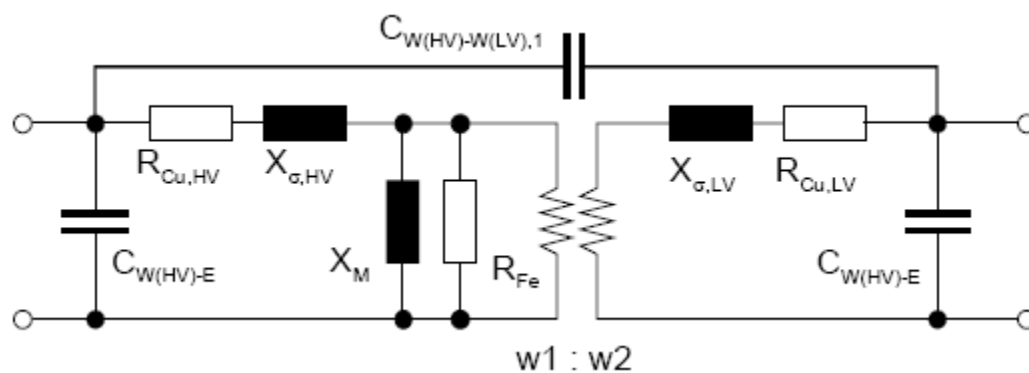


Figura 4.5.4 Modelo del transformador de dos devanados para el análisis de armónicos.

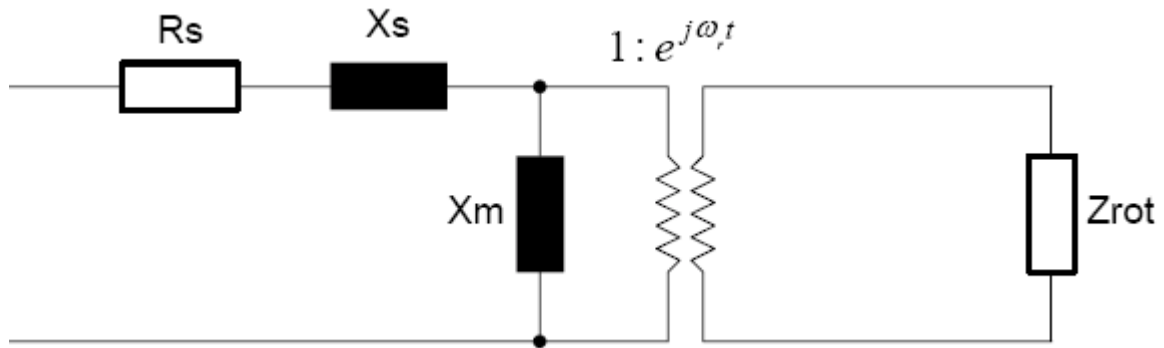


Figura 4.5.5 Modelo general de la maquina inducción.

R_s =resistencia del estator, X_s =Reactancia del estator, X_m = Reactancia de Magnetización,

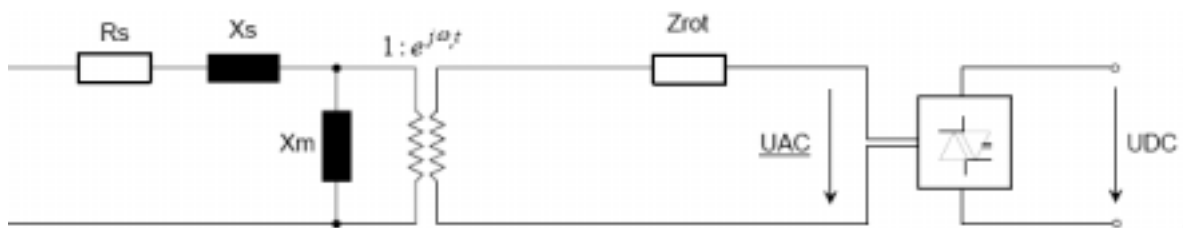


Figura 4.5.6 Modelo del motor de inducción con el controlador.

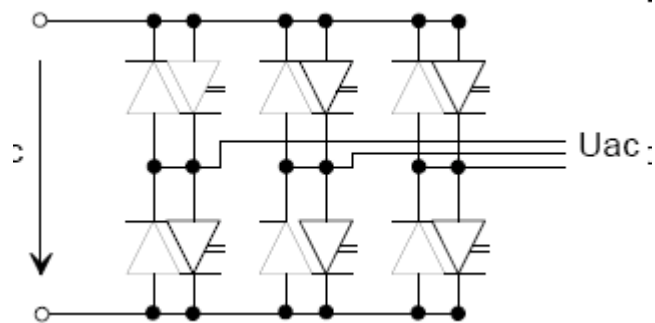


Figura 4.5.7 Modelo del convertidor de Vcd a Vca.

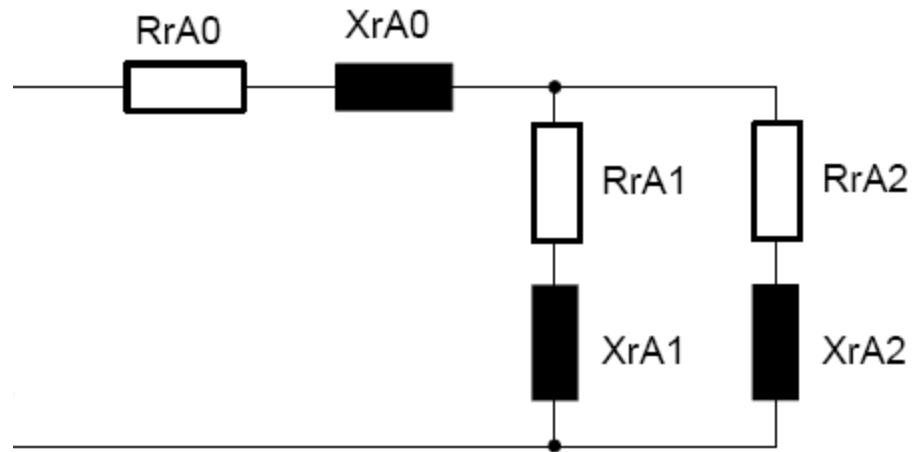


Figura 4.5.8 Modelo de la impedancia del rotor del motor jaula de ardilla con efecto de desplazamiento de la corriente.

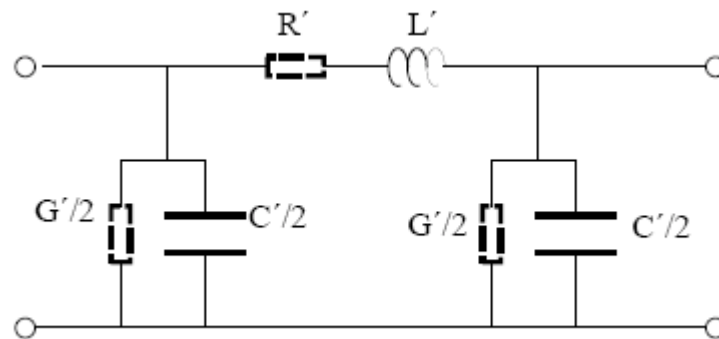


Figura 4.5.9 Modelo nominal PI de línea de transmisión.

CAPITULO 5

PRUEBAS Y RESULTADOS DEL SISTEMA ELECTRICO

En este capítulo se presenta los resultados del sistema de prueba de la red de Kimberly figura [5.1], mediante la simulación de los programas digitales (Digsilent y Easy-Power). Esto es con el fin de observar la respuesta característica de un sistema, en función de los voltajes y corrientes dependientes de la frecuencia, ante la presencia de armónicos. También el comparar resultados obtenidos en cada una de las rutas que comprenden nuestro sistema de prueba, así como el ofrecer una solución práctica para obtener una mejor eficiencia del mismo.

Para llevar a cabo este estudio, se utilizo los datos proporcionados por la Unidad de Ingeniería Especializadas (U.I.E), que se presentan en el **apéndice D**. Dicha información contempla los datos necesarios de generadores, transformadores, línea de transmisión, motores de inducción y datos adicionales para la realización de las simulaciones en el análisis de armónicos.

La obtención del comportamiento de dicha red, requirió de los estudios de flujos de cargas, para conocer los niveles de voltaje y utilizar banco de capacitores para su compensación. El método de barrido de frecuencia para conocer puntos de resonancia en la red y un estudio de flujo armónico, enfocado principalmente en los niveles de voltaje en cada nodo y corriente en los alimentadores, a frecuencias mayores de 60 hertz en la red eléctrica.

5.1 RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

Para la obtención de resultados, se determinaron **cuatro rutas** de trabajo para el estudio de análisis de armónicos, ya que cumple con las expectativas antes mencionadas capítulo 4 . El sistema mostrado en la figura 5.1.2 del capítulo 5, es una red RLC y un circuito balanceado, a una frecuencia de fundamental 60 hertz.

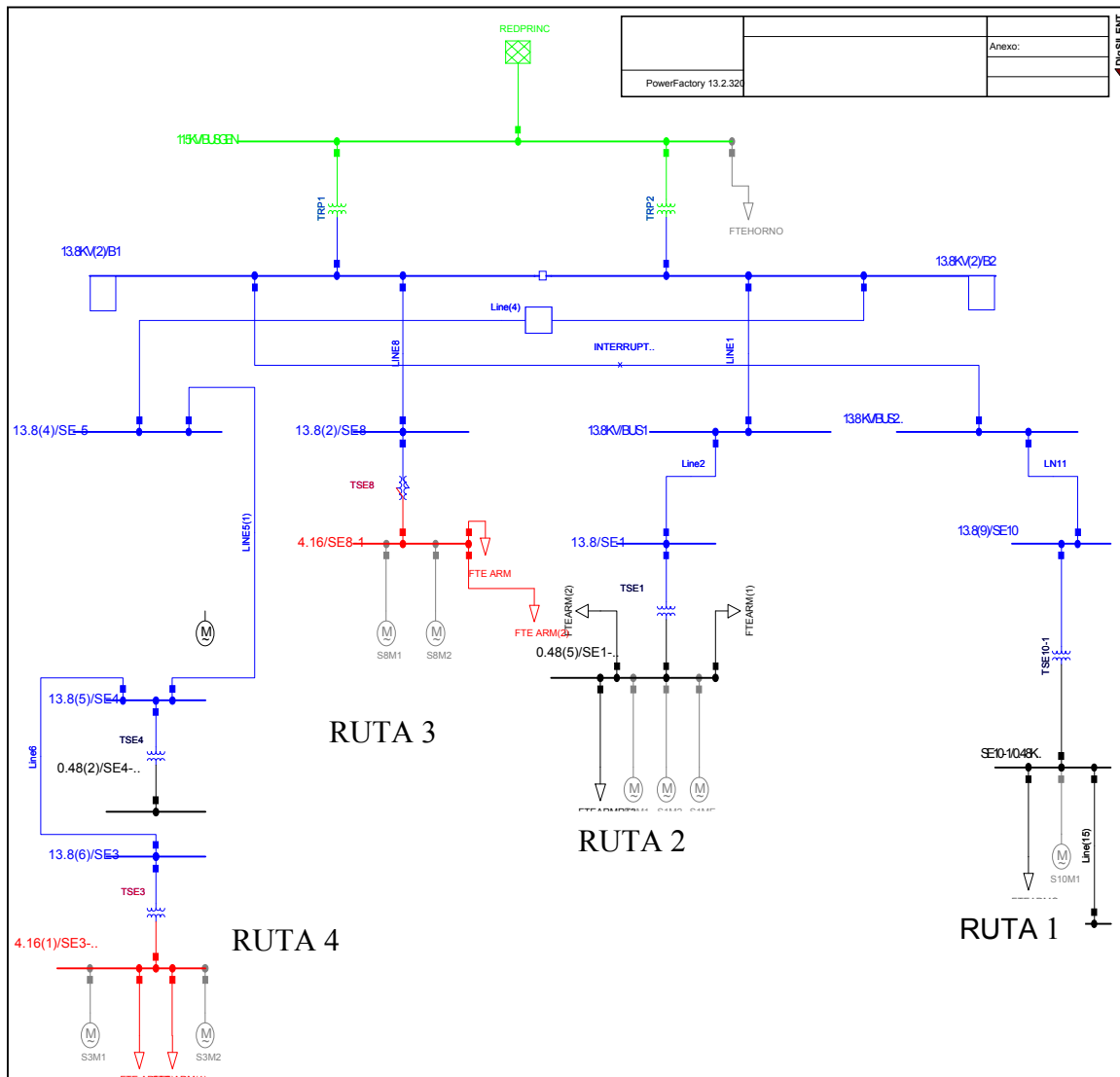


Figura 5.1.2. Diagrama Unifilar de las Rutas de estudio para el análisis de armónicos.

Durante la simulación de los programas Digsilent y Easy-Power y de acuerdo a la información proporcionada, se determino las siguientes diferencias que tienen ambos programas.



En la recopilación de los datos necesarios para la simulación de cada programa, el programa Digsilent presento menos dificultad para la adquisición de Datos y simplicidad en su manejo, debido a que no requirió su información suficientes datos, como sucedió con el programa Easy-Power.

Este programa tuvo ciertas limitantes en cuanto al requerimiento de ciertos valores en su adquisición de datos para la realizar las simulaciones, por ejemplo, características de las líneas y valores de reactancia de los motores.

- En el diseño de la red de estudio, ambos programas ofrecieron una facilidad de manejo de los dispositivos para diseñar dicha red, también al momento de realizar las simulaciones.
- Respecto a la obtención de la información necesaria para mostrar el impacto que se tiene en la red ante la presencia de armónicos, Easy-Power presento ciertas carencia al proporción la solución del espectro armónico completo en un punto determinado.
- En la comparación de los resultados obtenidos de los programas Digsilent y Easy-Power se determino que los valores obtenidos del programa Easy-Power, se obtuvo un rango de error considerable aproximadamente del 30% respecto a los valores reales los cuales se muestran en la siguiente tabla 5.1.

Tabla 5.1. Valores reales de la red Kimberley tomados por el mismo personal de la empresa.

MEDICIONES DE CAMPO										
DATOS	RUTA 1		RUTA 2		RUTA 3		RUTA 4		BUSGEN	
kV	0.480	13.8	0.480	13.8	4.16	13.8	4.16	13.8	13.8	115
%THD _v	7.118	1.53	9.06	2.58	8.95	2.21	7.13	1.87	1.1-1.2	0.2560
%HD _{v5}	4.697	1.27	6.795	1.04	3.526	1.09	5.477	1.013	0.8-.97	0.1452
%HD _{v7}	0.974	0.423	1.234	0.513	0.987	0.463	0.765	0.345	0.172	0.0231



Los resultados reales con respecto al lado de Baja tensión donde se conecta la carga, fueron proporcionados por trabajadores de la misma empresa Kimberly (puede existir un margen de error en estas mediciones, debido al tipo de equipo analizador de redes, la ubicación y tiempo de recopilación de información en los puntos estratégicos de las redes de estudio). Debido a los lineamientos o la política de la empresa, el departamento de la unidad especializada no pudo realizar las mediciones del lado de Baja Tensión.

En cuanto a los valores en la tensión de 13.8 kV son proporcionados por la Unidad de Ingeniería Especializada de CFE.

En la tabla 5.2 se muestra los resultados obtenidos en las simulaciones de ambos programas observando una diferencia notable tanto para valores de distorsión total e individual de voltaje en el nodo de carga, en este caso, analizando el comportamiento de la 5^a armónica para los dos programas.

Tabla 5.2. Valores obtenidos en la simulación de la red Kimberley por los programas Digsilent y Easy-Power.

DIGSILENT					EASY-POWER				
DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4
%THD _v	6.278	8.738	8.565	6.273	%THD _v	2.04780	3.22478	3.02476	2.07678
%HD _{v5}	2.697	2.795	3.526	3.477	%HD _{v5}	1.01796	2.00925	2.01962	1.00924
Vp.u	0.9851	0.9727	0.9843	0.9880	Vp.u	0.98248	0.99250	0.98812	0.99126

Por lo tanto, de acuerdo a los datos obtenidos se decidió utilizar para el análisis del flujo armónico, el programa Digsilent y en función de sus resultados proponer la metodología como se muestra en la figura 5.1.3. y 5.1.4. el cual nos muestra el resultado de la forma de onda y espectro armónico obtenido.

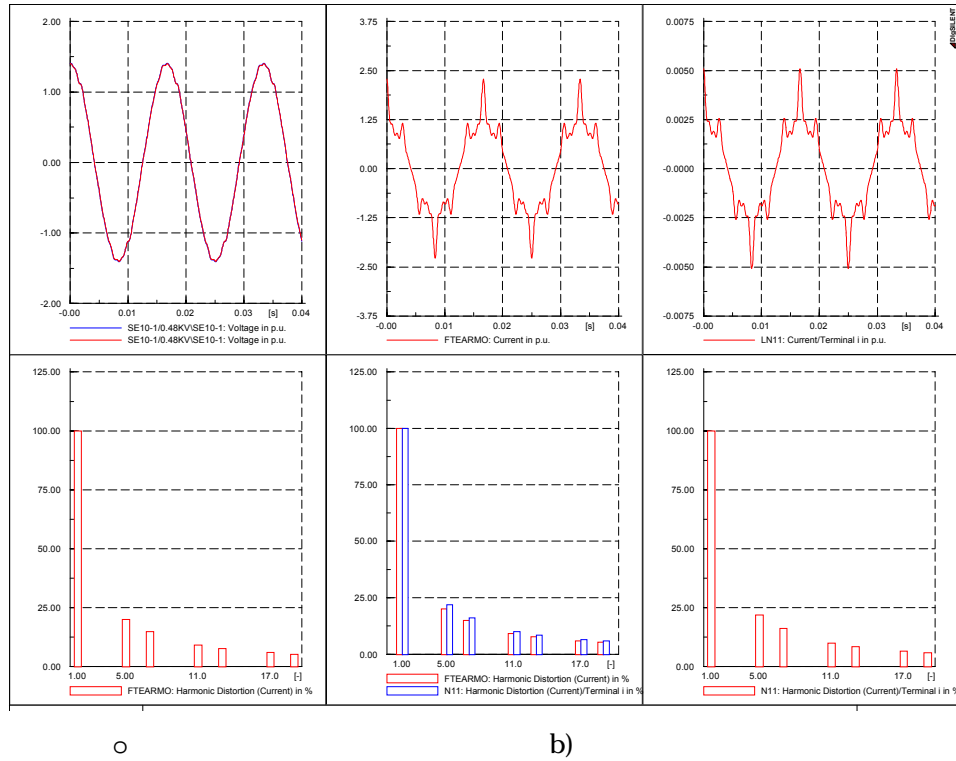


Figura 5.1.3. a) Comportamiento armónico del bus. b) Comportamiento armónico de la carga. c) Comportamiento armónico de las líneas.

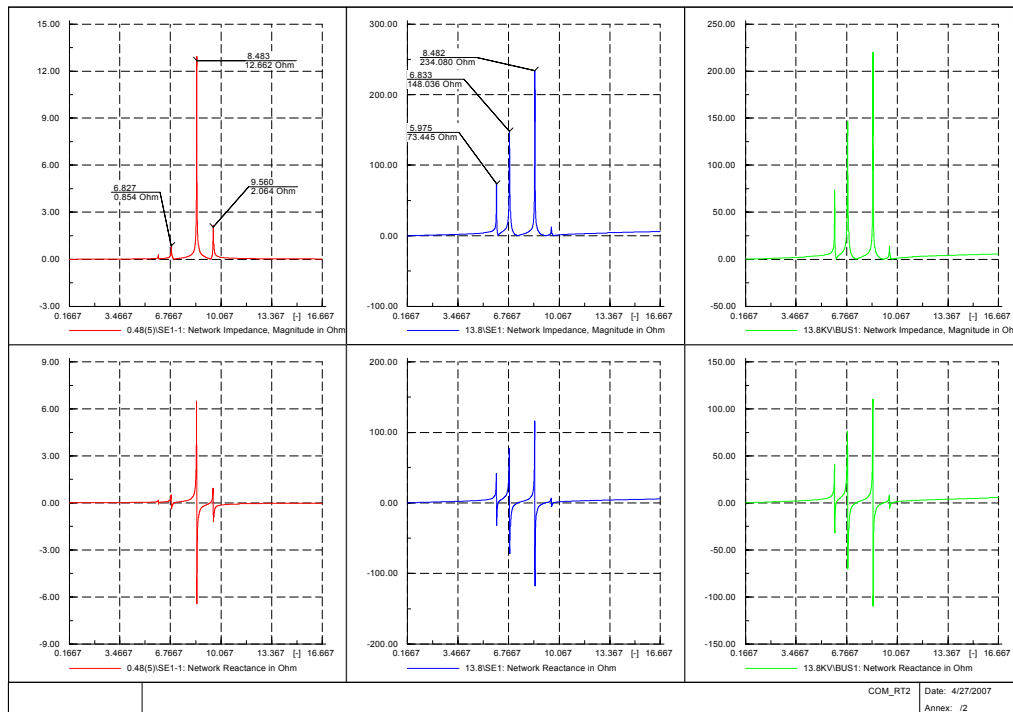


Figura 5.1.4. Comportamiento de las frecuencias resonantes por medio de barrido de frecuencia.



5.2 ANALISIS DE LAS SIMULACIONES EN LAS CUATRO TRAYECTORIAS DE LA RED PRINCIPAL

Durante la realización de las simulaciones se tiene las siguientes observaciones. En la red se observan un interruptor de amarre cuya función es ofrecer dos o cuatro circuitos independientes, si el interruptor está cerrado se tiene un mejor balance del flujo de potencia, pero el nivel del cortocircuito es mayor debido a la red robusta generada.

En el caso de los flujos armónicos se observan que el nivel de distorsión de voltaje en los buses, es mayor cuando el sistema contiene pocos dispositivos que propaguen o amortigüen la distorsión en el trayecto y el nivel de distorsión de corriente en los alimentadores es mayor en el punto de generación de los mismos.

También los armónicos se mueven en forma radial hacia niveles de voltajes más altos, teniendo así niveles de distorsión menor a una tensión mayor. También que el nivel de distorsión de voltaje en cada nodo es mayor cuando el nivel del cortocircuito es mayor en ese nodo.

En la red de Kimberly, cuando se integran las fuentes armónicas, el nivel de distorsión armónico de voltaje, aparte de ser perjudicado el mismo, afecta a otras cargas conectadas en ese mismo bus con un porcentaje de distorsión aproximadamente igual, por mencionar un ejemplo, en la Ruta 1 se obtuvo un valor de $THD_V = 6.276\%$. Al conectar una carga con la misma capacidad a la de los motores pero cuyo espectro armónico es diferente al de la fuente generadora de armónicos, se tiene un incremento del 2% aproximadamente, en el porcentaje de las corrientes armónicas existentes y la aparición de frecuencias armónicas de menor orden como lo muestra la siguiente figura 5.2.1.

El porcentaje de mayor de distorsión armónicas en los buses, se presenta en la localización de aquellos motor de mayor capacidad cuyo dispositivo controlador de velocidad esta en proporción a su capacidad de su potencia nominal del motor.

Realizando las simulaciones del análisis armónico de corriente en los motores de 1100Hp se tiene $THD_I = 10.11\%$ para secuencias positivas en sistema balanceado y en el caso de desbalanceado el porcentaje de $THD_I = 11.11\%$ para secuencia positiva y secuencia negativa THD_I es 12.37% .

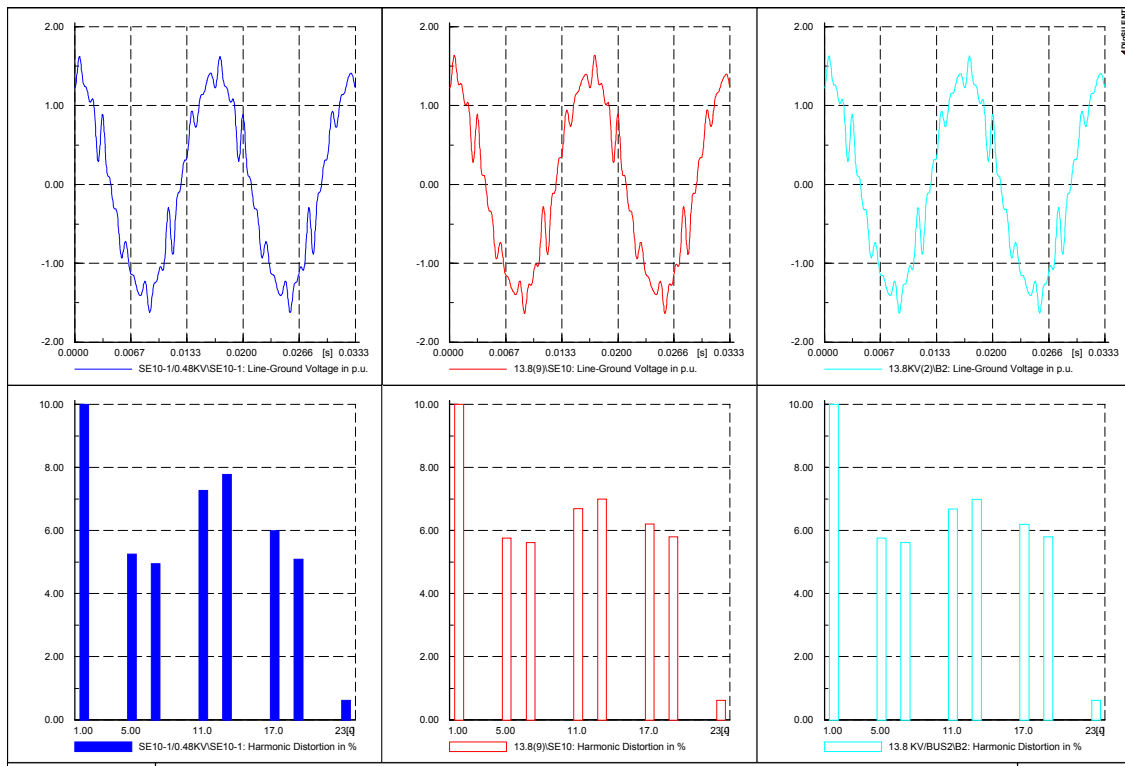


Figura 5.2.1. Comportamiento armónico en el bus de 0.48 kV en la ruta1 y con otra carga cuyo espectro armónico es diferente al de la fuente generadora de armónicos.

5.3 RED BALANCEADA CON ARMONICOS & SIN CAPACITORES

Como se menciona anteriormente tenemos un sistema en estado estable y balanceado y cuyos modelos de cargas estáticas están recreadas en el dominio del tiempo. En el sistema, las corrientes armónicas que sobresalen son 5^a y 7^a armónicas con un porcentaje entre 15.702 - 16.221% THD_I en los alimentadores de baja tensión, y un THD_I por abajo del 2.0% para los ordenes de armónico de 11^a, 13^a, 17^a y 19^a, en casi todo los buses del lado de baja tensión de la red.



En cuanto a la distorsión de voltaje en los buses se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en las tablas 5.3 y 5.4, empleando todas las fuentes generadoras de armónico al mismo tiempo y con la aplicación del interruptor de amarre en su posición de abierto o cerrado.

Tabla 5.3. Comportamiento THD_V y HD_{V5} en los buses de las cuatro rutas de estudio, sin interruptor de amarre sin capacitores y sistema balanceado.

INTERRUPTOR ABIERTO										
DATOS	RUTA 1		RUTA 2		RUTA 3		RUTA 4		BUSGEN	
kV	0.480	13.8	0.480	13.8	4.16	13.8	4.16	13.8	13.8	115
% THD_V	6.278	3.852	8.738	2.658	8.565	2.998	6.273	2.835	2.3-2.6	0.256
% HD_{V5}	2.697	1.637	2.795	1.079	3.526	1.099	3.477	1.135	1.1-1.3	0.145

Tabla 5.4. Comportamiento THD_V y HD_{V5} en los buses de 0.48 kV y 13.8 kV de las cuatro rutas de estudio, con interruptor de amarre sin capacitores y sistema balanceado.

INTERRUPTOR CERRADO										
DATOS	RUTA 1		RUTA 2		RUTA 3		RUTA 4		BUSGEN	
kV	0.480	13.8	0.480	13.8	4.16	13.8	4.16	13.8	13.8	115
% THD_V	4.319	3.483	6.589	2.468	4.127	2.648	4.102	2.635	2.465	0.255
% HD_{V5}	1.651	0.998	2.665	1.999	2.115	1.054	2.115	1.076	0.951	0.1423

El impacto que tiene en toda la red cuando el interruptor está en la posición abierto, se observa un porcentaje mayor de distorsión de voltaje en determinado buses pero sólo afectan a todos los dispositivos y carga paralelas de menor capacidad de aquellas rutas que se encuentran conectadas en ese bus con fuente de armónicas.

Por tal motivo, durante el proceso de simulación se decidió que en el análisis de armónicos se utilizara la condición más severa, que es cuando toda la red está en funcionamiento y esto se logra manteniendo el interruptor de amarre cerrado todo el tiempo durante las simulaciones.



Respecto a los niveles de Tensión de 13.8 kV, donde se encuentran líneas paralelas, se observan que la distorsión de voltaje individual disminuye cuando se tiene un arreglo de dos líneas en paralelo como la línea 16 de la ruta 1 y 2, cuyo valor THD_V es 6.78% en comparación con el valor de $THD_V = 7.31%$ obtenido por una línea.

Otra observación sucede en los transformadores debido a su porcentaje de impedancia parecida, en este caso, el tener una impedancia menor del $Z_T = 5%$ del transformador, se observa que el porcentaje THD_I en todos los órdenes de armónicos (5^a, 7^a, 11^a, 13^a, 17^a, 19^a) es aproximadamente el mismo y puede ocasionar que la distorsión en el bus de baja y alta tensión se incremente THD_V hasta un 300% aproximadamente, es decir, con una impedancia de 3% en el transformador de 2.5 MVA a 0.48 kV, su THD_V es de 149.85% y con una impedancia del 5.75% en el mismo transformador se tiene $THD_V = 49%$ aproximadamente. Esto nos indica que el valor de la impedancia del transformador debe corresponder de acuerdo a la capacidad del mismo o bajo la norma IEEE.

También, es importante considerar el tipo de conexión que se tiene en el transformador, por ejemplo al simular de manera independiente dos conexiones diferentes, es decir, una conexión delta-estrella aterrizada y cambiarla a una conexión delta-Zig-Zag aterrizada (conexión especial), la distorsión de voltaje en el bus del lado de baja tensión del transformador se reduce de $THD_V = 4.415%$ a 3.298 %.

Durante las simulaciones se considero la conexión Δ -ZN en la ruta 2 y una conexión Δ -YN en la ruta 3, ambas rutas tienen la misma capacidad nominal del transformador de 3.22 MVA y un motor de 1100 Hp conectado en sus buses, presentando una mayor disminución de la distorsión total de Voltaje en la conexión es Zig-Zag aterrizada del lado de baja tensión del Transformador, pero por ser una conexión especial el costo para utilizarla es mayor que la conexión Δ -YN de los transformadores.



A continuación se presenta una breve descripción de cada ruta de trabajo, con el fin de apreciar con detalle el impacto que tiene los armónicos en los propios dispositivos que integran cada una de estas rutas de estudio y en toda la red.

5.3.1 COMPORTAMIENTO DE LA RUTA 1 ANTE LA PRECENCIA DE ARMONICOS.

En el nivel de voltaje de 480 Volts con una fuente generadora de armónicos, predomina la aparición de la 5ª armónica en el bus, con un valor de THD_V de 4.319% y un HD_V de 1.651% y en alimentador de la carga un $THD_I = 28.6991\%$ y HD_I es de 20.002% de la fundamental.

Respecto a la corriente armónica que circula por el alimentador del transformador del lado de baja tensión (480 V) al lado de alta tensión (13.8 kV), la distorsión armónica total es $THD_I = 8.6991\%$ y el valor individual de 5ª armónica (HD_{I5}) es de 6.542% aproximadamente, cuando se tiene una fuente generadora de armónicos, como lo muestra la figura 5.3.1.

En el caso de emplear dos motores con la misma potencia conectados en el bus de 0.48 kV, pero solo uno de ellos tiene un controlador de seis pulsos, las corrientes armónicas afectan al motor sin controlador y con un porcentaje de $THD_{I5} = 1.3201\%$ de 5ª armónica y $THD_{I7} = 0.7201\%$ de 7ª armónica. También tiene como consecuencia que la misma corriente armónica que circula en el alimentador del devanado secundario del transformador 480 V, se reduce a la mitad si tenemos una carga paralela a esta fuente generadora con la misma potencia de carga.

En el lado de 13.8 kV del bus general, la distorsión armónica de voltaje se reduce una tercera parte del valor total e individual, cuando participan los tres motores de las rutas 1, 2 a una tensión de 480 volts como se aprecias en la figura 5.3.1., ya que ambas rutas están conectadas a un mismo punto de acoplamiento común.

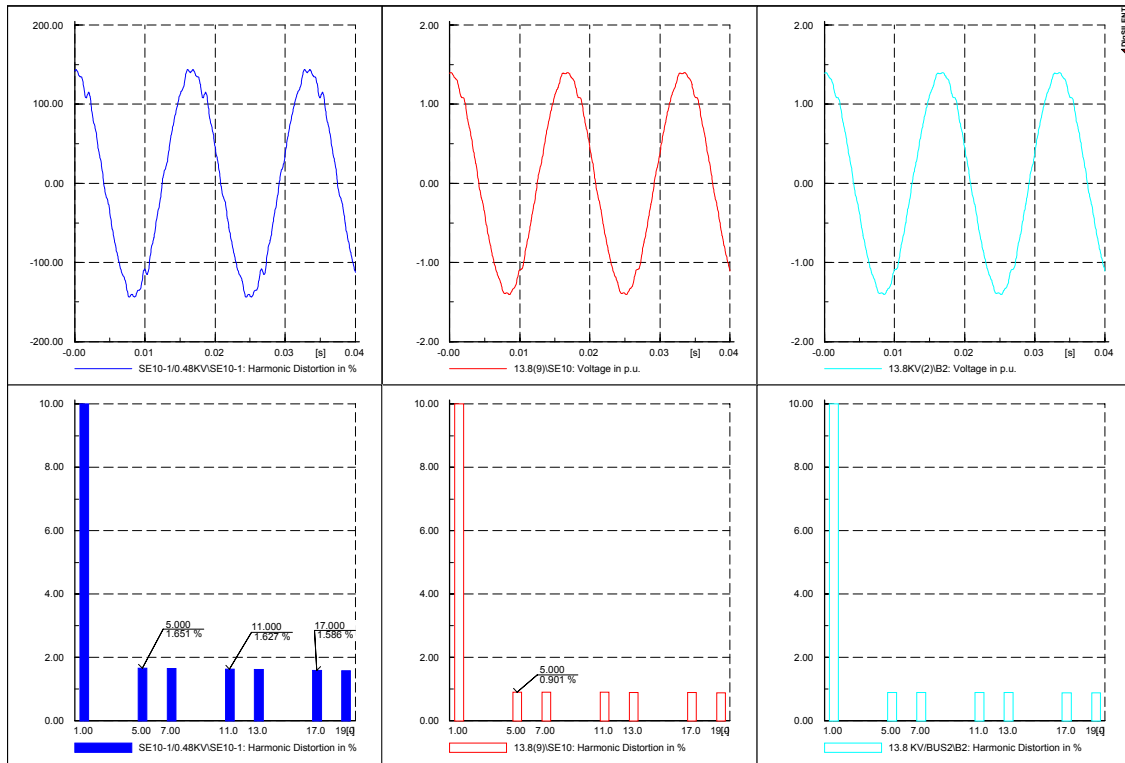


Figura 5.3.1. Comportamiento HD_V , en los buses de la trayectoria de la ruta 1,2 sin capacitores, con interruptor cerrado y sistema balanceado.

En cuanto a las ramas conectadas aún bus, donde circula las corrientes armónicas, estas se ven afectadas con el mismo porcentaje THD_V de 0.4829% aproximadamente como sucede con la tensión de 13.8 kV de la ruta 3 figura 5.3.2, donde todas aquellas líneas que estén conectadas a ese bus, tienen el mismo nivel de distorsión, esto nos dice que la impedancia de la línea que conecta a este bus es muy pequeña y que se podría ser despreciada para el estudios de análisis de armónicos, lo cual no se hizo.

Respecto a los Motores de las otras rutas de estudio conectadas al bus donde se ubican la fuente generadora, se ven afectados aproximadamente con un valor de corriente THD_I de 0.107% y un valor de $HD_I = 0.074%$ ambos de una 5^a armónica y un valor de voltaje de THD_V de 0.02476% y $HD_V = 0.00923%$ de la tensión de 13.8 kV en las ramas conectadas a este bus, manteniéndose casi constante.

Para las otras rutas la distorsión total e individual de voltaje (para los buses) y corriente (para los alimentadores) a diferentes voltajes se tienen en pequeños porcentajes de distorsión idénticos entre ellos.

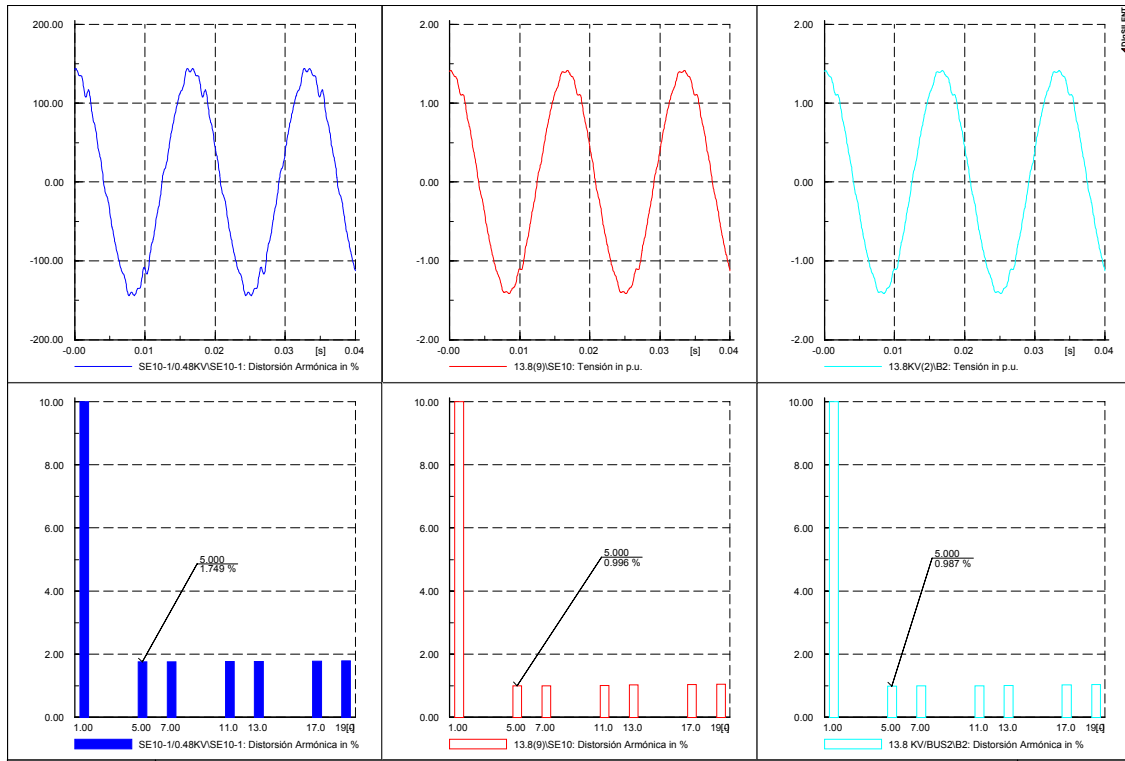


Figura 5.3.2. Comportamiento HD_V en los buses de la trayectoria de la ruta 1, con línea paralelas al bus de la carga y sistema balanceado.

5.3.2 COMPORTAMIENTO DE LA RUTA 2 ANTE LA PRECENCIA DE ARMÓNICOS

Con respecto al comportamiento de esta ruta, se observa que el valor THD_V y HD_V de voltaje varía en proporción al número de motores que están conectados en 480 volts, es decir, la distorsión en el bus cuando tiene un motor de 1100 Hp su valor de $THD_V = 6.589\%$ y $HD_V = 2.655\%$ figura 5.3.3, respecto a la fundamental, pero cuando tenemos tres motores de la misma capacidad, la distorsión se incrementa tres veces en el bus de 480 volts.

Observando en el nodo que alimenta de energía eléctrica a la fuente generadora de armónico y a la vez se tiene conectada dos ramas en paralelo a esta, el nivel de distorsión armónico, es mayor en aquellos líneas que alimentan a pequeñas cargas, en este caso, la distorsión en el alimentador paralelo a la rama de la fuente generadora es de $THD_I = 30.3987\%$ y en el alimentador de la fuente es $THD_I = 28.6696\%$ ambos alimentadores tienen las mismas características.

Este comportamiento es semejante con la quinta y séptima armónica. Esto nos dice que las armónicas busca una impedancia pequeña para circular y que dependen también del tipo de arreglo de los alimentadores (doble o una sola línea).

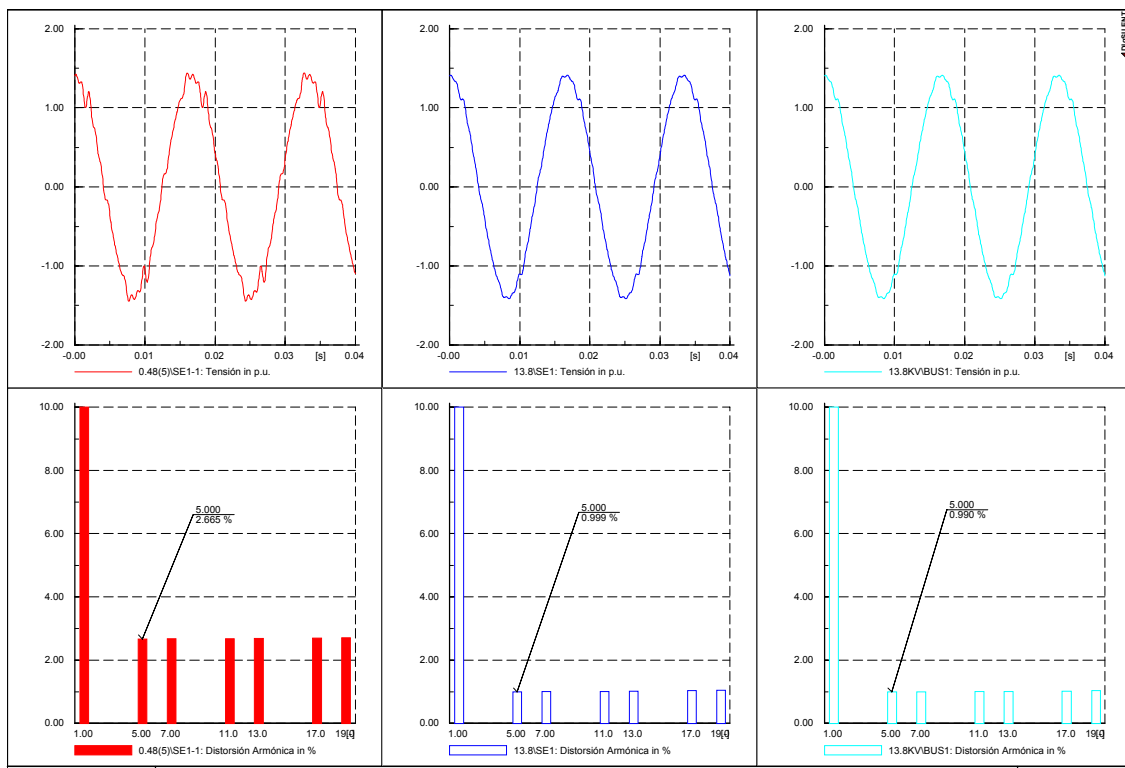


Figura 5.3.3. Comportamiento de la distorsión individual de voltaje, en los buses de la trayectoria de la ruta 2 sin capacitores y sistema balanceado.



Analizando el comportamiento en los buses de 480 volts en comparación con la tensión de 13.8 kV, ambas ramas existe aproximadamente una proporción de un tercio en la rama, con tres fuentes generadoras con características similares en baja tensión, resultando un valor de $THD_V = 8.8733\%$ en el bus de 0.48 kV y con una $THD_V = 2.17642\%$ aproximadamente en 13.8 kV. En cuanto al transformador de esta ruta se tiene en un decremento de la distorsión de 3 veces menor al nodo que contiene las fuentes generadoras.

En los dos transformadores conectados en paralelo al bus de 13.8 kV, la distorsión total de voltaje en el lado de alta tensión se mantiene aproximadamente el mismo valor de $THD_V = 0.74045\%$.

5.3.3 COMPORTAMIENTO DE LA RUTA 3 ANTE LA PRECENCIA DE ARMONICOS.

En esta ruta se observa que el comportamiento de la distorsión total en el bus de 4.16 kV con dos motores de diferente capacidad, se observa que cuando ambos motores inyectan el espectro armónico al bus donde están conectadas, este toma 1.91719 % de la distorsión total de la fuentes generadoras, tanto para 5ª y 7ª armónica.

Para las rutas 3, 4, el comportamiento de las corrientes armónicas independientemente del orden de armónico, la tendencia es parecida en cuanto como afectar al bus donde se encuentra conectado, dependiendo del número y tipo de fuentes generadas de armónica conectada a ese bus y la influencia que tiene con las ramas paralelas conectadas al bus de 13.8 kV que no contienen cargas significativas como lo muestra las figuras 5.3.4. y 5.3.5

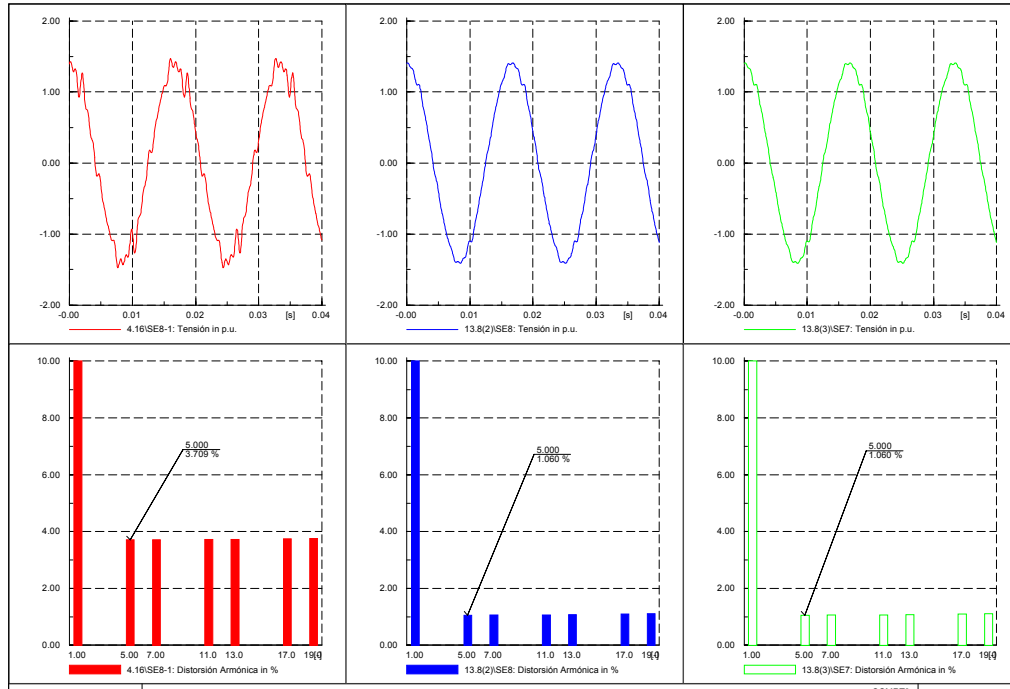


Figura 5.3.4. Comportamiento de la distorsión individual de voltaje en los buses que integran la trayectoria de la ruta 3 sin capacitores y sistema balanceado.

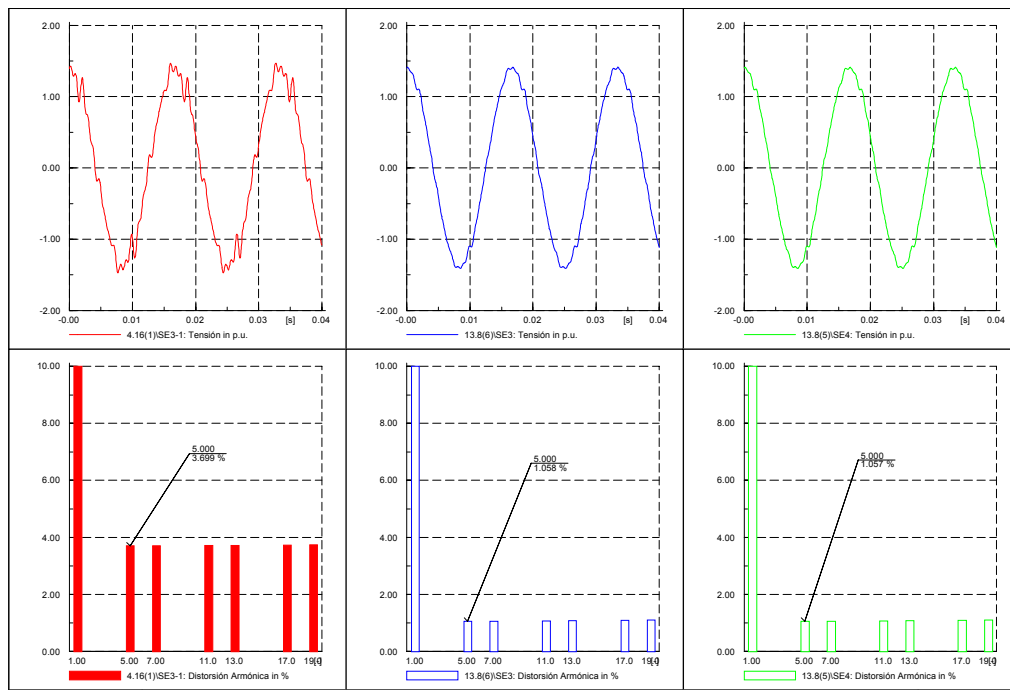


Figura 5.3.5. Comportamiento de la distorsión individual de voltaje en los buses que integran la ruta 4 sin capacitores y sistema balanceado.



5.3.4. - COMPORTAMIENTO DEL BUS PRINCIPAL DEL LADO DE CFE.

En el punto de suministro, es decir, en el bus de 13.8 kV del lado de CFE, tenemos que los niveles de distorsión son menores del 1% de la HD_V , en todos los órdenes armónicos de acuerdo a la figura 5.9.2.

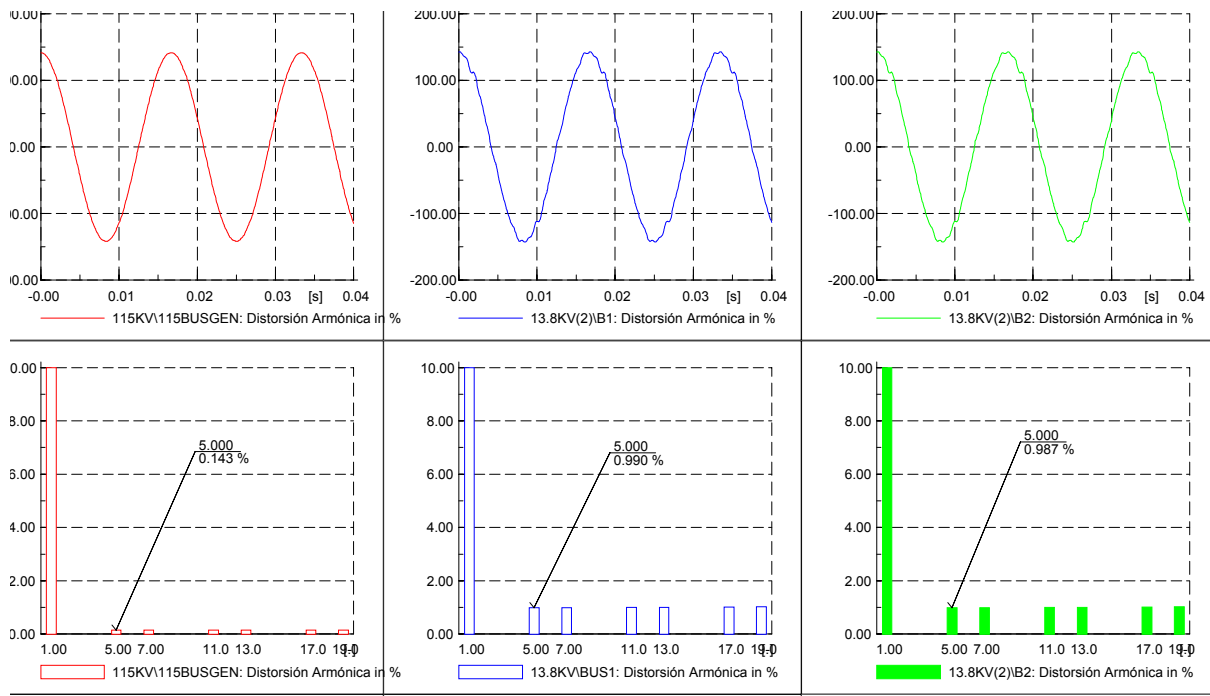


Figura 5.3.6. Comportamiento del HD_V en los buses de la trayectoria del bus general sin capacitores, con interruptor cerrado y sistema balanceado.

Para una mejor apreciación del impacto de las armónicas se conectó una carga ficticia no lineal, con un espectro armónico diferente a la de las otras cargas, por ejemplo, un horno de arco eléctrico cuyo espectro abarcan desde la 2ª hasta 13ª armónicas con sus porcentajes de distorsión prácticos de acuerdo al informe de la U.I.E y que es un sistema desbalanceado, el cual se conectó en el bus general 115 kV.

El comportamiento de la distorsión de voltaje es aproximadamente el mismo en todos los buses que se encuentran en un nivel de tensión inferior del bus de 115 kV, donde está conectado el horno, teniendo un porcentaje de THD_V aproximado entre

10.28% - 10.70% en 115 kV y que se reduce de 5.5 - 8.0 THD_v en 13.8 kV tanto para secuencias positivas y negativa en todas las rutas, en el lado de las cargas se observo una variación de la niveles de distorsión diferentes en cada una de las rutas como se observa en la tabla en 5.5, que trabaja la red como un sistema desbalanceado. , de acuerdo a la siguiente figura 5.3.7.

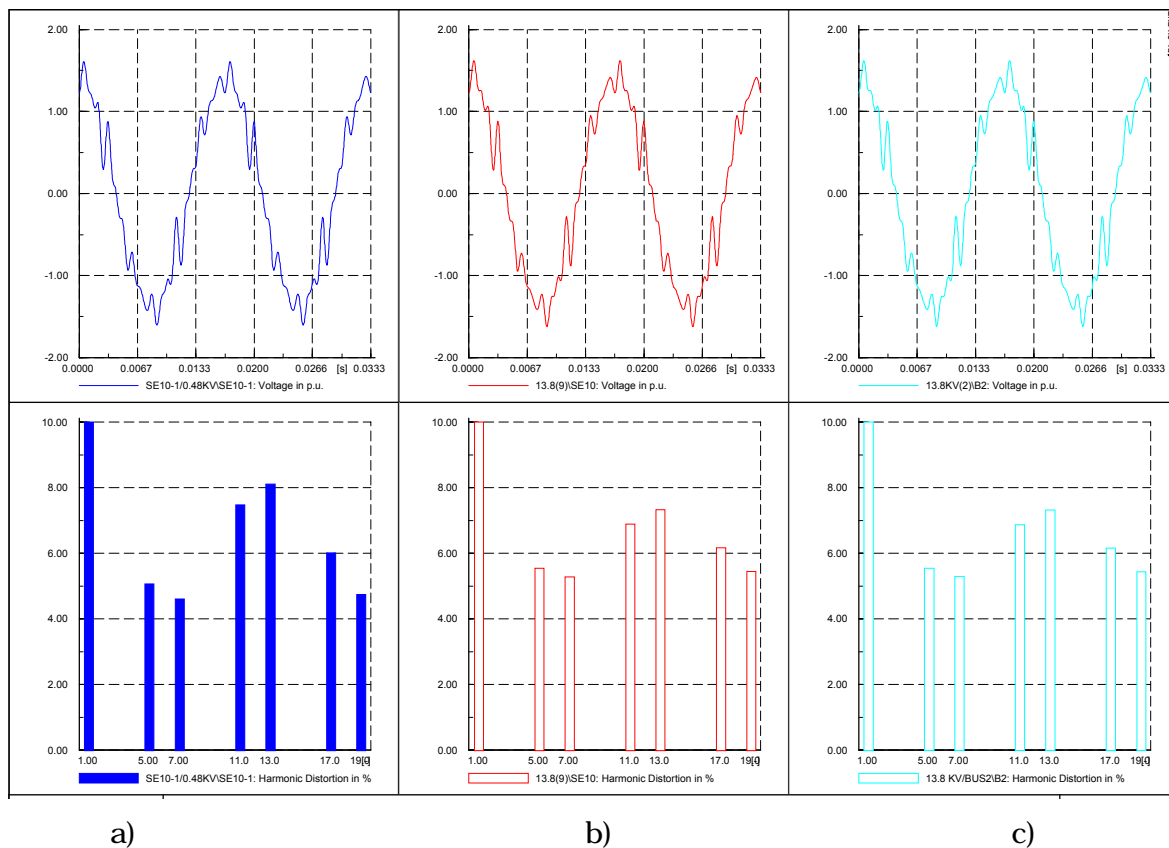


Figura 5.3.7. a) Espectro Armónico en el Bus de la ruta 2 de 0.48 kV con 3 motores de 1100 Hp, con tiempos de operación alternos. b) y c) Espectros Armónicos en los Buses de 13.8 KV de la misma ruta 2 y con interruptor de amarre cerrado y con el horno de arco eléctrico.

En la simulación respecto del horno de arco eléctrico, para caracterizarlo se tomo solo el espectro armónico obtenido de valores reales de prueba de campo en trabajos realizados por UIE. Los datos del espectro armónico se encuentran en el apéndice D.

5.4.- RED DESBALANCEADA DE ARMONICOS SIN CAPACITORES

Para el caso del sistema desbalanceado, se considero trabajar con las tres secuencias (+, - y 0) además se desbalancea las cargas no lineales para que el programa pudiera determinar las distorsiones en las tres secuencias, como se observa en la tabla 5.5, las cuales se caracterizaron con el espectro armónico de las tres fases de un controlador de 6 pulsos proporcionado por la U.I.E, determinando un incremento de la distorsión total armónica en la secuencia (+) principalmente en el lado de 13.8 kV de la ruta 2 por contener mayor numero de motores y de gran capacidad, pero la secuencia (-) contiene mayor porcentaje de distorsión total en el lado de la carga en todas las rutas.

Tabla 5.5. Comportamiento de THD_v & HD_v en los buses de la trayectoria de las rutas con las secuencias (+, - y 0), sin capacitores, con interruptor cerrado y sistema desbalanceado.

INTERRUPTOR CERRADO										
DATOS	RUTA 1		RUTA 2		RUTA 3		RUTA 4		BUSGEN	
kV	0.480	13.8	0.480	13.8	4.16	13.8	4.16	13.8	13.8	115
% $THD_{V(+)}$	3.852	13.27	4.658	13.732	5.998	14.56	2.835	14.27	11.2	15.4
% $HD_{V5(+)}$	1.799	0.996	2.665	0.999	3.709	1.060	3.699	1.058	0.987	0.143
% $THD_{V(-)}$	4.567	2.057	4.487	1.949	6.445	2.984	6.440	2.889	0.425	1.98
% $HD_{V5(-)}$	2.049	1.750	3.632	1.744	6.128	1.567	4.254	1.289	0.254	0.743
% $THD_{V(0)}$	0.014	0.002	0.025	0.275	0.256	0.236	0.282	0.294	0.002	0.002
% $HD_{V5(0)}$	0.000	0.001	0.000	0.0002	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000

Las siguientes graficas muestran el comportamiento de HD_v de las rutas (1,2,3,4,) únicamente para la sec (+), con fin de apreciar el impacto que tiene estas en los buses de las misma rutas y compara con las secuencia positiva del sistema balanceado.

En este punto no se muestra las demás secuencias, por que, para ver el comportamiento correcto de las tres secuencias se requiere modelos reales de cargas dinámicas, y que en estos momentos lo que hay están en la etapa de experimentación, es por eso que utilizamos cargas estáticas como son los motores y por ser un sistema balanceado.

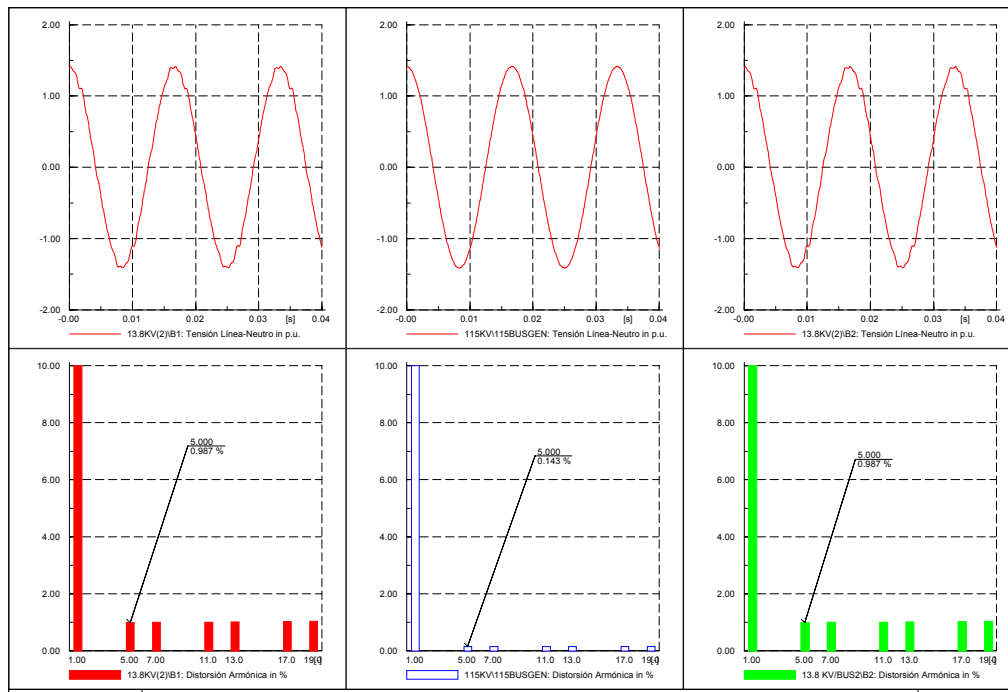


Figura 5.4.1. Comportamiento HD_V en el bus general sin capacitores, con interruptor cerrado y sistema desbalanceado sec (+).

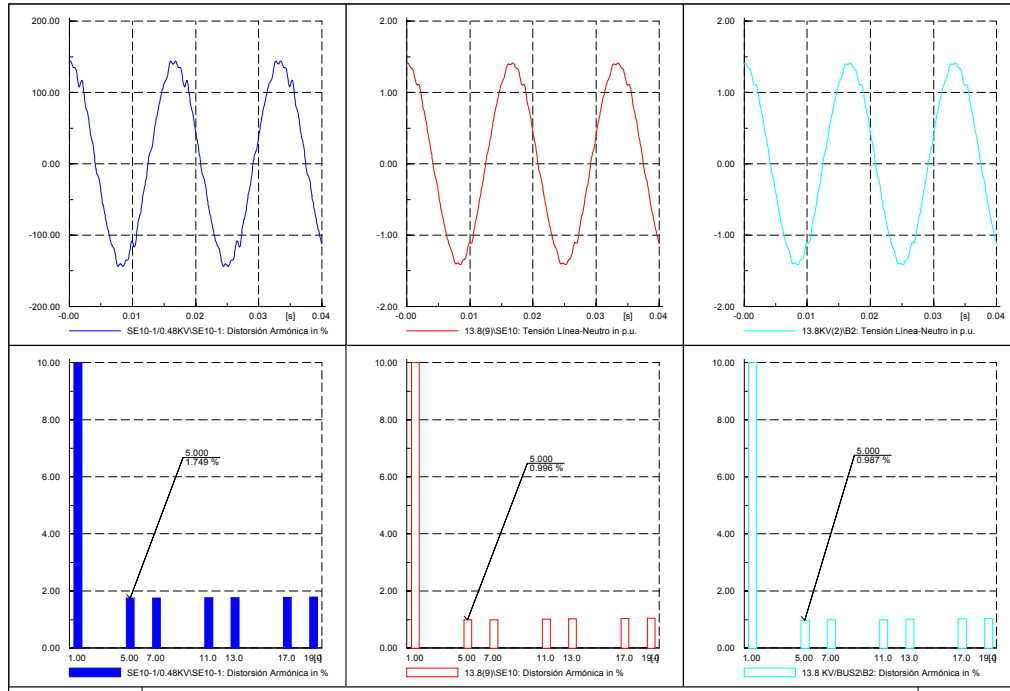


Figura 5.4.2. Comportamiento de HD_v en la trayectoria de la ruta 1 sin capacitores, con interruptor cerrado y sistema desbalanceado sec (+).

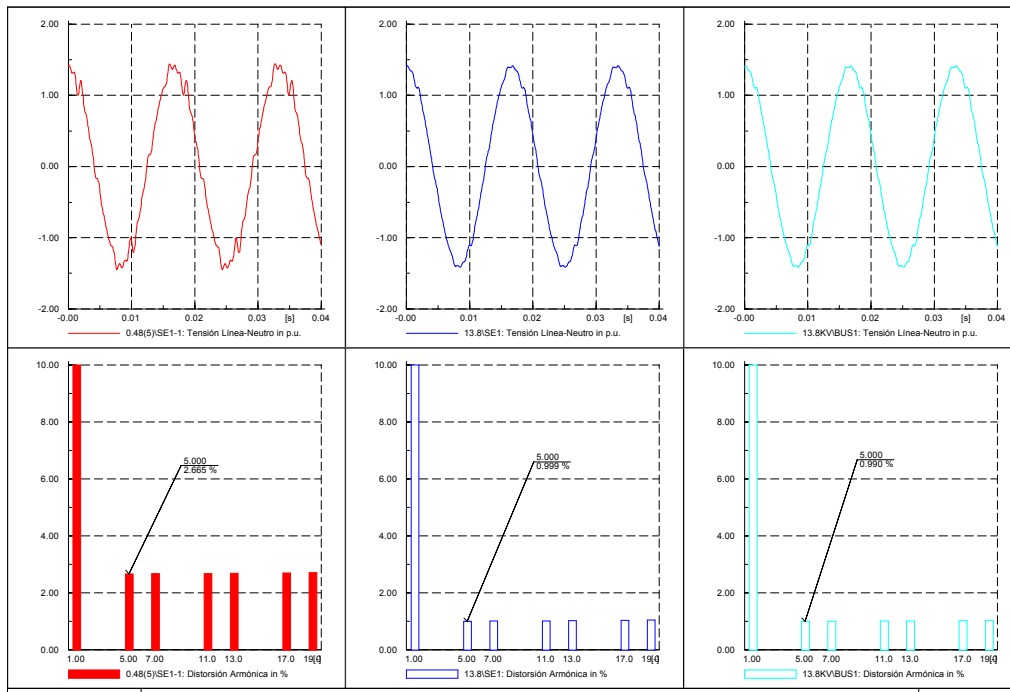


Figura 5.4.3. Comportamiento de HD_v en la trayectoria de la ruta 2 sin capacitores, con interruptor cerrado y sistema desbalanceado sec (+).

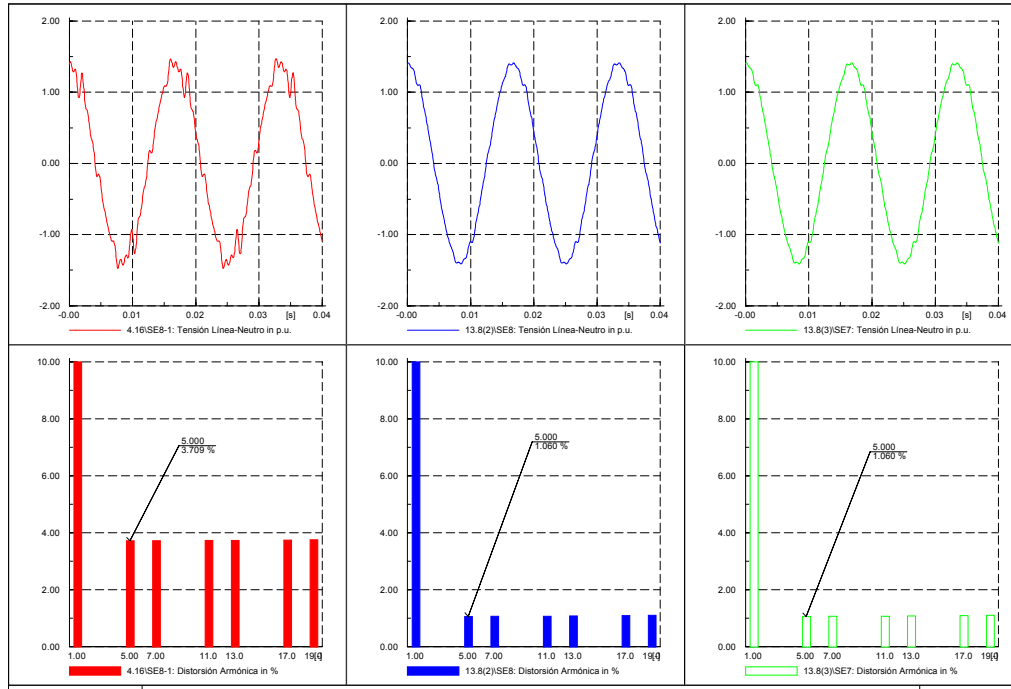


Figura 5.4.4. Comportamiento HD_V de la trayectoria de la ruta 3 sin capacitores, con interruptor cerrado y sistema desbalanceado sec (+).

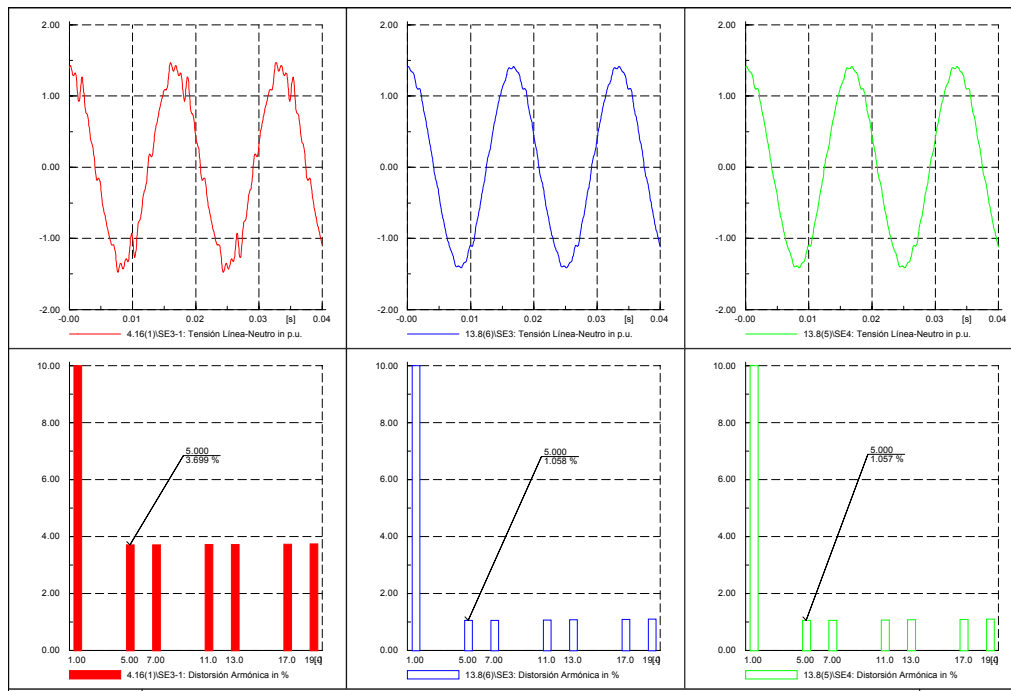


Figura 5.4.5. Comportamiento de HD_V de la trayectoria de la ruta 4 sin capacitores, con interruptor cerrado y sistema desbalanceado sec (+).



5.5.- INSTALACION DE CAPACITORES PARA COMPENSACION DE REACTIVOS.

El diseño de los capacitores depende de diferentes aspectos, como el nivel del voltaje que se desea obtener a través de la corrección del F.P, el nivel de cortocircuito que se tiene en el punto donde se requiera compensar para evitar la resonancia, el tipo de conexión en el banco del capacitor, el lugar en el que se requiere ubicar para la compensación y si es necesario, el numero de capacitores para formar el banco sea uno o n-capacitores para lograr la compensación y principalmente el costo que tendríamos para llevarlo a cabo.

la finalidad del diseño del banco de capacitores es corregir el factor de potencia y a su vez llegar al voltaje a su valor nominal en cada nodo, tomando en cuenta el efecto que éste pudiera tener con las armónicas presentes. Para tener una visión de la respuesta del sistema al instalar los bancos de capacitores, se realizó un barrido de frecuencia en los buses del sistema y se encontró diferentes frecuencias de resonancia (3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 13) en las cuatro rutas.

La Tabla 5.5.1 muestra los parámetros finales del diseño de los banco de capacitores en cada una de las rutas, con las características necesarias en su diseño, los cuales fueron instalados en el bus donde se localiza la carga.

La IEEE, recomienda que en los sistemas eléctricos industriales que presentan distorsión de armónicas significativas, no es recomendable instalar capacitores directamente a la línea ya que además de someterse a los capacitores a un ambiente poco propicio para su buen funcionamiento, estos pueden crear la resonancia con la compañía suministradora de energía y a la vez incrementar la distorsión armónica de corriente.



Tabla 5.5.1 Características esenciales del diseño del banco de capacitores en las cuatro rutas de estudio.

PARÁMETROS DE DISEÑO PARA EL BANCO DE CAPACITORES EN CADA RUTA					
Datos		Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 4
Potencia de corto circuito trifásica	MVA	7.501	62.325	50.565	44.517
Voltaje de línea del capacitor	KV	0.48	0.48	4.16	4.16
Potencia trifásica del capacitor	MVAR	0.2	0.4	0.6	0.8
Potencia monofásica del capacitor	MVAR	0.066	0.133	0.2	0.333
Potencia nominal de Unidad capacitoras	MVAR	0.02	0.025	0.05	0.020
Voltaje nominal de Unidad capacitoras	KV	0.24	0.1385	1.2	0.6
GRUPOS SERIE de los capacitores		2	2	2	4
Unidades Capacitivas falladas		0	0	0	0
Corriente a la frecuencia de sintonía del filtro	A	240.5	721.69	83.271	138.78
Frecuencia de sintonía del filtro	Hz	5	5	5	5
Calidad del filtro (Q)		30	30	30	30
Frecuencia del sistema	Hz	60	60	60	60

Para corregir el factor de potencia, la conexión de los bancos de capacitores se realizó en delta y se ubicaron en diferentes puntos de las cuatro rutas, tanto en el lado de baja tensión donde se ubica la carga y en los buses de alta tensión (13.8 kV) del lado del usuario y la empresa suministradora, obteniendo los siguientes resultados, tabla 5.6, con la colocación final de ellos cerca de la carga. Con la introducción de los bancos de capacitores, el valor THD_v se incrementa con un 55% aproximadamente para todas las rutas, con valores de diferentes capacidad de las fuentes tabla 5.7.

Tabla 5.6. Comportamiento de Voltaje en los buses de cada trayectoria de las rutas con o sin capacitores, con interruptor cerrado y sistema balanceado.

SIN CAPACITORES					CON CAPACITORES				
DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4
0.48 kV	0.9648	0.9541	0.0	0.0	0.48 kV	0.9912	0.9917	0.0	0.0
4.16kV	0.0	0.0	0.9518	0.9671	4.16kV	0.0	0.0	1.0032	0.9912
13.8kV _{usuario}	0.9851	0.9727	0.9843	0.9880	13.8kV _{usuario}	0.9958	1.0045	1.0245	0.9978
13.8kV _{busgen}	0.9881	0.9825	0.9858	0.9897	13.8kV _{busgen}	0.9998	1.0104	1.0267	0.9982



Entre los valores de las Frecuencias de resonancias existente, para una 5^a armónica comparando en todas las rutas, existe una pequeña variación de un $\pm 1\%$ aproximadamente de THD_V entre ellas, como lo muestra la tabla 5.7. Esto nos indica que al modificar la impedancia de la red en el punto cerca de la carga, se puede presentar rápidamente una resonancia y los valores de HD_V y THD_V , se incrementaran debido a que se están acercando a una frecuencia de resonancia donde se conecta el capacitor.

Tabla 5.7. Comportamiento de THD_V y HD_V en los buses de cada ruta con o sin capacitores, y sistema balanceado.

SIN CAPACITORES					CON CAPACITORES				
DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4
THD_V	5.5114	8.5752	6.6816	8.6662	THD_V	10.7892	14.7529	11.8716	18.3624
HD_{V5}	4.9795	6.0062	5.0470	6.0427	HD_{V5}	7.9348	9.7062	8.5470	12.4827
Vp.u	0.9648	0.9541	0.9518	0.9671	Vp.u	0.9912	0.9917	1.0032	0.9912

Los capacitores una vez colocados se debe realizar un barrido de frecuencia para determinar si existe algún elemento de la red en resonancia o si el orden de corrientes armónicas que aparecen podrían entrar en resonancia con la red, es este caso las rutas presentan una frecuencia de resonancia en 5^a armónica principalmente, elevando el valor de la corriente armónica hasta un 300% de la frecuencia fundamental, como lo muestra la tabla 5.8.

Si se encuentran trayectorias o líneas conectadas a un bus donde está el capacitor, estas tienden a ser afectadas con ese mismo porcentaje de distorsión.

Tabla 5.8 .Comportamiento THD_v & HDV₅ de las rutas de manera independiente cuando se conecta el banco de capacitores en cada ruta.

	RUTA 1 CON CAPACITOR 192 KVAR	RUTA 2 CON CAPACITOR 385 KVAR	RUTA 3 CON CAPACITOR 576 KVAR	RUTA 4 CON CAPACITOR 780 KVAR	BUSGEN C/ CAPACITOR 350 KVAR
V [kV]	0.48	0.48	4.16	4.16	13.8
THD _v	168.44%	376.13%	239.45%	275.98%	21.13%
HDV _{RT1}	168.44%	68.97%	44.72%	38.56%	14.34%
HDV _{RT2}	27.96%	376.13	43.98%	37.42%	11.23%
HDV _{RT3}	28.30%	69.21%	239.45%	41.43%	10.46%
HDV _{RT4}	26.45%	69.32%	48.74%	275.98%	11.75%
HDV _{BSG}	24.45%	68.65%	46.08%	39.28%	21.13%

Los capacitores, dependiendo a la frecuencia que son sintonizando, se observan que los valores de HD_v de 5^a armónica se disparan entre 16.6 -18.60 %, si el capacitores se conectan directamente al bus esto incrementa la armónicas hacia la fuente que generan el armónico y hacia los dispositivos localizados en la dirección radial de ese bus, En las pequeñas cargas paralela a la fuente generadora armónica, el valor THD_I es mayor al THD_I de fuente generadora.

En las siguientes gráficas, se proporcionan información adicional en estudios de contingencia donde el interés es la obtención del espectro o forma de onda en los buses de las rutas, así como el comportamiento de la resonancia en diferentes puntos de la red, ya que el mayor de los problemas producidos se presenta con la proximidad en la 5^a y 7^a armónica.

A continuación se muestra el comportamiento de la reactancia(X) de la ruta 1 debido a la 5^a armónica y con el capacitor instalado en la barra de 480 volts, Fig.5.5.1.y el comportamiento de la impedancia (Z) en la misma ruta 1 Fig. 5.5.2. Para tomar medidas correctivas y evitar la resonancia de este último.

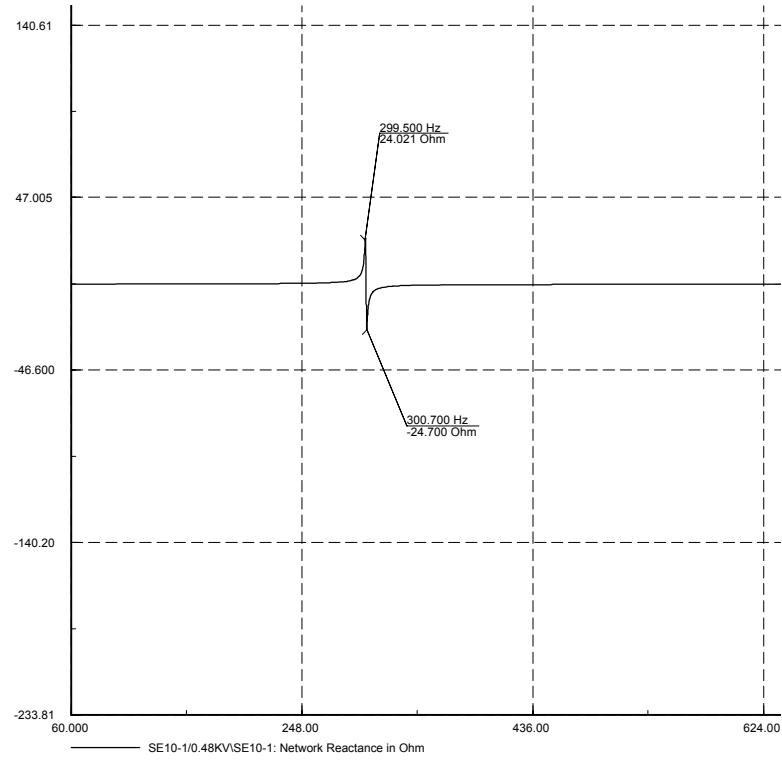


Figura 5.5.1 Frecuencia Resonante de 5ª armónica de la ruta 1 conectando un capacitor a 480 V.

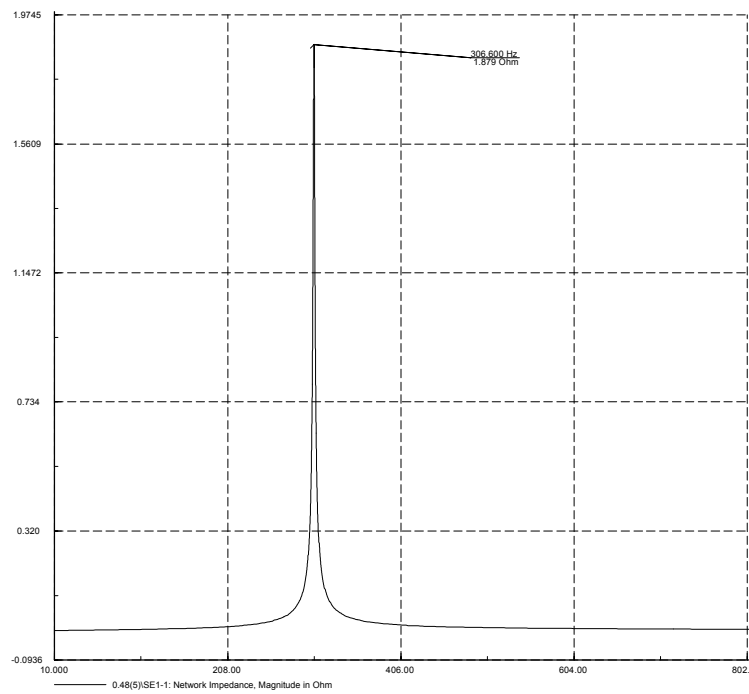


Figura 5.5.2. Frecuencia de Resonancia de 5ª armónica en la ruta 2, conectando un capacitor a 480 V.

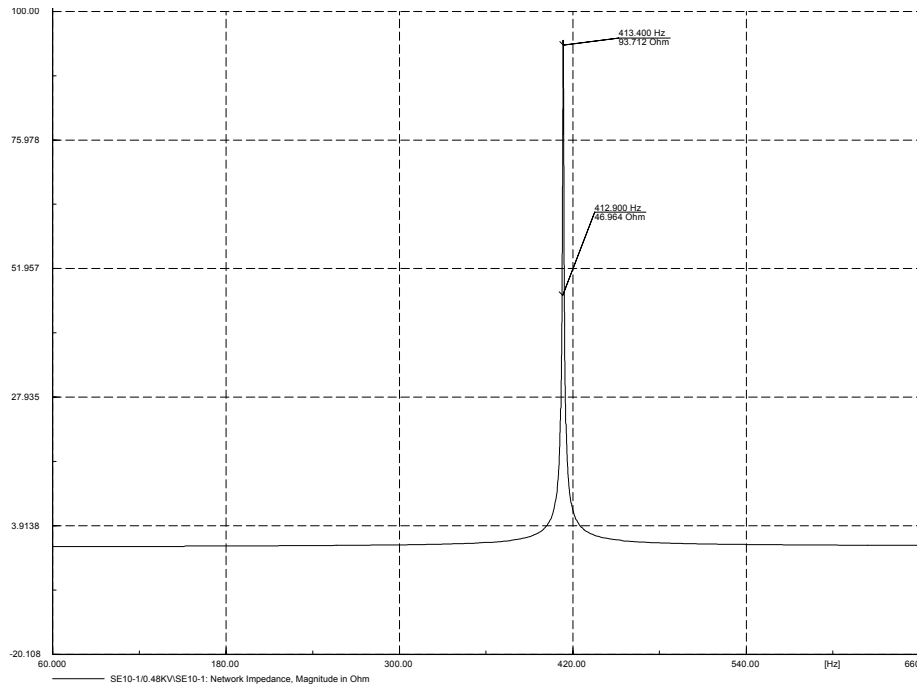


Figura 5.5.3. Frecuencia Resonante de 7^a armónica de la ruta 2 conectando un capacitor a 480 V.

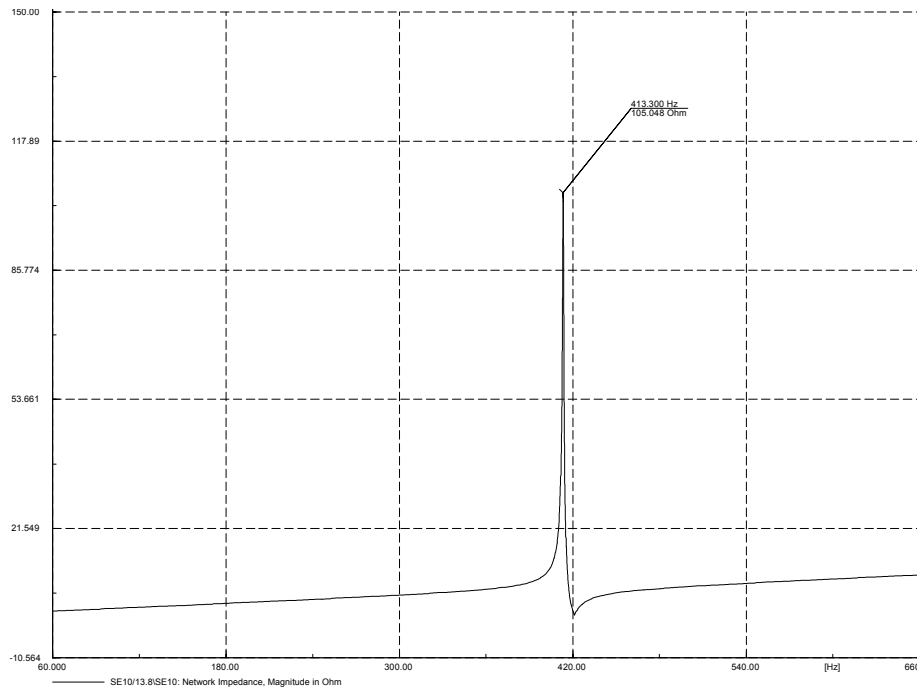


Figura 5.5.4. Frecuencia de Resonancia de 7^a armónica en el capacitor de la ruta 2 a 13.8 kV usuario y empresa suministradora.



En el análisis de las frecuencias, se presentan un orden armónico cercano a las frecuencias de resonancia de 5^a y 7^a armónica que puede incrementar de manera significativa, el contenido armónico en la red. Una solución previa que se debe realizar antes de conectar los capacitores es el verificar que tipo de armónicas tenemos en la red para observar que no coincidan con las armónicas del espectro de carga y después conectar los capacitores.

5.6 INSTALACION DE FILTROS PARA MITIGAR LOS ARMONICOS

Ante la problemática de corregir el factor de potencia y evitar la resonancia del sistema se procedió a buscar una solución que considere ambos aspectos en ese caso el emplear un filtro de armónicos para la 5^a y 7^a armónica existente y aprovechar de manera conjunta el banco de capacitores - filtro y una correcta ubicación.

El control de armónicas por filtros pasivos minimiza la distorsión armónica causada por las cargas no lineales y es el más utilizado en los sistemas industriales y su costo inicial es muy bajo comparado con el filtro activo, además de ópera fácilmente y proporciona potencia reactiva. Con el objetivo de seleccionar un filtro es proporcionar una trayectoria de impedancia baja a la armónica a filtrar, será necesario conocer a qué valor de los elementos es menor la impedancia. Esto se logra aproximadamente a la resonancia del filtro y que puede ser calculada con la resistencia de la reactancia capacitiva e inductiva que varían con la frecuencia, siendo necesario calcular para cada frecuencia armónica dada.

Otra de las características principales que se deben tener en cuenta en la determinación de los parámetros del filtro es la sintonización y la calidad del filtro. Los datos de construcción del diseño del reactor del filtro se presentan en la tabla 5.8.1, con las características necesarias para llevarse a cabo. Para los filtros aplicados al control de armónicas en el sistema eléctrico, es necesario realizar un estudio de armónicas una vez determinado el filtro, también es necesario observar que las capacidades nominales de los elementos del filtro se encuentren dentro de los límites estandarizados.



Tabla 5.8.1 Parámetros calculados para el reactor del filtro.

PARAMETROS CALCULADOS PARA EL REACTOR DEL FILTRO					
Datos		Ruta 1	Ruta 2	Ruta 3	Ruta 4
React, capacitiva a la frecuencia de sintonía	Ω	221.52	110.7	554.6	338.2
Reactancia inductiva a 60 Hertz	Ω	44.3	22.15	110.9	66.56
Inductancia	mH	117.5	58.75	29.25	176.5
Frecuencia de sintonía del filtro	Hz	300	300	300	300
Resistencia del filtro	Ω	7.38	3.69	184.88	184.88
Voltaje máximo a través del filtro a 60 Hertz	kV	29.098	29.098	252.28	252.18
Corriente a través del capacitor a 60 Hertz	A	27.36	54.72	9.47	9.47
Corriente a través del reactor a 60 Hertz	kA	2.405	72.169	83.27	83.27
Voltaje a través del capacitor a 60 Hertz	kV	30.30	30.31	262.8	262.67
Voltaje armónico a través del capacitor a 60 Hertz	kV	532.75	7993	46184	46185
Potencia reactiva entregada por el banco	MVAR/fase	0.6933	1.38	2.079	0.346
Potencia reactiva consumida por el reactor	MVAR/fase	0.0277	0.055	0.083	0.0138
Perdidas netas en el filtro	MVAR/fase	0.0046	0.0092	0.038	0.0023

En este caso, la colocación de los filtros se ubica en el bus de la carga de las cuatro cargas obteniendo los siguientes resultados como lo muestra la tabla 5.9.

Tabla 5.9. Comportamiento del HD_{V5} y HD_{V7} en las cuatro rutas de estudio de la red con filtros.

CON CAPACITORES					CON FILTROS				
DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4
THD_V	10.5114	11.5752	10.6816	18.6662	THD_V	1.0024	1.958	2.1948	2.4956
HD_{V5}	7.9795	9.0062	8.0470	12.0427	HD_{V5}	0.0795	0.1627	0.0179	0.0127
HD_{V7}	2.0814	4.2139	3.6415	3.8632	HD_{V7}	0.5781	1.4963	1.8514	1.4891
$V_{p.u}$	0.9912	0.9917	1.0032	0.9912	$V_{p.u}$	0.9912	0.9917	1.0032	0.9912

Realizando el proceso de barrido de frecuencia en la red, nos encontramos que los filtros diseñadas para una 5^a armónica absorben gran parte de la misma armónica sintonizada y parte de las otras armónicas presentes, dejando un porcentaje bajo de distorsión individual de la 7^a armónica por abajo del 2% de HD_{V7} .

Esta situación no repercute en este momento y no hay la necesidad de instalarse otro filtro para mitigar dicha armónica, pero a largo plazo podría incrementarse y provocar algún daño, como lo indica la figura 5.5.5.

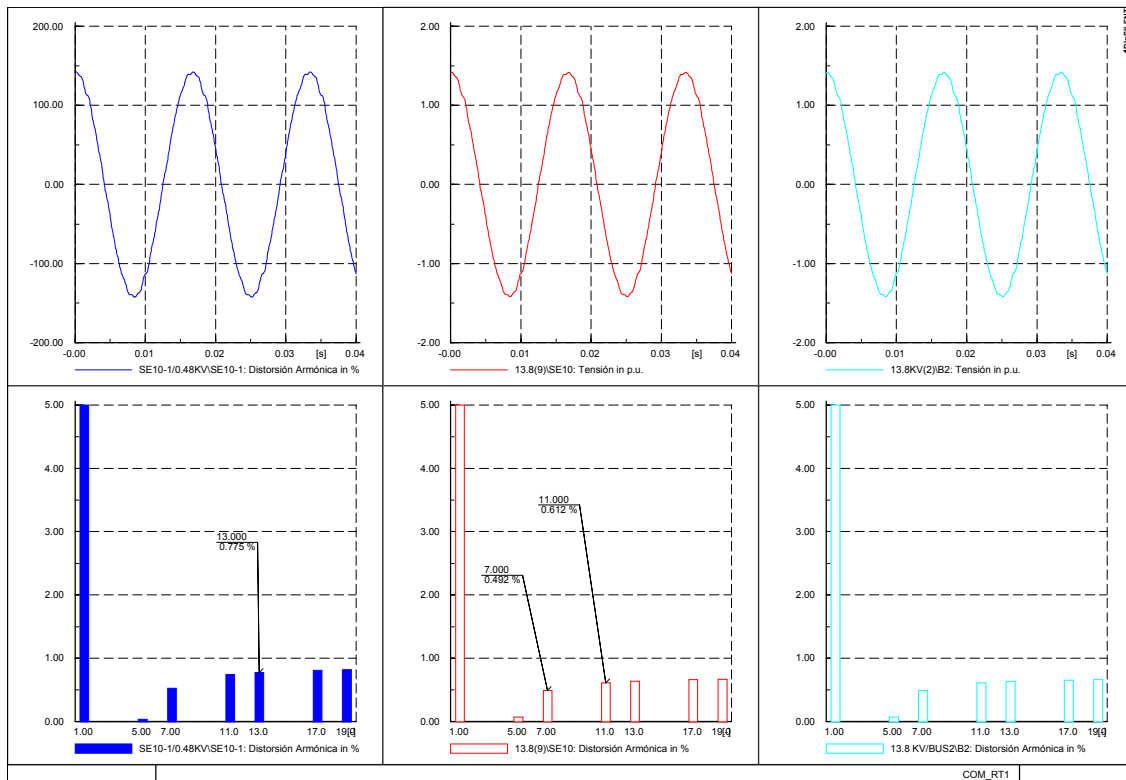


Figura 5.5.5. Comportamiento del HD_V en la ruta 2 con los filtros en las rutas [1,2,3,4] en cada bus.

Respecto al barrido de frecuencia (figura 5.5.8) se aprecia que las frecuencias de resonancia se encuentran aproximadamente entre 3^a y 4^a armónica y no presenta algún problema de resonancia para la red y que pueden eliminar la 3^a por la conexión de los transformadores.

En las siguientes figuras se muestra el comportamiento del espectro armónico de HD_V , como el Barrido de frecuencia de las restantes trayectorias de estudio, para determinar la existencia de una frecuencia de resonancia que podría presentarse en un futuro.



En las figuras se presenta un porcentaje de distorsión individual de voltaje menor del 2% para las armónicas de 11^a, 13^a, 17^a y 19^a para las rutas 1,2,4., Pero en la ruta 3, se determina un porcentaje HD_V es 2.3% de la 11^a y 13^a y con frecuencias de resonancia de 3.8 y 4.2, figuras 5.5.9. y 5.6.

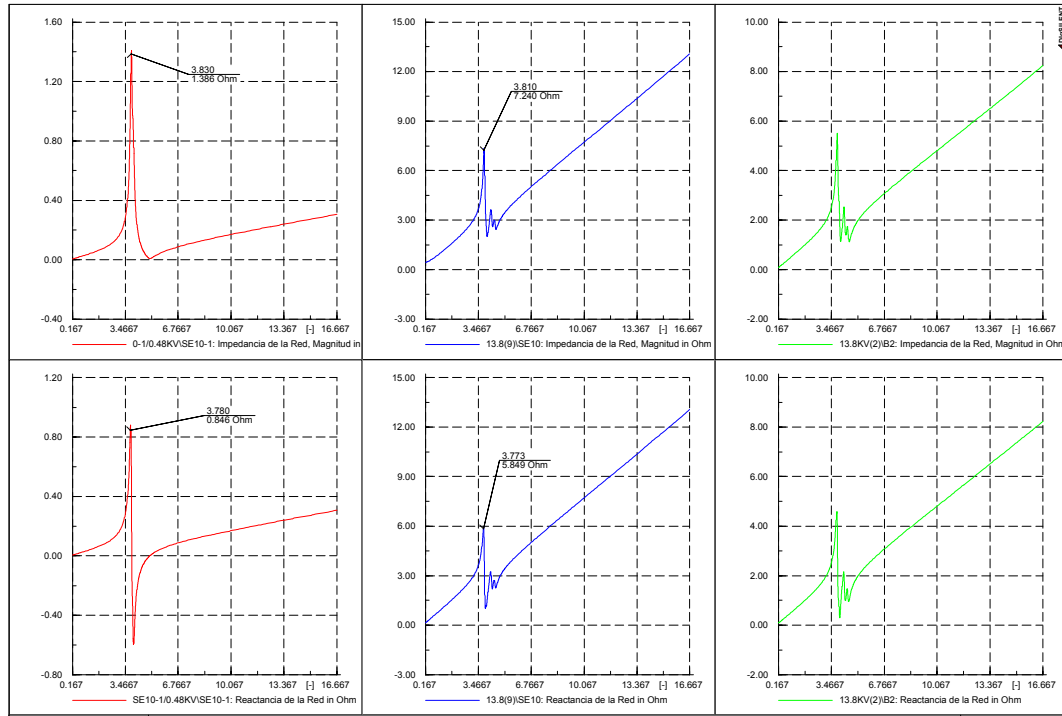


Figura 5.5.6. Barrido de Frecuencia en los niveles de voltaje de 0.48 kV y 13.8 KV de la ruta

1.

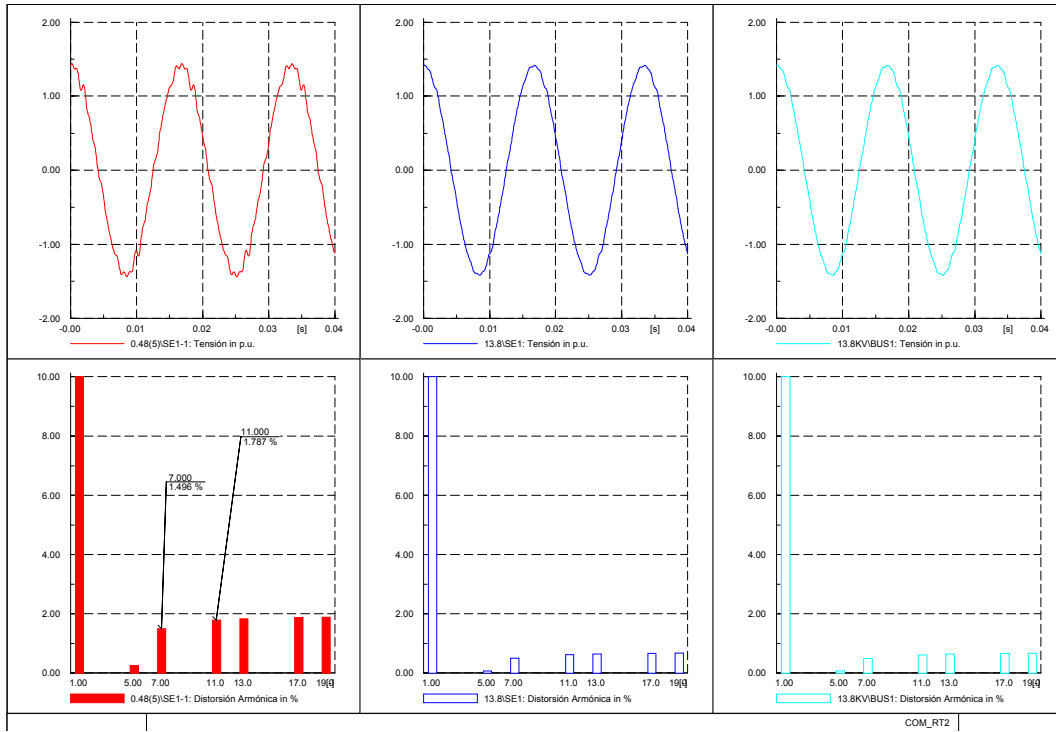


Figura 5.5.7. Comportamiento del HD_v en la ruta 2 con los filtros en cada una de las rutas

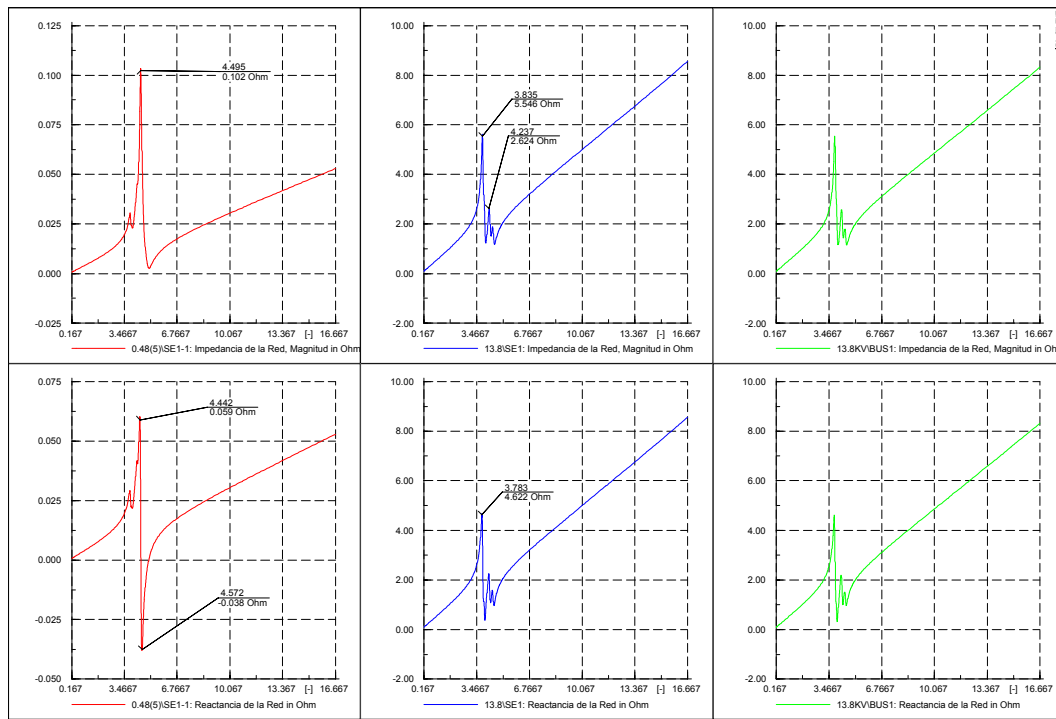


Figura 5.5.8. Barrido de Frecuencia en los niveles de voltaje de 0.48 kV y 13.8 kV de la ruta

2.

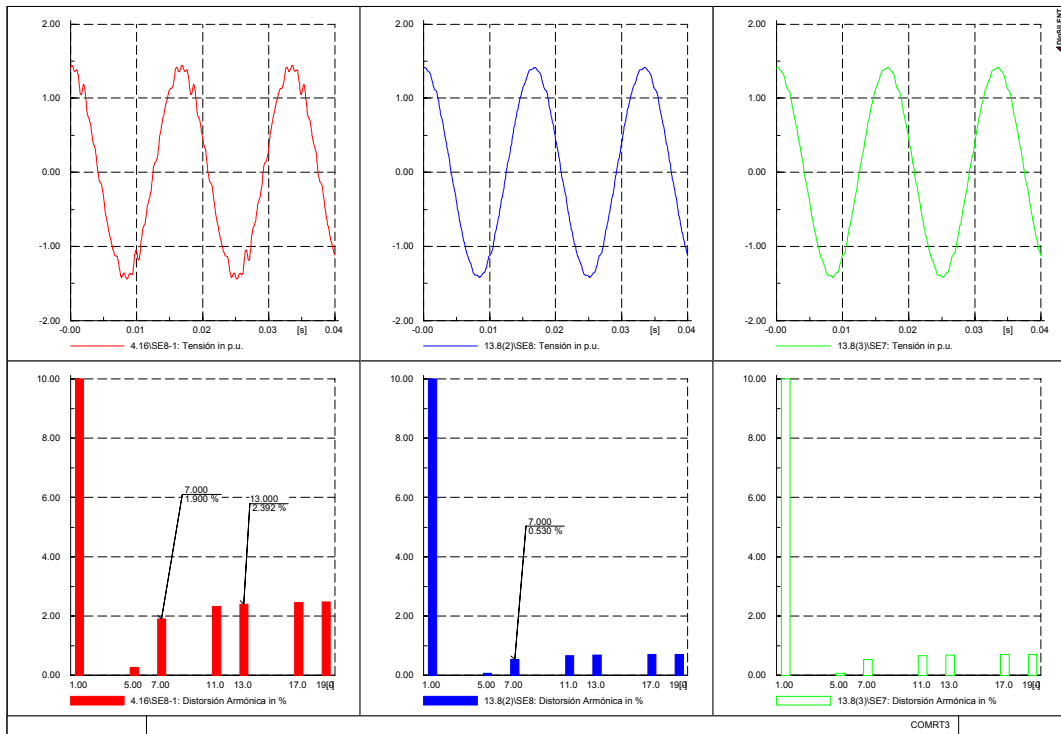


Figura 5.5.9. Comportamiento del HD_V en la ruta 3 con los filtros en las rutas [1,2,3,4] en cada bus.

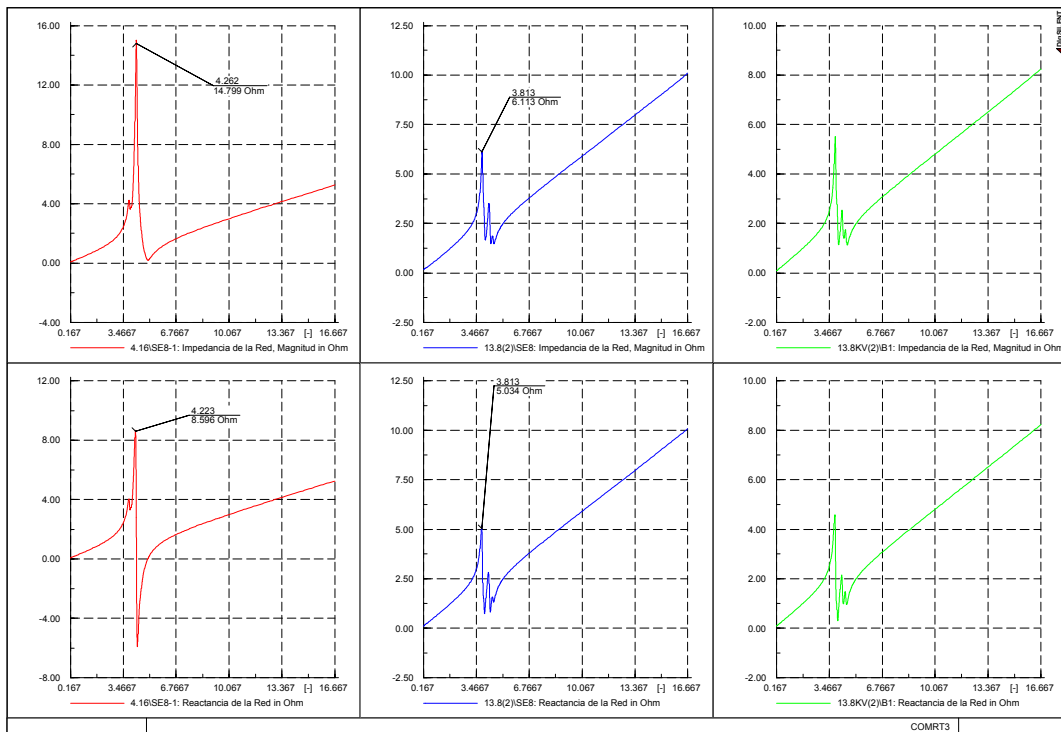


Figura 5.6. Barrido de Frecuencia en los niveles de voltaje de 4.16 KV y 13.8 KV de la ruta 3.

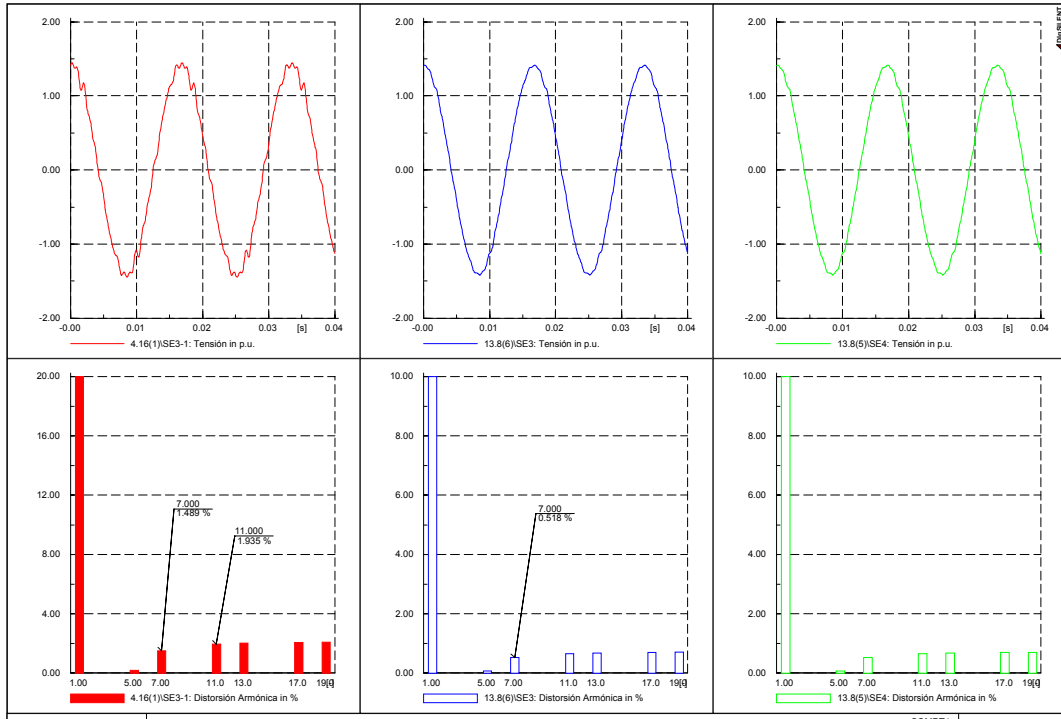


Figura 5.6.1. Comportamiento del HD_V en la ruta 4 con los filtros en las rutas [1,2,3,4] en cada bus.

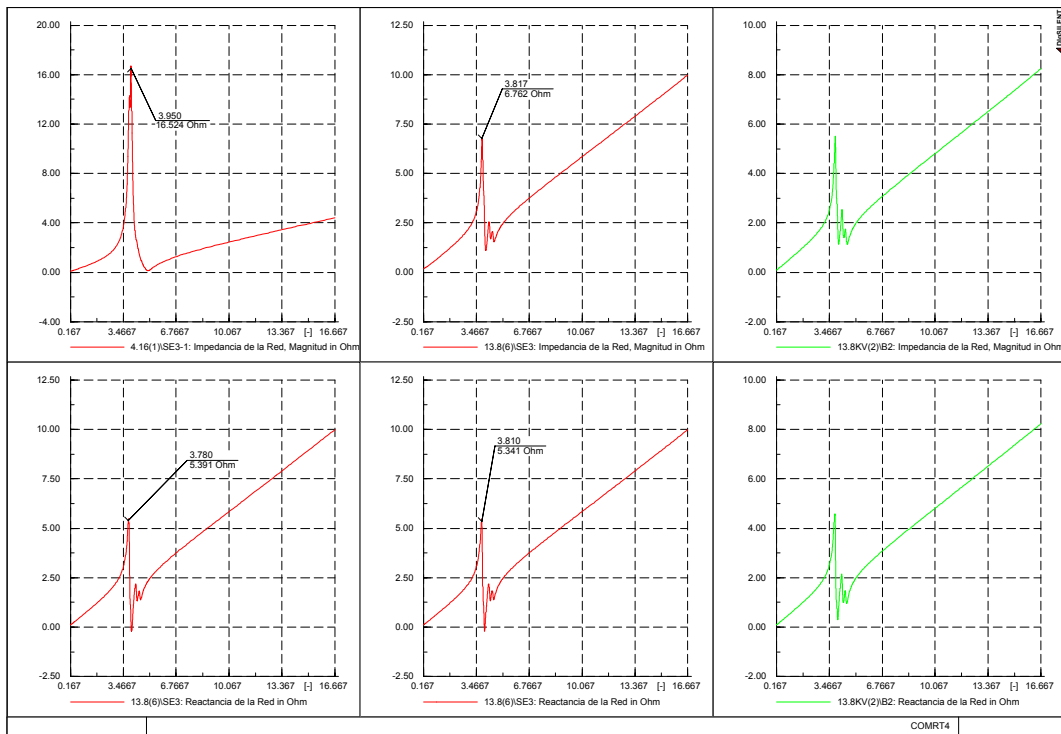


Figura 5.6.2. Barrido de Frecuencia en los niveles de voltaje de 4.16 KV y 13.8 KV de la ruta 4.

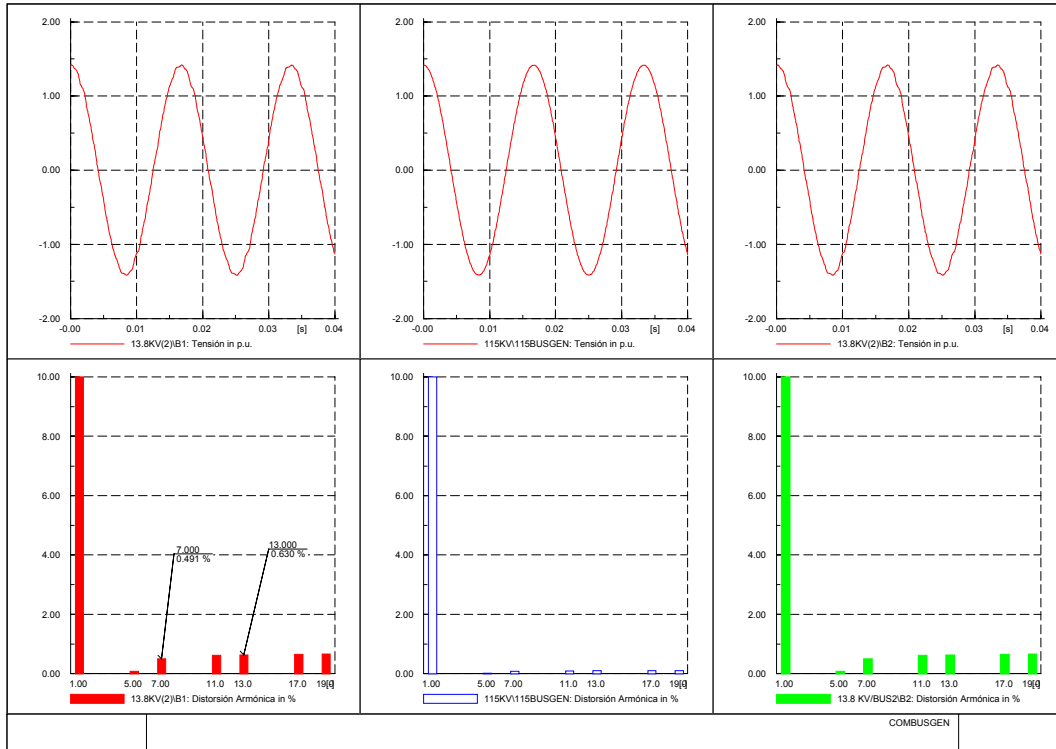


Figura 5.6.3. Comportamiento del bus general de 13.8 kV y 115 kV, con filtros en las rutas [1,2,3,4].

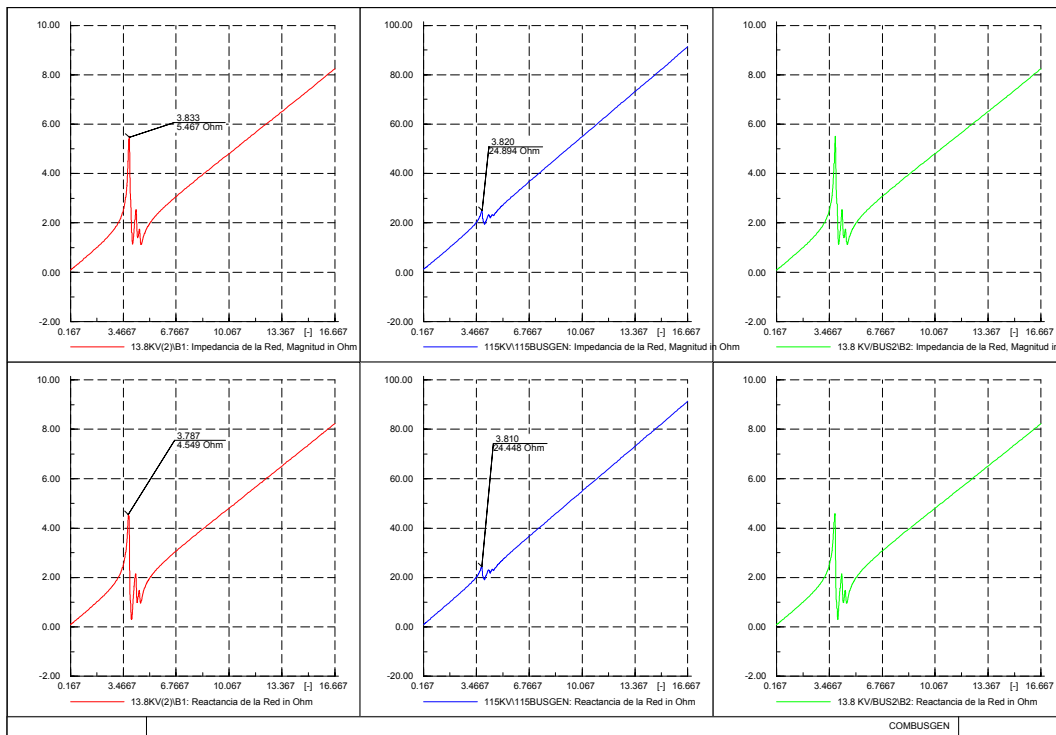


Figura 5.6.4. Barrido de Frecuencia en los niveles de voltaje de 13.8 KV y 115 KV del bus general.

**CAPITULO 6****CONCLUSIONES Y
RECOMENDACIONES****CONCLUSIONES**

Se planteo la solución de un problema real de un sistema con ciertos casos que tenía que resolver CFE y se analizaron ciertas posibilidades de solución, por medio de dos programas comerciales empleados por U.I.E. en CFE (Easy-Power y Digsilent), optando por este ultimo debido a que se planteo una solución analítica en el dominio de la frecuencia con modelos de carga de la IEEE e IEC. De las cuales se obtuvieron las siguientes conclusiones.

1.- Para realizar un estudio adecuado, así como implementar una metodología con fines prácticos, la adquisición de datos sigue siendo parte esencial al igual que contar con modelos reales de las cargas no-lineales. Además de sujetarse a la condición físicas de la red, prevención de los cambios en la red recientes como a futuro, consideración modelos de cargas mas reales, técnicas analíticas adaptables a la problemática de la red, soluciones efectivas y económicas, facilidad de colocación del uso de los bancos de capacitores e filtros y si es recomendable usarlo en determinado punto común.

2.- En el sistema de estudio, las corrientes armónicas que destacan en toda la red fueron la 5^a y 7^a armónicas, con un porcentaje HD entre 4 – 6 % aproximadamente en los nodos de baja tensión y un HD_v por abajo del 1.0% para los ordenes de armónico de 11^a, 13^a, 17^a y 19^a, en casi todo los nodos del lado de baja tensión de la red.



3.- El valor del factor de potencia cuando se integran las fuentes de armónicos se reduce de un valor de $F.P = 0.8 \%$ a un valor de 0.65% aproximadamente en cada ruta.

4.- El nivel de distorsión de voltaje individual en alta tensión, puede reducirse, de acuerdo al arreglo en que se encuentran las líneas de alimentación de cada nodo, en lo que respecta a la tensión de 13.8 kV en el sistema, disminuye un 0.5% del valor THD_V cuando se tiene un arreglo de dos líneas en paralelo que con una sola línea.

5.- Los transformadores con un porcentaje de impedancia menor $Z_T = 5\%$, tienen un THD_I mayor en todos los órdenes de armónicos ($5^a, 7^a, 11^a, 13^a, 17^a, 19^a$) que en aquellos transformadores cuya impedancia esta arriba del 5% , ocasionando que la distorsión THD_V en el nodo de baja y alta tensión se incremente hasta un 300% aproximadamente. Podemos reducir un poco mas la distorsión total de Voltaje con la conexión es Zig-Zag aterrizada del lado de baja tensión del Transformador, pero por ser una conexión especial su costo es mayor, pero si cuenta con los recursos económicos suficientes, podrían emplearse o incorporar transformadores de mayor capacidad.

6.- En la solución de un sistema real, se debe efectuar un estudio previo de barrido de frecuencias antes de la instalación de bancos capacitores, filtro y de otras cargas, que permite limitar los puntos de resonancia a partir de la reducción del valor nominal de los capacitores, con el fin de prevenir la amplificación de corrientes armónicas, así como frecuencias de resonancias.

7.- La instalación de capacitores deberá distribuirse en diferentes puntos del sistema o lo mas cerca a la carga y lejos del bus de la carga, reduciendo un 4% menos el valor nominal del banco del capacitor seleccionados para la compensación de reactivos, esta acción permite alejarse de las frecuencias de resonancia impares existentes a valores de resonancias pares y triples. La conexión adecuada par los bancos de capacitores es la conexión Delta.



8.- El factor de calidad adecuado para los filtros es $Q_F = 30$, ya que se pudo reducir la 5ª a valores de 0.00123% y parte de las otras armónicas hasta un valor menor del 0.5%

RECOMENDACIONES

1.- Debido a la escasez de modelos reales para simular cargas no-lineales es necesario desarrollar modelos de cargas dinámicas en el dominio de la frecuencia para obtener el comportamiento real de la secuencia positiva, negativas y cero de los sistemas desbalanceados.

2.- Es necesario ante la presencia de armónicos en una instalación, poner atención las condiciones en que se encuentra la red, facilidad de adaptar los bancos de capacitores, filtros y la respuesta que el sistema tendrá al instalar estos, así como la correcta ubicación, para un buen funcionamiento de los equipos.

3.- Se debe considerar en el uso de controladores de motores dentro de los sistemas industriales presentes y a futuro, la colocación de convertidores de 12 pulsos, por su mínima generación de armónicos hacia la red, el uso excesivo en la industria y por que cada vez se están incrementando otras cargas no-lineales que aporten armónicos y provocan niveles de distorsión significantes, por lo tanto una solución a futura sería esta.

4.- Los transformadores empleados actualmente en la industria, deberían tener como mínimo valor de impedancia el 5% y que estén a 1/3 de la capacidad a plena carga, con el fin de minimizar las magnitudes de los armónicos provenientes de las cargas no-lineales hacia otros dispositivos, tener la facilidad de modificar la conexión del transformador. Todo esto es pensando a largo Plazo, considerando el incremento de las cargas y el costo.

5.- Para el control de armónicas, el método del filtrado sigue siendo el más utilizado en los sistemas industriales, por su efectividad y costo bajo. El valor adecuado para el factor de calidad del filtro debe estar de preferencia entre $Q_f = 20 - 50$.



REFERENCIAS

1. A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ, 1989.
2. E.O. Brigham, "The Fast Fourier Transform", Prentice-Hall Englewood Cliffs, New Jersey 1974.
3. Corduneanu, "*Almost Periodic Functions*", John Wiley (Interscience), New York, 1968.
4. A. E. Emanuel, "Powers in Nonsinusoidal Situations - A Review of Definitions and Physical Meaning," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 5, No. 3, July 1990, pp.1377-1389.
5. A. E. Emanuel, "On the Definition of Power Factor and Apparent Power in Unbalanced Polyphase Circuits," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 8, No. 3, July 1993, pp.841-852.
6. Rashid, M. "Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones". USA, Printice-Hall, INC, Tercera Edición, 2004.
7. P. S. Filipski, Y. Baghzouz, and M. D. Cox, "Discussion of Power Definitions Contained in the IEEE Dictionary," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 9, No. 3, July 1994, pp.1237-1244.
8. "*Nonsinusoidal Situations: Effects on the Performance of Meters and Definitions of Power*," IEEE Tutorial Course 90 EH0327-7-PWR, IEEE, New York, 1990.
9. K. Srinivasan, "Harmonics and Symmetrical Components," *Power Quality Assurance*, Jan/Feb 1997.
10. IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations, "Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 11, No. 1, January 1996, pp. 79-101.
11. "*Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*," IEEE Standard 519-1992, IEEE, New York, 1993.
12. J. Arrillaga, D. A. Bradley, and P. S. Bodger, *Power System Harmonics*, John Wiley & Sons, New York, 1985.
13. G. T. Heydt, *Electric Power Quality*, Stars in a Circle Publications, West LaFayette, IN, 1991.
14. "*IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When applying Nonsinusoidal Load Currents*," ANSI/IEEE Standard C57.110-1986, IEEE, New York, 1986.
15. W. M. Grady and R. J. Gilleskie, "Harmonics and How They Relate to Power Factor," *Proceedings of PQA93*, San Diego, CA, 1993.
16. Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks Part I : Concepts, Models and Simulation Techniques," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol.11, No.1, January 1996, pp. 452-465.
17. S.Mark Halpin, Paulo F.Ribeiro,"Frecuency Domian Harmonic Analysis Methods, Modeling and Simulation of Power System Harmonics, Transmission & Distribution Committee, IEEE Power Engineering Society,1999.



18. N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, *Power Electronics - Converters, Applications, and Design*, John Wiley & Sons, New York, 1995.
19. Gilberto Enrique Harper, "Control de Motores Eléctricos", México, Limusa, 2005.
20. Enrique Hacha, "Power System Harmonic", ed. John Wiley & Sons, New York, NY 10158-0012, USA.
21. Robert S. Carrow, "Electronic Drives", of Mc Graw-Hill, New York, TAB books, 1996.
22. R Mohan Mathur, "Thyristor -Based facts controller for electrical transmission system, IEEE Press, Wiley-Interscience, 2002.
- 23.A. Semlyen, A. Medina, "Computation of the Periodic Steady State in Systems with Nonlinear Components Using a Hybrid Time and Frequency Domain Methodology", IEEE Transactions on Power System.
24. CIGRE Working Group 36-05, "Harmonics, Characteristics, Parameters, Methods of Study, Estimates of Existing Values in the Network," *Electra*, No. 77, July 1981, pp. 35-54.
25. W. Xu, J.R. Jose and H.W. Dommel, "A Multiphase Harmonic Load Flow Solution Technique", *IEEE Trans. on Power Systems*, vol. PS-6, Feb. 1991, pp. 174-182.
26. Sharma, V, Fleming, R.J., Niekamp, L., "An iterative Approach for Analysis of Harmonic Penetration in Power Transmission Networks," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 6, No. 4, October 1991, pp. 1698-1706.
27. D. Xia and G.T. Heydt, "Harmonic Power Flow Studies, Part I - Formulation and Solution, Part II - Implementation and Practical Application", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, June 1982, pp.1257-1270.
28. Aristizabal Naranjo, Marcelo y Ríos Porras, Carlos Alberto. "Modelamiento de Sistemas Eléctricos y Empleo del Software Digsilent Power Factory en el Análisis de Armónicos". Capítulo VI. Universidad Tecnológica de Pereira. 2001, tesis de Posgrado FIE.
29. IEEE Working Group on Power Systems Harmonics. The effects of power system harmonics on power system equipment and loads. IEEE Transactions on Power Apparatus and System. Vol. 104, No. 9, 1985.
30. Ríos Porras, Carlos Alberto; Aristizabal Naranjo, Marcelo y Gallego Rendón, Ramón Alfonso. "Análisis de Armónicos en Sistemas Eléctricos". Revista Scientia Et Technica, No. 21.
31. XU, Wilson. Harmonic Modeling and Simulation Task Force Reference Documents. Disponible en Internet: <http://www.ee.ualberta.ca/pwrsys/IEEE/download.html>.
32. Ing. Francisco Cuevas Arteaga, Enríquez Harper Gilberto, Reporte interno de la unidad de Ingeniería Especializada y Sección de Estudios de Posgrado e Investigación, ESIME-IPN, México D.F, 2001.
33. Thomas H. Ortomeyer, Takashi Hiyama " Harmonic Modeling of Network, Modeling and Simulation of the Power System Harmonic Transmission & Distribution Committee, IEEE Power Engineering Society, 1999.



34. IEEE std 1159-1995 'Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality', Working Group on Electrical Power Quality ofsc22,1995.

ARTICULOS DE REVISTA Y PONENCIAS EN CONGRESOS

35. W.Xu. Universidad de Alberta edmonton, Canadá, S.J. Ranade New Mexico State University, Las Cruces,NM,USA. " An overview of Harmonic Modeling and simulation" 1996.

36. Gary W.Chang, Paulo F Ribeiro "Harmonics Theory ".Siemens Power T&D ,Brooklyn,MN, EE.UU, BWX Tecnologias, Inc. Lynchburg, VA 24505-0785.

37. D,Daniel Sabin, Daniel L Brooks,Ashok Sundaram, Members, IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 14,No. 2, April 1999."Indice for assesing Harmonic Distortion From Power Quality Meadurements definition and Benchmark Data.

38. V.E.Wagner, chairman," Report of the IEEE Task Force on the Effects of Harmonics on Equipmet ", Effects of Harmonics on Equipment", Tanssactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 2, April 1993.

39. Aurelio Medina, CIGRE "Metodologías avanzadas para el moderador del análisis de armónicos y su impacto en la calidad de energía". Facultades y eléctrica división de estudios de Posgrado universidad michoacana de san Nicolás de Hidalgo. Bienal 2001.

40. M.en C. Antonio Escobar Z, Carlos Alberto Ríos Porras." Modelado de sistemas eléctricos en presencia de armónicos", grupo de investigación en sistemas genéticos, universidad tecnológica de Pereira.

41. Ramón Alfonso gallego, " Flujo de Carga de Armónicos para Sistemas Radiales", Facultades de Ingeniería Eléctrica U.T.P.,Scientia technica Año X No. 25 Agosto UTP ISSN 0122-1710.

42. Wilson Xu,"Component Modeling Isseus for Power Quality Asseement ",IEEE Power Engineering Review, November 2001.

TRABAJOS DE TESIS

42. Juan M. García Martínez, "Formulaciones Trifásicas Multifrecuencias para el estudio de Redes Eléctricas en estado estable", Tesis doctoral, Monterrey N. L., Febrero 1996.

43. Luis Sainz Sapera, "Estudio de la Formulación y resolución del Problema del Flujo Armónico de cargas", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, E.T.S. de Ingenieros Industriales de Barcelona, 1995.

44. Luis Sainz Sapera, "Aportaciones al estudio del Flujo Armónico de cargas", Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, E.T.S. de Ingenieros Industriales de Barcelona, mayo 2002.

45. Celestino Gonzáles Ramos, "Análisis para la propuesta de Filtros de las armónicas en sistemas eléctricos",SEPI-ESIME, Zacatenco,,1996.



APENDICE 1

Las siguientes tablas son resultados obtenidos de las simulaciones del programa de Easy-Power y sus graficas se encuentran en el apéndice C.

TABLA.1a COMPORTAMIENTO DE LOS BUSES DE LAS RUTAS 1, 2, 3,4, CON FUENTE DE ARMÓNICA 5^a EN LA RUTA 1 A TENSION DE 480 V C/S INTERRUPTOR DE AMARRE.

SIN INTERRUPTOR					CON INTERRUPTOR				
DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4
THD	2.05815	0.00579	0.05281	0.00591	THD	2.02958	0.02375	0.02434	0.2926
HD	0.77753	0.00214	0.01956	0.00217	HD	0.76699	0.00385	0.00917	0.00903
Vp.u	0.98746	0.97410	0.98959	0.98231	Vp.u	0.98770	0.97461	0.98861	0.98281

TABLA.1b COMPORTAMIENTO EN LOS ALIMENTADORES DE LAS RUTAS 1, 2, 3,4, CON FUENTE DE ARMÓNICA 5^A A EN LA RUTA 1 TENSIÓN DE 480V C/S INTERRUPTOR.

SIN INTERRUPTOR					CON INTERRUPTOR				
DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4
THD	28.7585	0.0013	0.0108	0.0013	THD	28.7585	0.0052	0.0050	0.0055
HD	20.0	0.0009	0.0074	0.0009	HD	20.0	0.0036	0.0035	0.0038
Irms	0.0694	1.4000	1.1369	0.4168	Irms	0.0694	1.3987	0.1387	0.4164
I	13.3440	0.0122	0.0845	0.0038	I	13.3461	0.0508	0.0396	0.0158
P	-0.0003	-	-	-	P	-0.0003	-	-	-
Q	-0.0852	-	-	-	Q	-0.0840	-	-	-
F.P	-0.0032	0.0464	0.0469	0.0469	F.P	-0.0032	0.0464	0.0464	0.0469

TABLA.2a COMPORTAMIENTO EN LOS BUSES DE LAS RUTAS 1, 2, 3,4, CON FUENTE DE ARMÓNICA 7^a EN LA RUTA 1 A TENSIÓN DE 480 V C/S INTERRUPTOR DE AMARRE.

SIN INTERRUPTOR					CON INTERRUPTOR				
DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4
THD	2.05815	0.00581	0.05222	0.00594	THD	2.02934	0.02386	0.02446	0.02439
HD	0.77754	0.00214	0.01939	0.00219	HD	0.76688	0.00890	0.00912	0.00909
Vp.u	0.98746	0.97574	0.98201	0.98494	Vp.u	0.98829	0.97519	0.98281	0.98441



TABLA.2b COMPORTAMIENTO EN LOS ALIMENTADORES DE LAS RUTAS 1, 2, 3,4, 1 CON FUENTE DE ARMÓNICA 7^a EN LA RUTA 1 A TENSIÓN DE 480V C/S INTERRUPTOR DE AMARRE.

SIN INTERRUPTOR					CON INTERRUPTOR				
DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4
THD	28.7585	0.0013	0.0107	0.0013	THD	28.7585	0.0053	0.0057	0.0055
HD	14.2850	0.0006	0.0053	0.0072	HD	14.2849	0.0026	0.0025	0.0027
Irms	0.0699	1.3959	1.1404	0.4149	Irms	0.0695	1.3973	1.1385	0.4153
I	9.5309	0.0088	0.0605	0.0027	I	9.5360	0.0365	0.0285	0.0114
P	-0.0041	-	-	-	P	-0.0001	-	-	-
Q	-0.0608	-	-	-	Q	-0.0601	-	-	-
F.P	0.0023	0.0332	0.0332	0.0332	F.P	0.0023	0.0332	0.0332	0.0332

TABLA.3a COMPORTAMIENTO EN LOS BUSES DE LAS RUTA 1, 2, 3,4, CON FUENTE DE ARMÓNICA 5^a A EN LA RUTA 1 TENSIÓN DE 4.16 kV C/S INTERRUPTOR DE AMARRE.

SIN INTERRUPTOR					CON INTERRUPTOR				
DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4
THD	-	-	0.05286	0.00603	THD	-	-	0.02476	0.02479
HD	-	-	0.01958	0.00222	HD	-	-	0.00921	0.00923
Vp.u	-	-	0.98812	0.96261	Vp.u	-	-	0.98891	0.99125

TABLA.3b COMPORTAMIENTO EN LOS ALIMENTADORES DE LAS RUTAS 1, 2, 3,4, CON FUENTE DE ARMÓNICA 5^a EN LA RUTA 1 A TENSIÓN DE 4.16 kV C/S INTERRUPTOR DE AMARRE.

SIN INTERRUPTOR					CON INTERRUPTOR				
DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4
THD	-	-	0.0013	0.0126	THD	-	-	0.0059	0.0081
HD	-	-	0.0009	0.0087	HD	-	-	0.0041	0.0057
Irms	-	-	0.1456	0.1240	Irms	-	-	0.1239	0.0154
I	-	-	0.0013	0.0108	I	-	-	0.0051	0.0009
P	-	-	-	-	P	-	-	-	-
Q	-	-	-	-	Q	-	-	-	-
F.P	-	-	0.0441	0.0426	F.P	-	-	0.0428	0.0464

**TABLA.4a COMPORTAMIENTO EN LOS BUSES DE LAS RUTAS CON FUENTE DE ARMÓNICA 7ª EN LA RUTA 1 A TENSIÓN DE 4.16 kV C/S INTERRUPTOR DE AMARRE**

SIN INTERRUPTOR					CON INTERRUPTOR				
DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4
THD	-	-	0.02333	0.02494	THD	-	-	0.02333	0.02464
HD	-	-	0.00670	0.00985	HD	-	-	0.00670	0.00919
Vp.u	-	-	0.98891	0.98917	Vp.u	-	-	0.98815	0.98817

TABLA.4b COMPORTAMIENTO EN LOS ALIMENTADORES DE LA RUTA 1 CON FUENTE DE ARMÓNICA 7ª EN LA RUTA 1 A TENSIÓN DE 4.16 kV C/S INTERRUPTOR DE AMARRE.

SIN INTERRUPTOR					CON INTERRUPTOR				
DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4
THD	-	-	0.0061	0.0098	THD	-	-	0.0043	0.0073
HD	-	-	1.0030	1.0120	HD	-	-	1.0002	1.0085
Irms	-	-	0.3288	0.3561	Irms	-	-	0.3175	0.3365
I	-	-	0.0100	0.0234	I	-	-	0.0093	0.0187
P	-	-	-	-	P	-	-	-	-
Q	-	-	-	-	Q	-	-	-	-
F.P	-	-	0.0332	0.0332	F.P	-	-	0.0312	0.0322

TABLA.5a COMPORTAMIENTO EN LOS BUSES DE LAS RUTAS CON FUENTE DE ARMÓNICA 5ª EN LA RUTA 1 A TENSIÓN DE 13.80 kV C/S INTERRUPTOR DE AMARRE

SIN INTERRUPTOR					CON INTERRUPTOR				
DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4
THD	0.07593	0.00603	0.05286	0.00604	THD	0.04780	0.02478	0.02476	0.02479
HD	0.02836	0.00222	0.01958	0.0022	HD	0.01803	0.00923	0.00921	0.00923
Vp.u	0.99170	0.99261	0.98812	0.99058	Vp.u	0.99298	0.99250	0.98891	0.99126



TABLA.5b COMPORTAMIENTO EN LOS ALIMENTADORES DE LA RUTA 1 CON FUENTE DE ARMÓNICA 5^a EN LA RUTA 1 A TENSIÓN DE 13.80 kV C/S INTERRUPTOR DE AMARRE.

SIN INTERRUPTOR					CON INTERRUPTOR				
DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4
THD	31.3971	0.0013	0.0133	0.0015	THD	31.3565	0.0052	0.0063	0.0060
HD	21.7880	0.0009	0.0092	0.0010	HD	21.7804	0.0036	0.0044	0.0042
Irms	0.0022	0.1457	0.1661	0.0650	Irms	0.0022	0.1458	0.1659	0.0652
I	0.4641	0.0013	0.0153	0.0007	I	0.4616	0.0053	0.0072	0.0028
P	-0.0002	-	-	-	P	-	-	-	-
Q	-0.0022	-	-	-	Q	-0.0010	-	-	-
F.P	-0.0052	0.0439	0.0437	0.0458	F.P	-0.0044	0.0442	0.0437	0.0458

TABLA.6a COMPORTAMIENTO EN LOS BUSES DE LAS RUTAS CON FUENTE DE ARMÓNICA 7^a EN LA RUTA 1 A TENSIÓN DE 13.8 kV C/S INTERRUPTOR DE AMARRE.

SIN INTERRUPTOR					CON INTERRUPTOR				
DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4
THD	0.04780	0.00603	0.05286	0.00604	THD	0.04780	0.02478	0.02476	0.02476
HD	0.01803	0.00223	0.01962	0.00223	HD	0.01796	0.00925	0.01962	0.00924
Vp.u	0.99298	0.99302	0.98812	0.99178	Vp.u	0.98248	0.99250	0.98812	0.99126

TABLA.6b COMPORTAMIENTO EN LOS ALIMENTADORES DE LA RUTA 1 CON FUENTE DE ARMÓNICA 7^a EN LA RUTA 1 A TENSIÓN DE 13.8 kV C/S INTERRUPTOR DE AMARRE.

SIN INTERRUPTOR					CON INTERRUPTOR				
DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4	DATOS	RUTA 1	RUTA 2	RUTA 3	RUTA 4
THD	31.3971	0.0013	0.0133	0.0019	THD	31.3585	0.0052	0.0073	0.0078
HD	15.5753	0.0006	0.0066	0.0009	HD	15.5641	0.0026	0.0036	0.0039
Irms	0.0022	0.1457	0.1661	0.0153	Irms	0.0022	0.1458	0.0422	0.0153
I	0.3321	-0.0009	0.0110	0.0001	I	0.3320	-0.0038	0.0015	0.0006
P	-	-	-	-	P	-	-	-	-
Q	-0.0015	-	0.0001	-	Q	-0.0007	-	0.0001	-
F.P	-0.0037	-0.0314	-0.0313	0.0041	F.P	-0.0067	-0.0316	-0.0330	0.0341



APENDICE 1

COMPORTAMIENTO DE LA THD_v EN LAS CUATRO RUTA TOMANDO COMO REFERENCIA LA RUTA 1 CON FTE. ARMONICO I_h = 5 SIN INTERRUPTOR.

TABLA1.-COMPORTAMIENTO DEL THD_v EN LAS CUATRO RUTAS CON FUENTE ARMONICA I_h=5 EN LA RUTA 1 SIN INT.

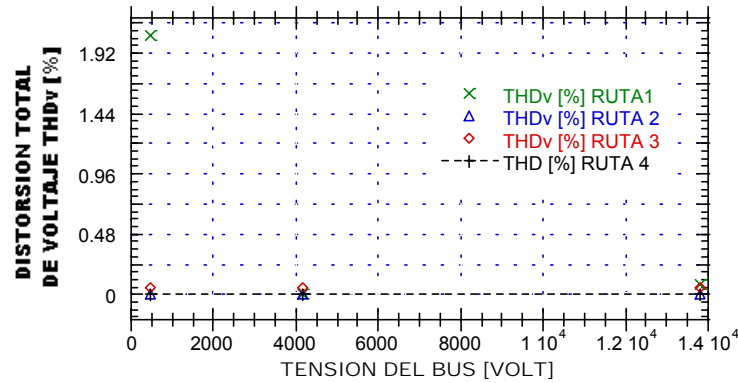


TABLA2_COMPORTAMIENTO DEL HD_v DE LAS RUTAS[1,2,3,4] CON FUENTE DE ARMONICA I_h=5 EN LA RUTA 1

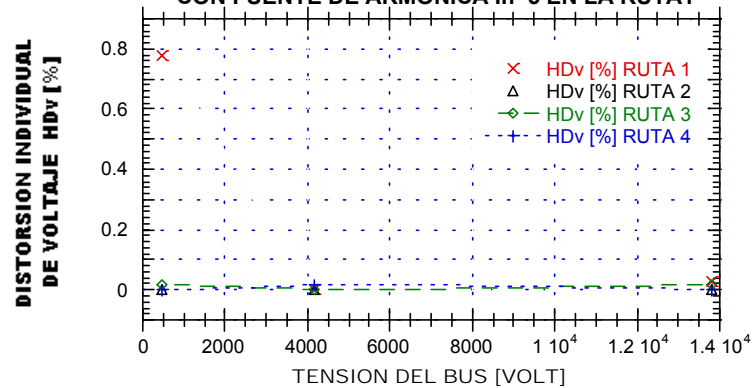
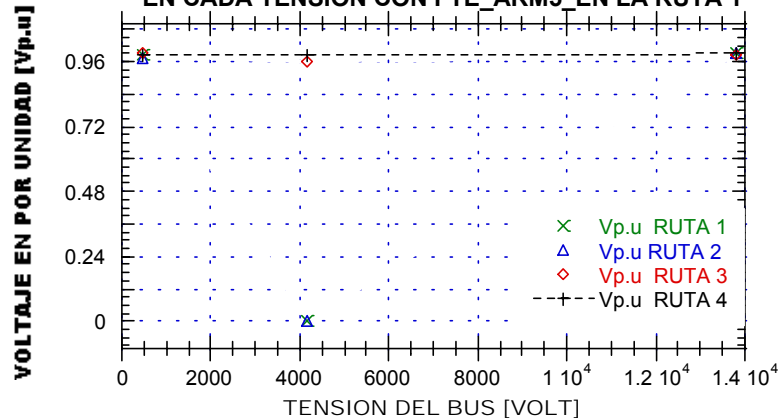


TABLA3_COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE EN POR UNIDAD EN CADA TENSION CON FTE_ARM5 EN LA RUTA 1





TABLAS DE COMPORTAMIENTO THDv DE LAS RUTAS CON INTERRUPTOR Y CON FUENTE DE ARMONICO DE 5 EN LA RIUTA 1

TABLA 4.-COMPORTAMIENTO THDv EN LAS CUATRO RUTAS CON FUENTE ARMONICA $I_h=5$ EN LA RUTA 1 CON INT.

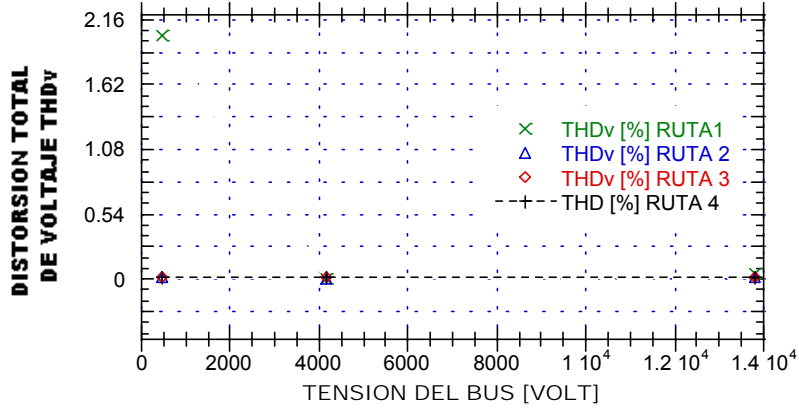
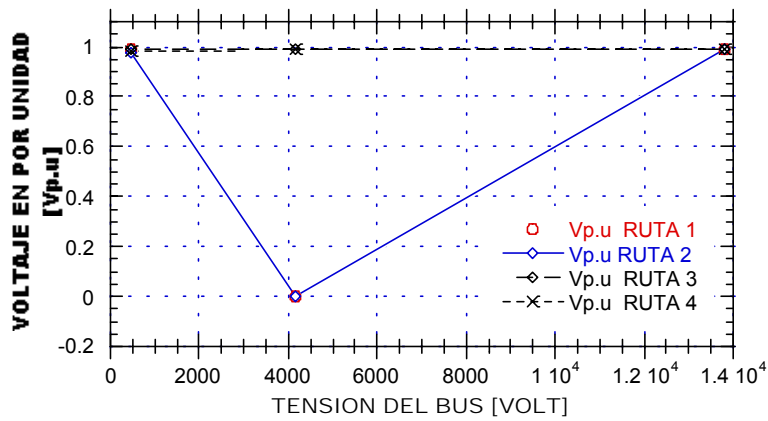


TABLA 5 COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE EN LAS RUTAS CON FTE. DE ARM $I_h = 5$ EN LA RUTA R1 Y CON INT.





COMPORTAMIENTO DE LA THDv EN CADA RUTA CON FUENTE DE ARMÓNICA 7 EN LA RUTA 1 COMO REFERENCIA CON INTERRUPTOR.

TABLA 6.-COMPORTAMIENTO DEL THDv EN LAS CUATRO RUTAS CON FTE. ARM Ih =7 EN LA RUTA R1 SIN INT.

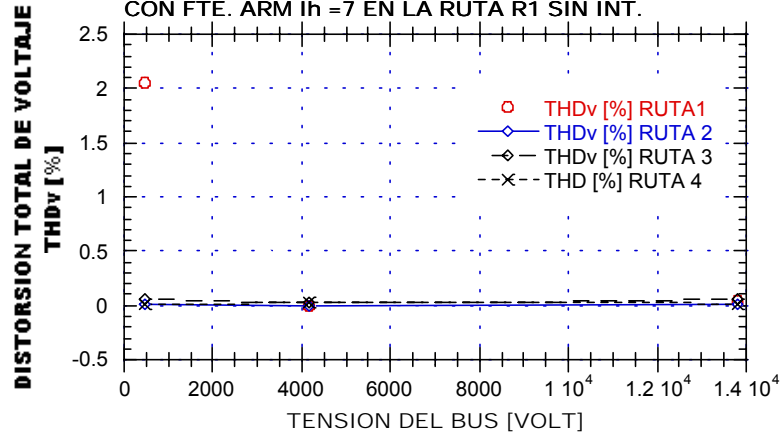


TABLA 7.- COMPORTAMIENTOS DEL HDv EN LAS CUATRO RUTAS CON FTE. ARM Ih = 7 EN LA RUTA R1 SIN INT.

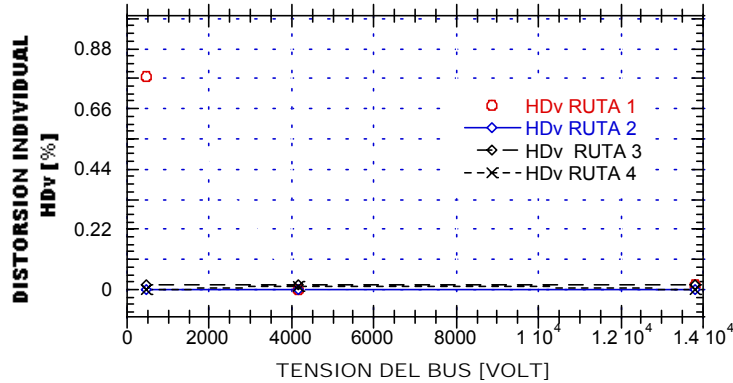
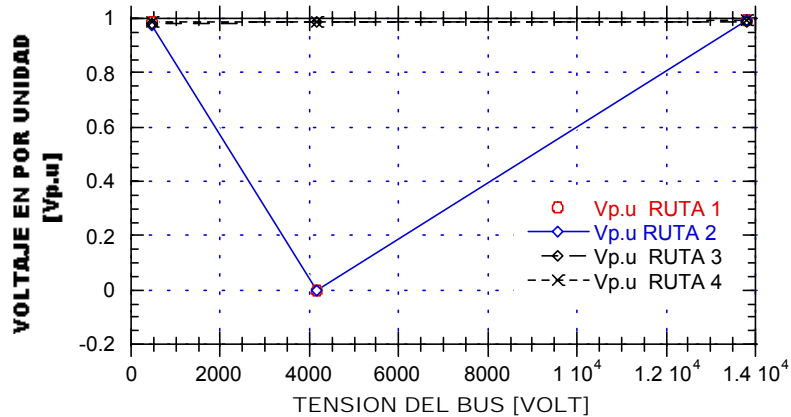


TABLA 7.- COMPORTAMIENTO DEL Vp.u EN LAS CUATRO RUTAS CON FTE. ARM Ih = 7 EN LA RUTA R1 SIN INT.





COMPORTAMIENTO DE LA THDv EN LAS CUATRO RUTAS TOMANDO COMO REFERENCIA LA RUTA 2 CON FTE. ARMONICO $I_h = 5$ SIN INTERRUPTOR.

TABLA 8.-COMPORTAMIENTO DEL THDv DE LAS CUATRO RUTAS EN PRESENCIA DE UNA FTE. DE ARMO $I_h = 5$ EN LA RUTA 2 SIN INT.

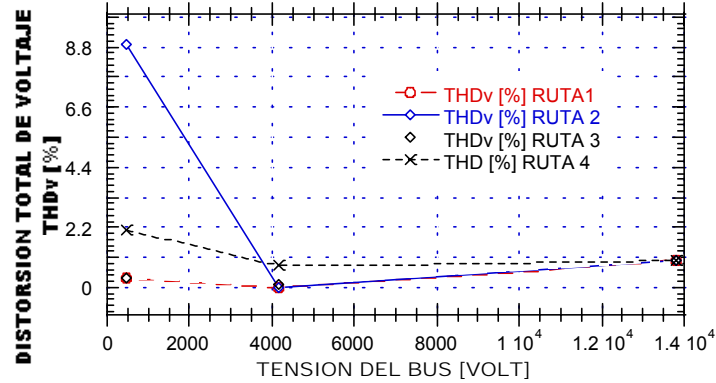


TABLA 9 .- COMPORTAMIENTO DE HDv EN LAS CUATRO RUTAS CON FTE ARM $I_h = 5$ EN LA RUTA R2 SIN INT.

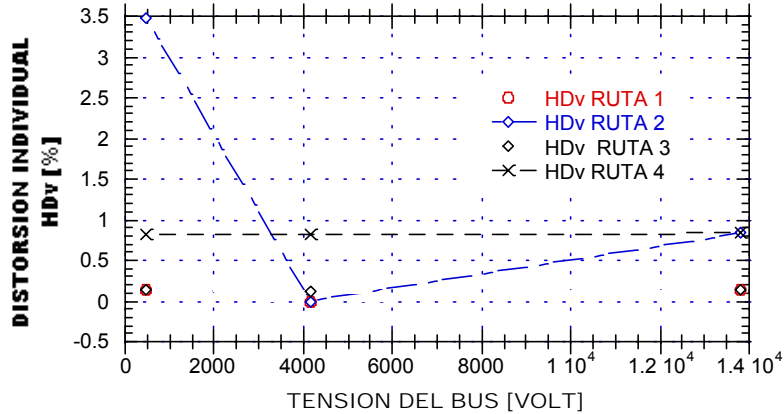
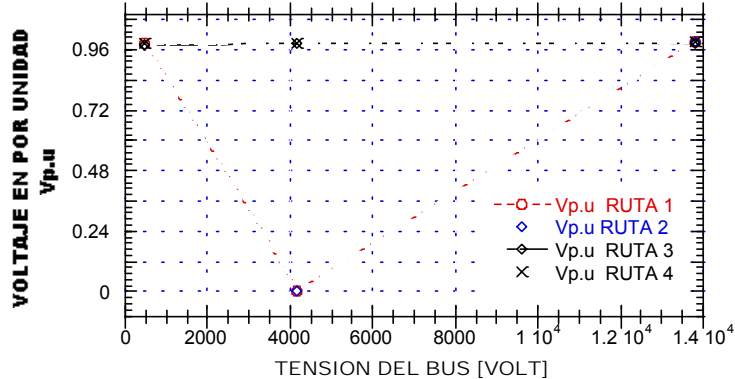


TABLA 10.- COMPORTAMIENTO DEL Vp.u EN LAS CUATRO RUTAS CON FTE.ARM. $I_h = 5$ EN LA RUTA R2 SIN INT.





COMPORTAMIENTO DEL THDv EN LAS CUATRO RUTAS EN PRESENCIA DE UNA FTE ARM $I_h = 5$ EN LA RUTA R2 CON INTERRUPTOR.

TABLA 8b.- COMPORTAMIENTO DEL THDv EN LAS CUATRO RUTAS CON FTE. ARM $I_h = 5$ EN LA RUTA R2 CON INT.

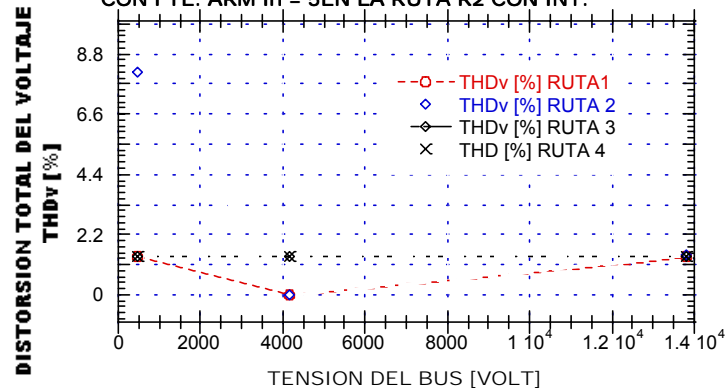


TABLA 9b .-COMPORTAMIENT DEL HDv EN LAS CUAROS RUTAS CON FTE. ARM. $I_h = 5$ EN LA RUTA R2 CON INT.

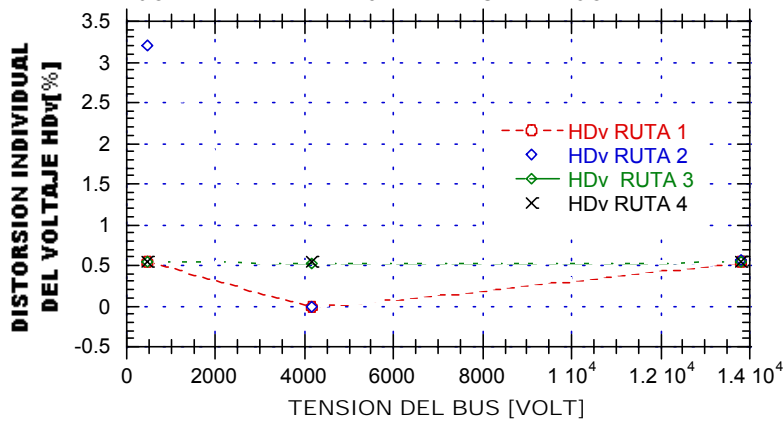
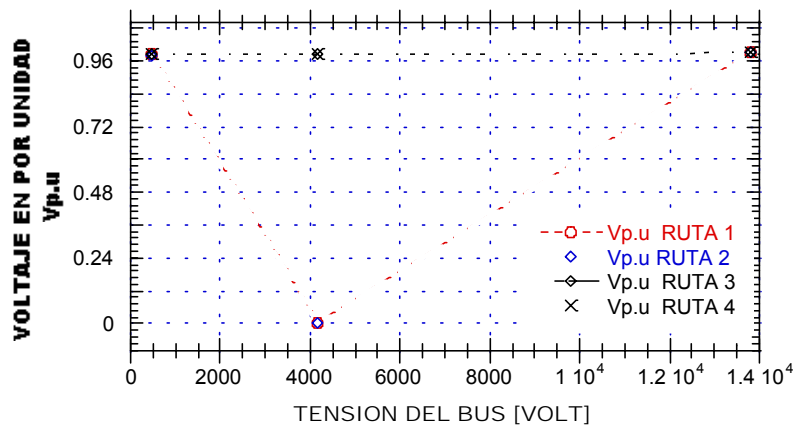


TABLA 10b.- COMPORTAMIEWNTO DEL Vp.u EN LAS CUATRO RUTAS CON FTE. ARM. $I_h = 5$ EN LA RUTA R2 CON INT.





COMPORTAMIENTO DE LAS RUTAS 1,2,3,4 EN DIFERENTES TENSIONES [480,4160,13800 VOLTS] CON FUENTE DE ARMÓNICA 5 EN LA RUTA 4, CON INTERRUPTOR.

TABLA 14b.- COMPORTAMIENTO DEL THDv EN LAS CUATRO RUTAS CON FTE. ARM. $I_h = 5$ EN LA RUTA 4 CON INT.

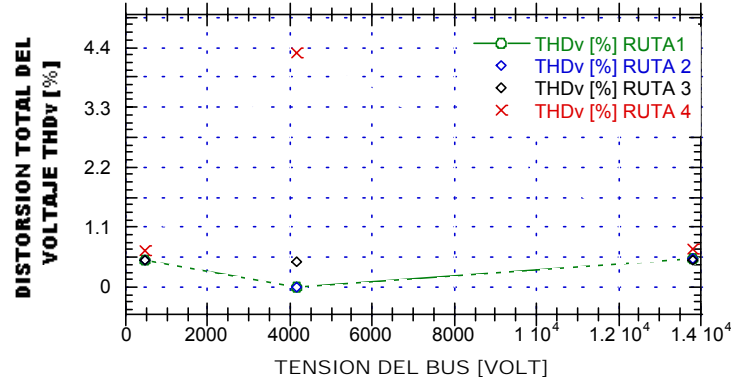


TABLA 15b.-COMPORTAMIENTO DEL HDv EN LAS CUATRO RUTAS CON FTE ARM. $I_h = 5$ EN LA RUTA 4 CON INT.

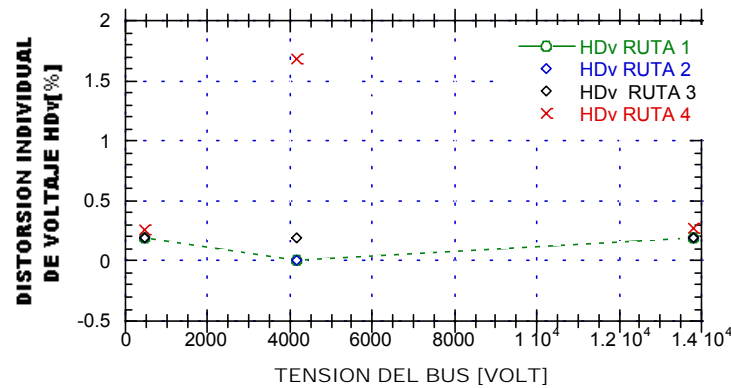
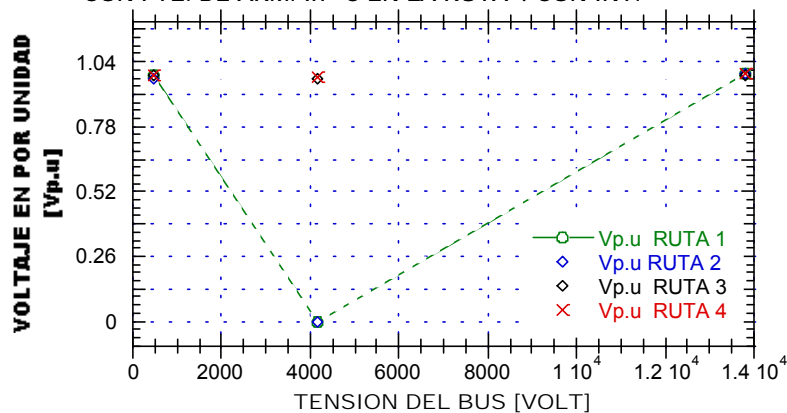


TABLA 16b.-COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE EN LAS CUATRO RUTAS CON FTE. DE ARM. $I_h = 5$ EN LA RUTA 4 CON INT.





COMPORTAMIENTO DE LAS RUTAS 1,2,3,4 EN DIFERENTES TENSIONES [480,4160,13800 VOLTS] CON FUENTE DE ARMÓNICA 7 EN LA RUTA 4, SIN INTERRUPTOR.

TABLA 17.- COMPORTAMIENTO DEL THDv DE LAS CUATRO RUTAS CON FTE. ARM. $I_h = 7$ EN LA RUTA 4 SIN INT.

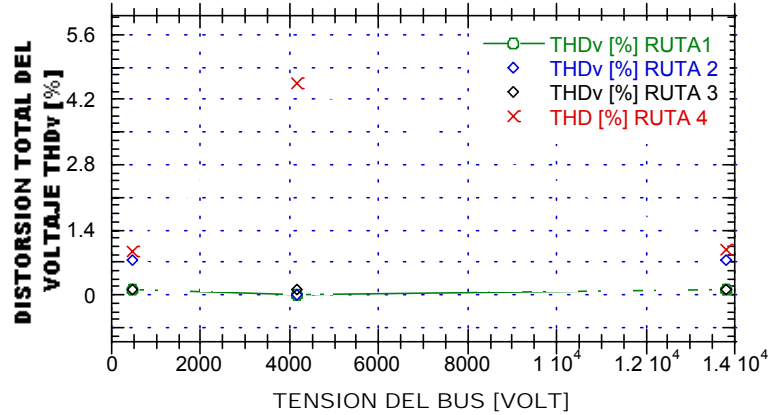


TABLA 18.- COMPORTAMIENTO DEL HDv EN LAS CUATRO RUTAS CON FTE DE ARM. $I_h = 7$ EN LA RUTA 4 SIN INT.

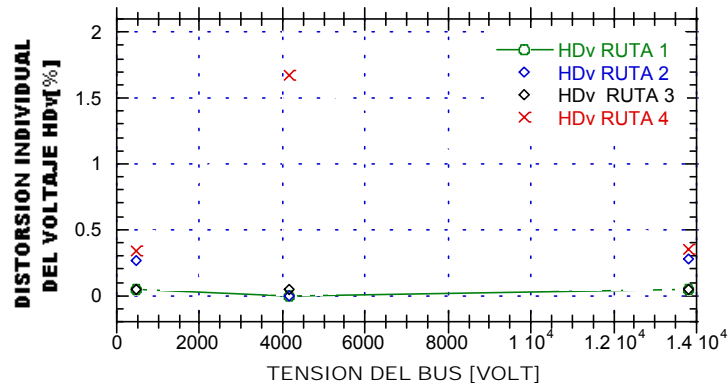
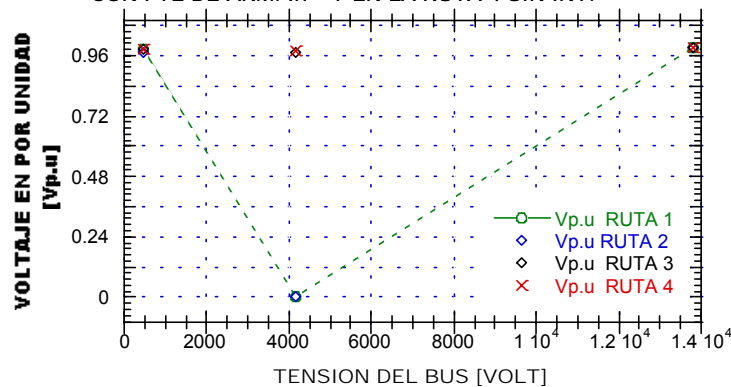


TABLA 19.- COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE EN LAS CUATRO RUTAS CON FTE DE ARM. $I_h = 7$ EN LA RUTA 4 SIN INT.





COMPORTAMIENTO DE LAS RUTAS 1,2,3,4 EN DIFERENTES TENSIONES [480,4160,13800 VOLTS] CON FUENTES DE ARMÓNICAS $I_h = 5$ EN TODAS LAS RUTAS, SIN INTERRUPTOR.

TABLA 21.-COMPORTAMIENTO DEL THDv EN LAS CUATRO RUTAS CON FUENTES ARMONICAS $I_h = 5$ EN TODAS LAS RUTA SIN INT.

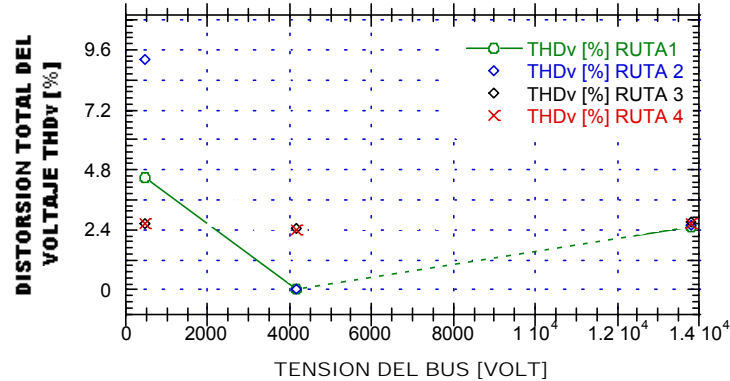


TABLA 21.-COMPORTAMIENTO DEL HDv EN LAS CUATRO RUTAS CON FUENTES ARMONICAS $I_h = 5$ EN TODAS LAS RUTAS Y SIN INT.

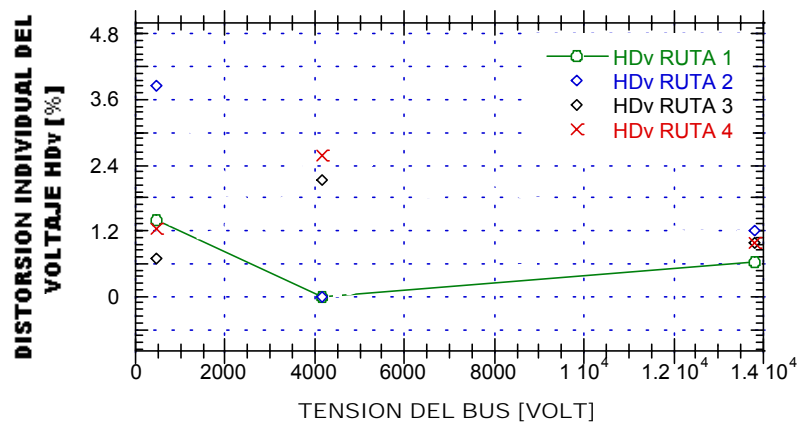
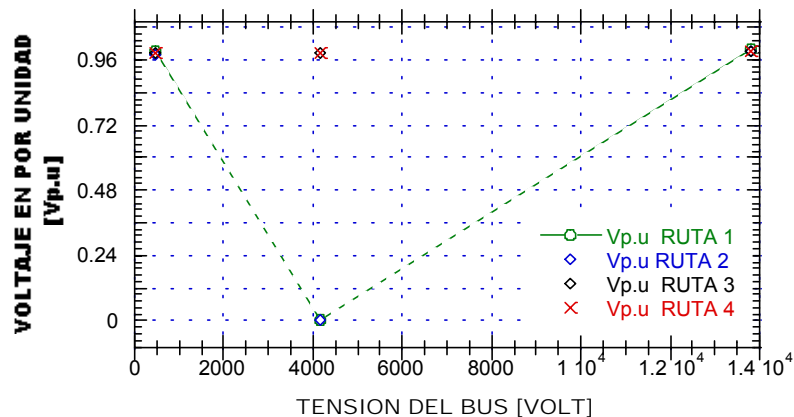


TABLA 22.-COMPORTAMIENTO DEL VOLTAJE EN LAS CUATRO RUTAS CON FUENTES ARMONICAS EN LAS CUATRO RUTAS Y SIN INT.





COMPORTAMIENTO DEL HDv DE LAS CUATRO RUTAS CON UNA FUENTE DE ARMONICO $I_h = 2$ EN EL HORNO DE 150 MVA CON UN F.P = 0.4 Y SIN INTERRUPTOR.

TABLA 23.-COMPORTAMIENTO DEL HDv EN LAS CUATRO RUTAS CON FUENTE ARMONICA $I_h = 2$ EN EL HORNO DE 150 MVA SIN INT.

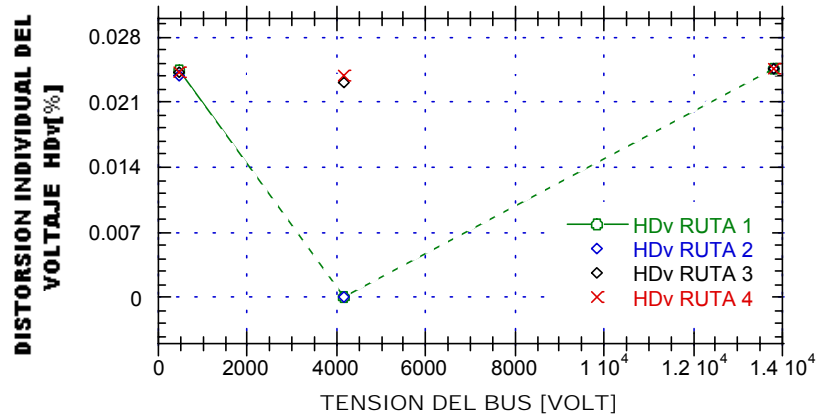


TABLA 24.- COMPORTAMIENTO DEL HDv DE LA RUTA 1 CON FUENTE ARMONICA $I_h = 2,4,5,7$ EN EL HORNO SIN INTERRUPTO

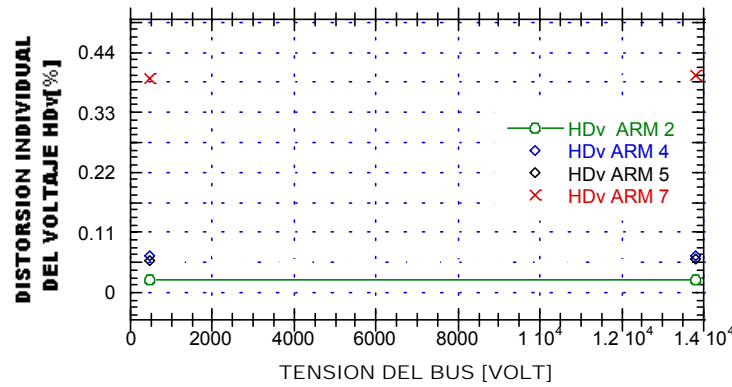
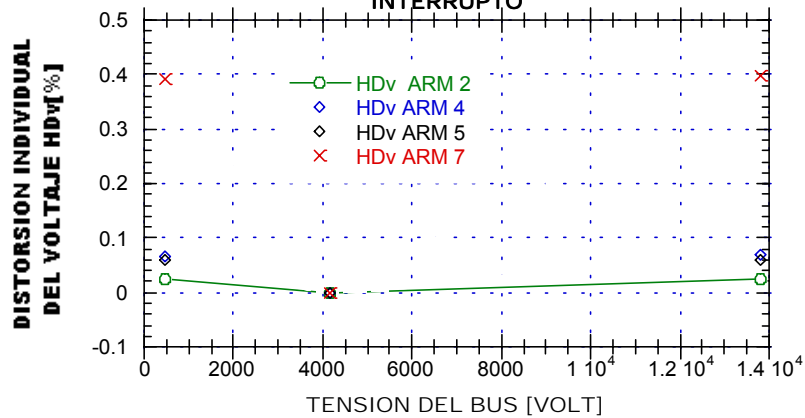


TABLA 24b.-COMPORTAMIENTO DEL HDv DE LA RUTA 1 CON FUENTE ARMONICO $I_h = 2,4,5,7$ EN EL HORNO Y SIN INTERRUPTO





Las siguientes graficas proporciona algunas de las simulaciones previas realizadas por el programa Digsilent.

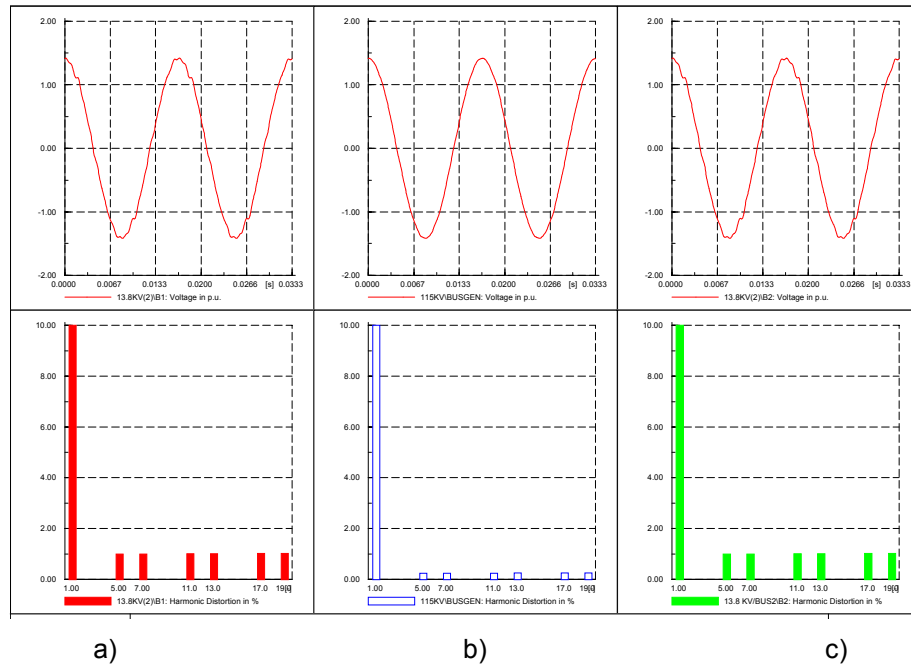


Figura 1. a) Espectro Armónico en el Bus 1 de 13.8 kV. B) Espectro armónico en el Bus General de 115 kV y c) Espectro Armónico en los Bus 2 de 13.8 KV con interruptor de amarre cerrado y sin el horno de arco eléctrico en todos.

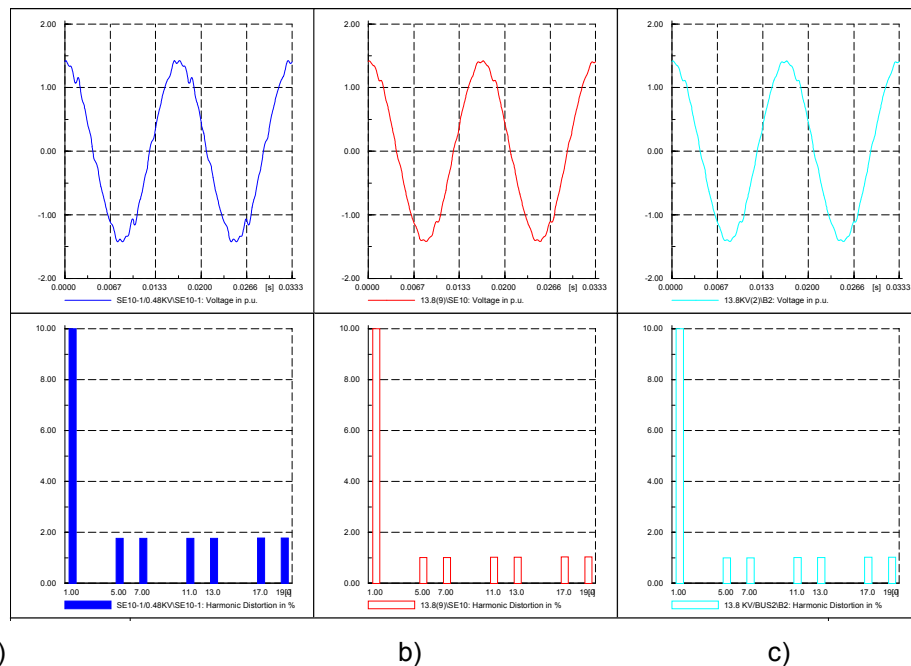


Figura. a) Espectro Armónico en el Bus de la ruta 1 de 0.48 kV con un motor de 60 hp. b) y c) Espectros Armónicos en los Buses de 13.8 KV de la misma ruta 1 y con interruptor de amarre cerrado y sin el horno de arco eléctrico.

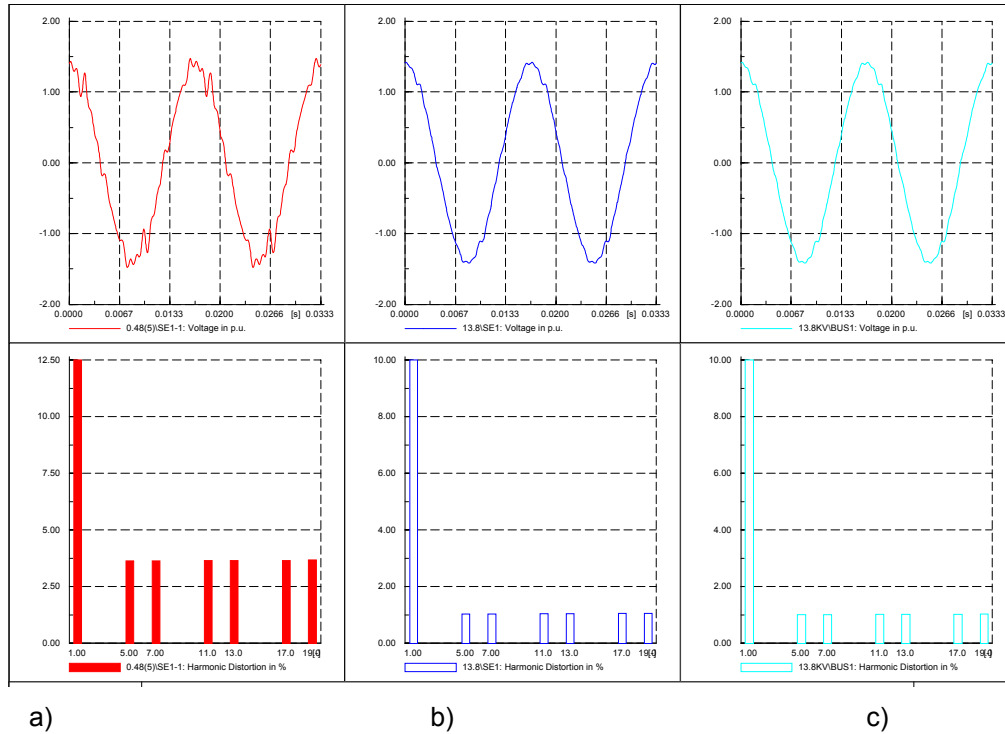


Figura. a) Espectro Armónico en el Bus de la ruta 2 de 0.48 kV con 3 motores de 1100 hp, con tiempos de operación alternos. b) y c) Espectros Armónicos en los Buses de 13.8 KV de la misma ruta 2 y con interruptor de amarre cerrado y sin el horno de arco eléctrico.

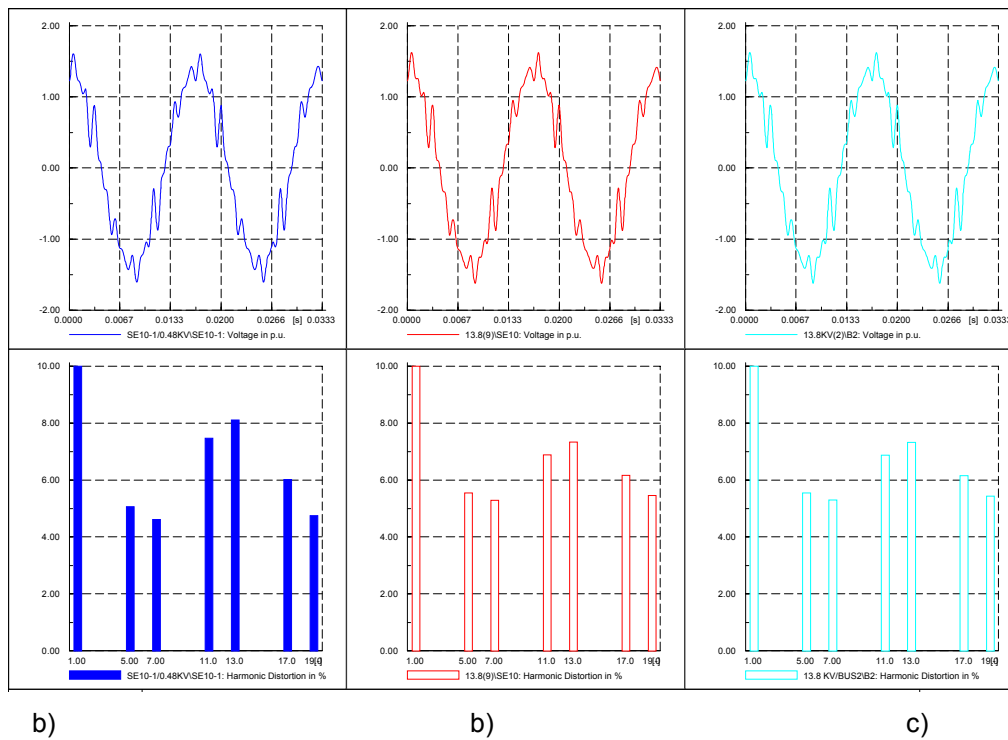


Figura. a) Espectro Armónico en el Bus de la ruta 2 de 0.48 kV con 3 motores de 1100 hp, con tiempos de operación alternos. b) y c) Espectros Armónicos en los Buses de 13.8 KV de la misma ruta 2 y con interruptor de amarre cerrado y con el horno de arco eléctrico.

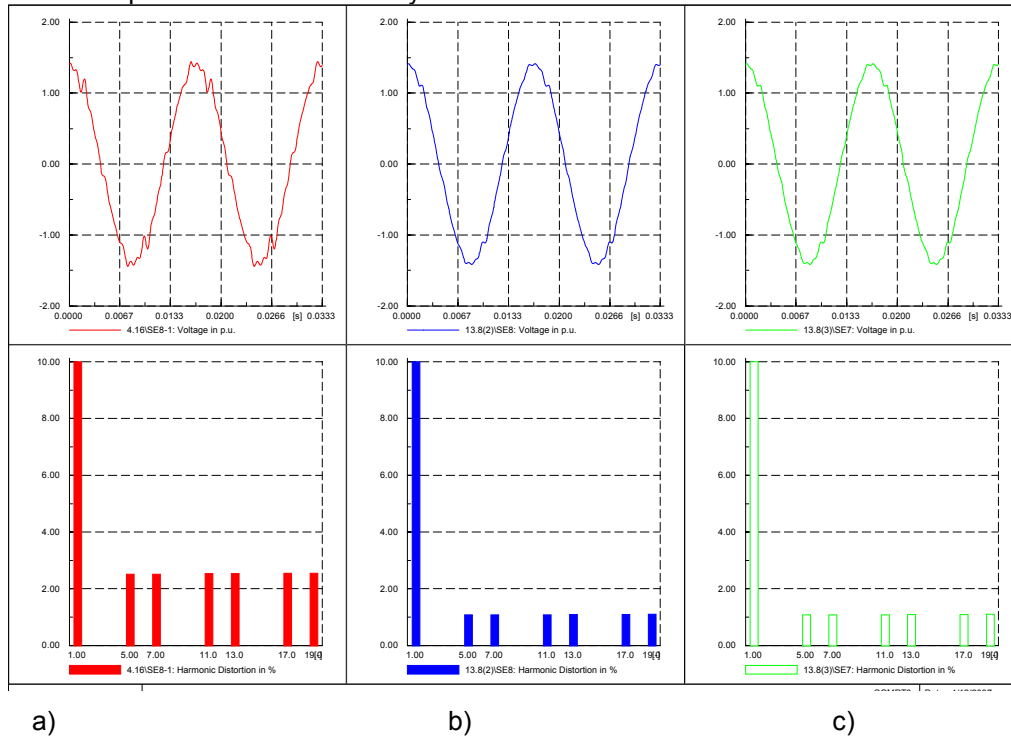


Figura. a) Espectros Armónicos en el Bus de la ruta 3 de 4.16 kV, con 1 motores de 1100 hp y 1 motor de 60 hp. b) y c) Espectros Armónicos en los Buses de 13.8 KV de la trayectoria de la ruta 3 con interruptor de amarre y sin el horno de arco eléctrico.

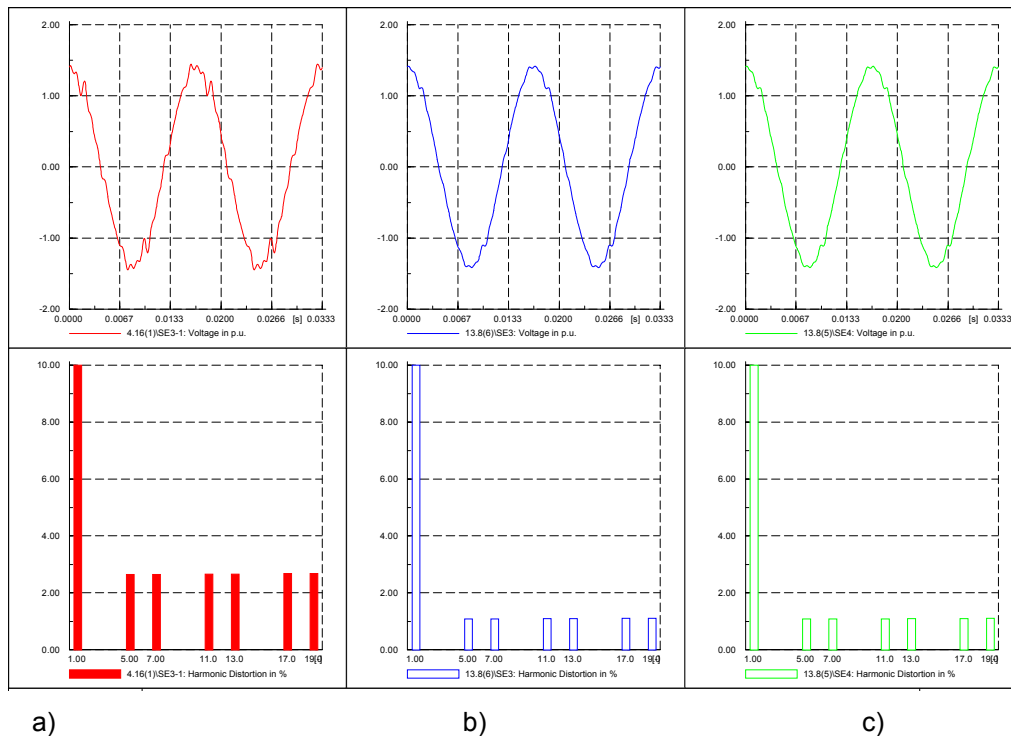


Figura. a) Espectro Armónico en el Bus de la ruta 4 de 4.16 kV con 1 motores de 1100 hp y 1 motor de 150 hp. b) y c) Espectros Armónicos en los Buses de 13.8 KV de la trayectoria de la ruta 4 con interruptor de amarre cerrado y sin el horno de arco eléctrico.

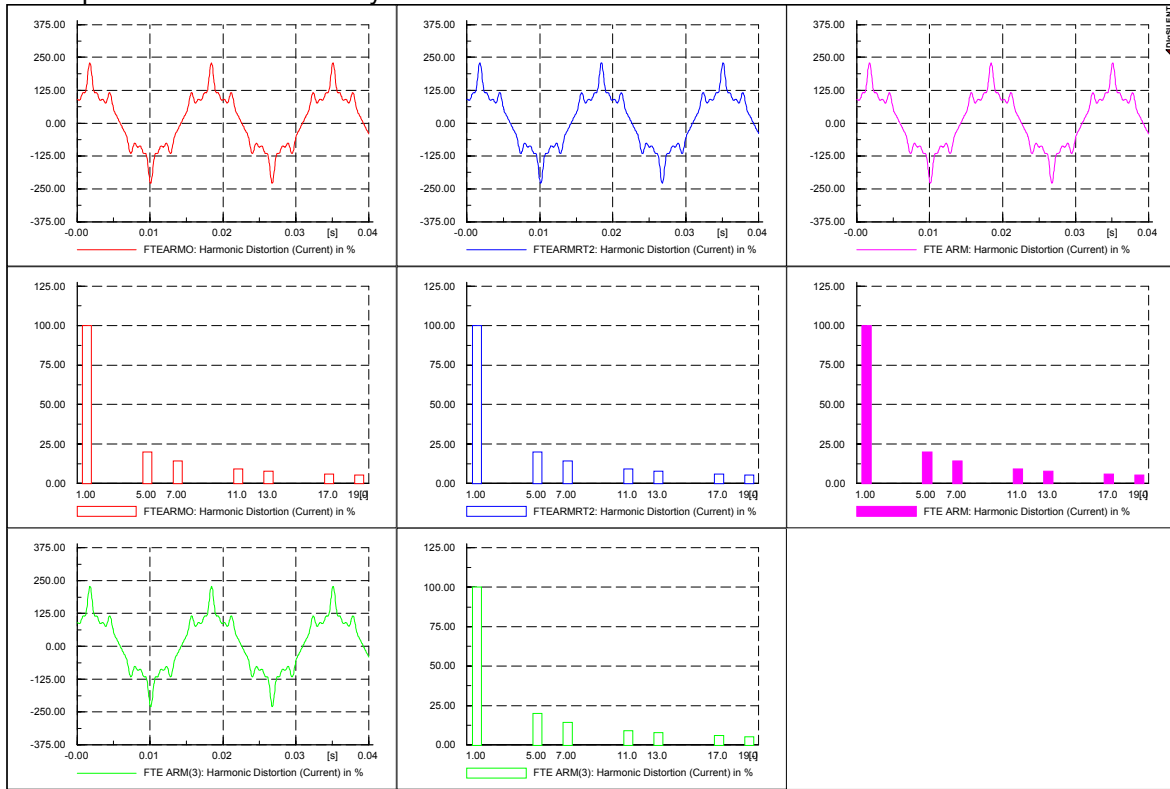


Figura. Espectro Armónico en el motor de la ruta 1 de 0.48 kV (color rojo), espectro armónico de el motor de 1100 hp de la ruta 2 de 0.48 kV(color azul). Espectro Armónicos en el motor de 1000 hp en la ruta 3 en el bus de 4.16 KV (color violeta). Espectro armónico del motor de 1100hp de la ruta 4 de 4.16 kV (color verde)

Apéndice 2

ANÁLISIS DE LOS ARMÓNICOS

El propósito de este capítulo es presentar la teoría básica de las definiciones de cantidades armónicas para su análisis, el índice armónico en el uso común de los sistemas eléctricos. Inicialmente para el estudio de los armónicos se basa en métodos y análisis de la serie de Fourier y que pueden usarse para interpretar el fenómeno de la forma de onda como también algunos principios de la transformada de Fourier, usadas en las técnicas de medición de armónicos [1, 34,35].

2.1- Análisis de la Serie de Fourier

Uno puede componer una distorsión de una forma de onda periódica de cualquier forma concebible usando diferentes frecuencias de armónicas con amplitudes diferentes. Recíprocamente, uno también puede descomponer cualquiera disturbio de la forma de onda periódica en una onda fundamental y un conjunto de armónicos. Este proceso de descomposición se llama "análisis de Fourier". Con esta técnica, nosotros podemos analizar los efectos de elementos no-lineal sistemáticamente en los sistemas eléctricos [1].

La teoría de la serie de Fourier involucra expresiones de funciones arbitrarias en ciertos tipos de serie trigonométrica y demuestra que cualquier función periódica en un intervalo de tiempo puede ser representado por la suma de un principio y una serie de órdenes más altos de componentes armónicos a frecuencias que son múltiplos enteros de la componente fundamental. La serie establece una relación entre la función del tiempo y el dominio de frecuencia [2].



La serie de Fourier por lo regular, integran una función periódica $f(t)$, de periodo T en segundos y una frecuencia fundamental $f_0 = 1/T$ en Hz, o $\omega = 2\pi f$ rad / s, puede ser escrito como [3]:

$$F(t) = C_0 + \sum C_n \cos(n\omega + \theta_n) \quad (2.2)$$

Una función $f(t)$ que sea periódica con el periodo T , entonces esta función puede representarse por la serie trigonométrica.

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(ht_0) + b_h \text{sen}(ht_0)\} \quad (2.3)$$

$\omega_0 = 2 / T$. Una serie tal que (2.3) se llama **la serie de Fourier trigonométrica**, Puede ser rescribirse como;

$$f(t) = c_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{c_h \text{sen}(ht_0 + h)\} \quad (2.4)$$

Dónde

$$c_0 = \frac{a_0}{2}, c_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2}, h = \tan^{-1}\left(\frac{a_h}{b_h}\right) \quad (2.5)$$

Observando (2.4), nosotros vemos que la expresión serie Fourier de una función periódica representa una función periódica como una suma de componentes de la senoidal con diferentes frecuencias. La magnitud y ángulo de la fase de cada armónico determina la forma de onda resultante de $F(t)$.

2.1.2-FORMA COMPLEJA DE LA SERIE DE FOURIER

Partiendo de la formula de Euler en las funciones trigonométricas de la ecuación (2.3) obtenemos;

$$F(hw_0) = a_h \frac{e^{jhw_0t} + e^{-jhw_0t}}{2} + b_h \frac{e^{jhw_0t} - e^{-jhw_0t}}{2} \quad (2.6)$$



Realizando operaciones obtenemos la ecuación de síntesis de la serie de fourier en forma exponencial;

$$F(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} c_h e^{jh\omega t} \quad (2.7)$$

Dónde para $h = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$,

Utilizando en forma similar las ecuaciones de Euler es posible calcular la ecuación de análisis para la forma compleja partiendo de la ecuación (2.7):

$$C_h = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jh\omega t} dt \quad (2.8)$$

2.1.3-TRANSFORMADA DE FOURIER

Una señal se puede analizar de dos formas diferentes. La forma más común es en el dominio del tiempo: esta es la que se tiene al observar la señal en un osciloscopio donde en el eje de las abscisas se tiene al tiempo (t) y en eje de las ordenadas la magnitud de la señal F(t). La segunda forma es la representación de la señal en el dominio de la frecuencia, la cual se obtiene con un analizador del espectro de frecuencia, la señal F(t) en términos de la variable de la frecuencia (ω).

El proceso de pasar del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia y viceversa se le conoce como Transformada de Fourier. La transformada de Fourier de una función f (t) se define como la integral de fourier o ecuación de análisis;

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.10)$$

y f (t) se llama la inversa de la transformada de Fourier de F(ω), que se define como:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{j\omega t} dt \quad (2.11)$$



Las ecuaciones (2.10) y (2.11) ; se llama a menudo la **transformada de Fourier par**, y ellos son usados para trazar cualquier función en el intervalo de $(-\infty, \infty)$ en el tiempo o en el dominio de frecuencia en una función continua en el dominio inverso.

La ecuación (2.10) transforma la función de tiempo en un espectro de frecuencia, y (2.11) sintetiza el espectro de frecuencia para recobrar la función de tiempo.

La propiedad importante de la transformada de Fourier es su habilidad de examinar una función de la forma de onda desde la perspectiva del tiempo y el dominio de la frecuencia.

2.1.4-TRANSFORMADA DISCRETA DE FOURIER

En el caso de representar la función $f(t)$ a través de un conjunto de mediciones, es posible aplicar la transformada de Fourier y obtener el espectro de frecuencia de dicha señal en formas discreta, cuando el espectro de dominio de frecuencia y la función en el dominio de tiempo ambas funciones probadas periódicas con N muestras por periodo, (2.10) y (2.11) puede ser representada por lo siguiente transformada de Fourier discreta llamado (DFT) par:

$$F(k\Delta\Omega) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n\Delta T) e^{-j2kn/N} \quad (2.12)$$

y

$$f(n\Delta T) = \sum_{h=0}^{N-1} F(h\Delta\Omega) e^{j2hn/N} \quad (2.13)$$

Dónde : $k, n = 0, 1, \dots, N-1, \Delta\Omega = 2\pi / \Delta T$ y $\Delta T = T/N$.

El DFT se usa a menudo en la medición de armónicos porque el dato medido siempre está disponible en la forma de una muestra en función del tiempo. La muestra en función del tiempo se representa por una serie de puntos en el tiempo de magnitud conocida separada por los intervalos de tiempo fijos de duración limitada.



2.1.5-TRANSFORMADA RAPIDA DE FOURIER

Para calcular la transformada discreta de Fourier de una señal se requieren N^2 operaciones complejas, lo cual hace prohibido este proceso conforme aumenta el número de muestras. Para el caso de un número de muestras igual a 2^k , para k entero, existe una versión que realiza en forma eficiente estos cálculos, requiere solo $(N/2)\log_2(N)$ multiplicaciones. Este algoritmo se conoce como transformada rápida de Fourier (FFT). El análisis de Fourier puede hacerse por DFTs.

Los DFTs son a menudo calculados por el uso de la transformada rápida de (FFT) el algoritmo[1].

Las técnicas de FFT son los métodos más rápidos para realizar los cálculos de DFT [1], que permite la evaluación de un número grande de funciones. Hay varios algoritmos de FFT disponibles que pueden ser fácilmente usado en el análisis armónico.

2.2 DEFINICIONES BÁSICAS DE CANTIDADES ARMÓNICAS

Convencionalmente, existen definiciones usadas para describir las cantidades eléctricas del estudio de sistema de potencia que operan senoidalmente en estado estable. Pero en un ambiente contaminado de armónico, la teoría que considera las cantidades eléctricas necesita ser redefinirlas para distinguir esas cantidades armónicas y adecuarlos a una frecuencia fundamental del mismo sistema eléctrico.

En el análisis armónico hay varios índices importantes usados para describir los efectos de armónicos en los componentes de sistema de potencia y sistemas de comunicación. [11][12].

El índice armónico normalmente usado es THD



$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (2.14 \text{ y } 2.15)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1}$$

El cual se define como la proporción del valor rms de los componentes armónicos al valor rms de la componente fundamental y normalmente expresada en porcentaje.

Este índice se usa para medir la desviación de una forma de onda periódica que contiene los armónicos de una onda senoidal perfecta. **Para una onda senoidal perfecta a la frecuencia fundamental, el THD es CERO.**

En esta sección se describe algunas definiciones útiles asociadas con el voltaje, corriente, potencia instantánea, potencia promedio o activa, potencia aparente, potencia reactiva y factor de potencia procesados bajo las situaciones de no-senoidal.

2.3.1-Cantidades eléctricas Bajo la Situación de No senoidal

En un estado estable los armónicos están presentes, el voltaje y corriente instantánea pueden ser representadas por la serie de Fourier como sigue:

$$v(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} v_h \text{sen}(h \omega_o t + \phi_h) \quad (2.16)$$

$$i(t) = \sum_{h=1}^{\infty} i_h(t) = \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \text{sen}(h \omega_o t + \phi_h) \quad (2.17)$$

Los términos de CD, normalmente se ignoran para la simplicidad, V_h e I_h son los valores rms para el orden h -th de voltaje y corriente armónico, respectivamente. La potencia instantánea se define:

$$P(t) = v(t) i(t) \quad (2.18)$$



y la potencia promedio por encima de uno periodo T de P(t) se define como

$$P_m = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (2.19)$$

Si nosotros sustituimos (2.16) y (2.17) en (2.18) y hace uso de las relaciones ortogonales de (2.7), puede mostrarse que

$$P = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \cos(\theta_h - \phi_h) = \sum_{h=1}^{\infty} P_h \quad (2.20)$$

Nosotros vemos que cada armónico establece una contribución más o menos de la potencia promedio. No hay ninguna contribución a la potencia promedio del voltaje a una frecuencia y a otra corriente. La potencia Promedio generado por los armónicos normalmente es muy pequeño comparado con la potencia promedio de la fundamental.

$$V_{rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt \right)} = \sqrt{\left(\sum_{h=1}^{\infty} v_h^2 \right)} \quad (2.21)$$

y

$$I_{rms} = \sqrt{\left(\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt \right)} = \sqrt{\left(\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2 \right)} \quad (2.22)$$

Respectivamente. La potencia aparente se da por;

$$S = V_{RMS} I_{RMS} \quad (2.23)$$

Una definición ampliamente aceptada de Potencia aparente es;

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (2.24)$$

Donde; Q es la potencia reactiva definida como:

$$Q = \sum_{h=1}^{\infty} V_h I_h \sin(\theta_h - \phi_h) \quad (2.25)$$



D se define como los Volt-amperes de distorsión el cual corresponde a los productos de voltajes y corrientes de componentes de frecuencia diferentes en (2.16) y (2.17).

Cuando los armónicos no están presentes en (2.23), S es igual a $V_1 I_1$ que es convencionalmente definido como la potencia aparente de la frecuencia fundamental. Bajo la situación del senoidal, la ecuación de potencia relaciona mutuamente el promedio de potencia reactiva y potencia aparente, esto es definido como;

$$(V_1 I_1)^2 = P_1^2 + Q_1^2 \quad (2.26)$$

$Q_1 = V_1 I_1 \sin(\theta)$, es la potencia reactiva fundamental definido en (2.27) para $h = 1$.

En la actualidad no hay todavía, ningún acuerdo general en las definiciones y los significados físicos que consideran potencia reactiva y potencia de distorsión entre investigadores y científicos [4, 7].

En [8], algunas definiciones alternativas con las interpretaciones en las definiciones de potencia de otra manera que anteriormente se describen. El concepto de factor de potencia originado de la necesidad de cuantificar una carga que eficazmente utiliza la corriente que deduce del sistema de potencia de CA. Sin tener en cuenta la situación senoidal o no senoidal, el factor de potencia total se define como

$$F.P = \frac{P}{S} \quad (2.27)$$

Donde; P es potencia promedio (activa) contribuido por el componente de frecuencia fundamental y otros componentes armónicos, como se muestra en (2.20).

El factor de potencia, puede ser mal medido, ya que en la práctica no se considera por el $\cos \theta$, definición que no es aplicable ante la presencia de armónicas.

La distorsión del Factor de Potencia

Cuando el voltaje y corriente contienen armónicos, esto puede mostrarse [11, 15].

$$V_{rms} = \sqrt{1 + (THD_v / 100)^2} \quad (2.28)$$

y

$$I_{rms} = \sqrt{1 + (THD_i / 100)^2} \quad (2.29)$$

Sustituyendo (2.23) y (2.24) en (2.14 y 2.15). El factor de potencia total nos queda.

$$Pf_{tot} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + (THD_v / 100)^2} \sqrt{1 + (THD_i / 100)^2}} \quad (2.30)$$

En la mayoría de los casos, sólo una porción muy pequeña de Potencia promedio (activa) se contribuye por el armónico y la total distorsión de voltaje armónico es menor del 10%. Así (2.32) puede expresarse como

$$Pf_{tot} \approx \frac{P_1}{V_1 I_1} \cdot \frac{1}{V_1 I_1 \sqrt{1 + (THD_i / 100)^2}} = \cos(\theta_h) pf_{dist} \quad (2.31)$$

En (2.31), el primer término, $\cos(\theta_h)$ es conocido como el factor de potencia de desplazamiento, y el segundo término, el pf_{dist} , se define como el factor de potencia de distorsión. El factor de potencia de desplazamiento siempre no es mayor que uno, por lo tanto:

$$pf_{tot} \leq pf_{dist} \quad (2.32)$$

Obviamente, para las cargas no lineales de solo una fase con alta distorsión de corriente, el factor de potencia total es pobre. También debe notarse que es probable que agregando el factor de potencia de corrección capacitivo a tal carga cause las condiciones de resonancia. Una alternativa para mejorar el factor de potencia de distorsión está usando el filtro pasivo o activo para cancelar armónicos producido por las cargas no-lineal.



2.3.2 ARMONICOS EN LOS SISTEMAS TRIFASICOS EQUILIBRADOS Y DESEQUILIBRADOS

En los sistemas Trifásicos equilibrados y bajo las condiciones de operación en equilibrio, las magnitudes y ángulos de la fase (en particular) para tres fases, los voltajes y las corrientes armónicas son sensibles para la red o carga balanceadas. Incluso para las desviaciones pequeñas en las condiciones equilibradas a la frecuencia fundamental, ha notado que el desequilibrio armónico puede ser significativo.

El armónico en cada fase por ejemplo, en el caso de la tercera armónica, las corrientes de fase B se retrasarían un ángulo de $3 \times 120^\circ$ o 360° , y aquellos en la fase C habría llevarse por la misma cantidad y aparece para los componentes de secuencia-cero [11, 12]. Similarmente el análisis para las quintas armónicas que aparecen en la secuencia negativa, la séptima es para la secuencia positiva.

En el caso de desbalanceo, las corrientes de línea y corrientes del neutro pueden contener todos los órdenes de armónicos y contenerlos en los componentes de todas las secuencias. Los convertidores de electrónica de potencia de tres fases pueden generar “Armónicos no-característico” bajo el funcionamiento de operación no-lineal o desequilibrado.

2.3.3 - Secuencias de Fases de Armónicos

Para un sistema de tres fases balanceadas bajo la condición no senoidal, el orden h-th de voltaje armónico de cada fase puede expresarse como

$$V_{ah}(t) = \sqrt{2} V_h \text{sen}(h \omega_o t + \theta) \quad (2.33)$$

$$V_{bh}(t) = \sqrt{2} V_h \text{sen}(h \omega_o t - 2h/3 + \theta) \quad (2.34)$$

$$V_{ch}(t) = \sqrt{2} V_h \text{sen}(h \omega_o t + 2h/3 + \theta) \quad (2.35)$$



Por consiguiente, la secuencia de la fase armónica en un sistema de tres fases equilibrado tiene los parámetros mostrados en Tabla A.2.2.

ORDEN h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
SEC. DE FASE	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+	-	0	+

Tabla A.2.3. Secuencias de Fase Armónicas en un Sistema de potencia de Tres-fase Equilibrada.

Observando la Tabla A.2.3, Observamos que la secuencia negativa y cero también están presentes en el sistema, y todos los triples son completamente de secuencia cero. La anterior tabla aplica solo armónicas de secuencia positiva para una modelo monofásico o equilibrado y en un modelo desequilibrado, los armónicos de cada orden están contenidas en las tres diferentes secuencia. Esto requiere un análisis más complicado [9,11].

Las definiciones en (2.16) - (2.22) del apéndice A, son convenientes para las tres fases balanceadas del sistema. Sin embargo, para el sistema desequilibrado, la potencia aparente necesita ser redefinida. La referencia [10] proporciona algunas definiciones de potencia prácticas con las condiciones desequilibradas.

La Distorsión de la Demanda total

La distorsión de la demanda total (TDD) es la distorsión de la corriente armónica total definida como TDD que es particularmente pertinente en la aplicación de IEEE Std 519.

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (2.36)$$

I_L es la demanda máxima de la corriente de carga (15 o 30 minutos de la demanda) a la frecuencia fundamental al punto de acoplamiento común, calculado como la corriente promedio de las demandas máximas durante los doce meses anteriores.



Factor k del Transformador

El factor K del transformador es un índice usado para calcular el diseño de transformadores normales cuando las corrientes armónicas están presentes [14]. El factor-K se define como;

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} h^2 (I_h / I_1)^2}{\sum_{h=1}^{\infty} (I_h / I_1)^2} \quad (2.37)$$

h es el orden armónico y I_h / I_1 es la distorsión de la corriente armónica individual correspondiente. (2.37) es calculado basado en la suposición, que en el devanado del transformador las pérdidas de corriente de Eddy son producidos por cada componente de corriente armónico que es proporcional al cuadrado del orden armónico y el cuadrado de magnitud del componente armónico.

El K-nominal del transformador se construye para resistir más distorsión de voltaje que los transformadores normales. El factor-K realmente relaciona al calor excesivo que debe ser disipado por el transformador. Esto es considerado en el diseño y fase de la instalación para la carga no-lineal, y se usa como una especificación para nuevo o reemplazo de la fuente de un equipo. La tabla A.2.3 muestra típicamente K-nominales de transformadores disponibles comercialmente regularmente entran en la categoría de K-1.

Tabla A.2.3. Factor K para el diseño de Transformadores comercialmente Disponibles.

Categoría
K-4
K-9
K-13
K-20
K-30
K-40



Los niveles de distorsión causados por los armónicos pueden ser caracterizados por el espectro completo de armónicos mediante magnitudes y ángulos de fase de cada componente armónico individual. Normalmente es común usar una medida como índice para la calidad de una forma de onda periódica en este caso es la Distorsión Armónico Total (THD), en valor efectivo.

Apéndice 3

MODELADO DE UN SISTEMA

Actualmente para la mayoría de los análisis convencionales, los sistemas eléctricos son modelados esencialmente como un sistema lineal con elementos pasivos excitados por una magnitud constante y frecuencia constante de las fuentes de voltaje senoidal. Sin embargo, con la proliferación de carga de electrónica de potencia que están inyectando una cantidad significativa de corrientes armónicas en los sistemas eléctricos, es necesario tener modelos más reales en el dominio de la frecuencia [13, 17, 32, 40, 41]. A continuación se describe la metodología general para modelar los elementos que integran un Sistema Eléctrico.

A.3.2 LAS LÍNEAS AEREAS Y LOS CABLES SUBTERRÁNEOS

Las líneas de transmisión presentan diferentes modelos en función de su longitud, tensión y frecuencia, de acuerdo a su longitud se clasifican en cortas, medias y largas. El Modelado de las líneas y cables por encima de una gama amplia de frecuencias son relativamente bien documentados en la literatura [16, 33]. Las líneas Típicas o los cables pueden ser modelados por multifases de circuitos equivalente acoplado.

Para el análisis armónico equilibrado los modelos pueden ser simplificado por un circuito PI (π) monofásico usando como datos las secuencias positivas y zeros.

Los problemas principales en el modelado de estos componentes son la dependencia de la frecuencia dada en por-unidad y a la longitud de la impedancia en serie y los efectos a lo largo de la línea.

En el estudio de armónicos, una línea es considerada larga cuando su longitud es mayor al 5% de la longitud de onda a la frecuencia de interés. Por lo tanto:

$$l = \frac{0.05\lambda}{n} \quad (3.1)$$

Como resultado, el nivel de detalle de sus modelos depende de la longitud de la línea y el orden armónico:

- En los sistemas industriales y utilización de sistemas de distribución donde las longitudes de línea son cortas es costumbre el uso de las secuencias de impedancias. Normalmente es despreciada la Capacitancia excepto en el caso de distancias largas de cables.
- Un estimado muy por encima de la longitud de la línea es que la línea larga debería usar modelos de $150/n$ millas para línea aérea y $90/n$ millas para cable del subterráneo, donde n es el número de armónico.
- Considerar el Efecto piel (Skin) para efectuar la corrección, ya que es importante en los sistemas de EHV Porque la resistencia de la línea es la fuente principal de amortiguamiento.

Modelado de líneas

Modelo de línea larga: Se considera una distribución uniforme de los parámetros R , L y C a lo largo de la línea. Se representa por un circuito pi equivalente que se muestra en la figura 3.1(a). Los parámetros Y' y Z' se pueden consultar en [28].

Modelo de línea corta: Se desprecia el efecto piel y la admitancia Shunt. Se concentran los valores totales de la resistencia (R) y de la inductancia (L), la reactancia resultante se multiplica por h , siendo h el orden de cada componente armónica ($h = 1, 2, 3, 4, 5$, etc, que equivalen a 60, 120, 180, 240, 300 Hz).Figura 3.1b.

Para frecuencias armónicas, la extensión de la línea corta será menor a medida que aumenta la frecuencia analizada. En este modelo no se identifican las posibles resonancias producidas por el efecto capacitivo e inductivo de la línea.

Modelo de línea media: Se considera la impedancia serie y la admitancia Shunt, la cual está compuesta por una conductancia G , responsable de las corrientes de fuga (principalmente a través de los aisladores que sustentan la línea) y por la capacitancia C de la línea con relación a tierra. Estos parámetros son concentrados y divididos en dos partes iguales que se conectan en los terminales de la línea. El modelo se denomina modelo π nominal. Figura 3.1c.

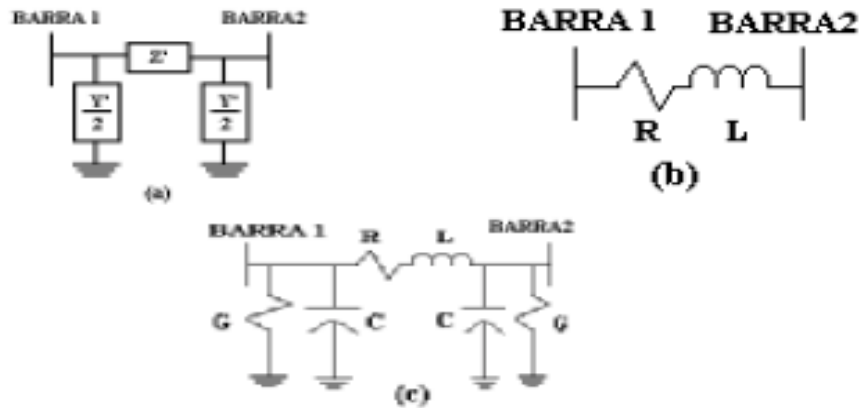


Figura 3.1. Modelos de (a) Línea larga, (b) Línea corta y (c) Línea media.

Un circuito π nominal es adecuado para líneas cuya extensión no sobrepase los 200 Km a 60 Hz, y cuya tensión nominal sea inferior a 400 kV. Los parámetros X_L y X_C resultantes deben ser multiplicados por h , [28,40].

A.3.3 LOS TRANSFORMADORES

En la mayoría de las aplicaciones, los transformadores están modelados con una impedancia en serie con resistencia, ajustada para los efectos piel (Skin). Esto es porque los datos adecuados normalmente no están disponibles. Las conexiones de transformador trifásicos pueden proporcionar un cambio de fase de $\pm 30^\circ$. Otras conexiones tales como los devanados de Zig-Zag se usan para mitigar los armónicos. El cambio de fase asociado con las conexiones del transformador debe considerarse para los sistemas de múltiples fuentes [40].

Otras consideraciones incluyen las características de no-linealidad en las pérdidas de la resistencia en el núcleo, la pérdida circulante en la capacitancia y la saturación del núcleo. Los efectos armónicos debido a la no-linealidad de la resistencia son pequeños comparado a la no-linealidad de la inductancia. Los efectos de pérdidas de los capacitores sólo son normalmente notables para las frecuencias superiores de 4 KHz.

Las características de saturación pueden ser representadas como una fuente armónica que usa el modelo no lineal V-I, si la saturación causa la generación de armónicas es de preocuparse.

Se emplean modelos que no incluyen las capacitancias entre devanados debido a que los fenómenos de resonancia se presentan a frecuencias muy altas. Referencias [28].

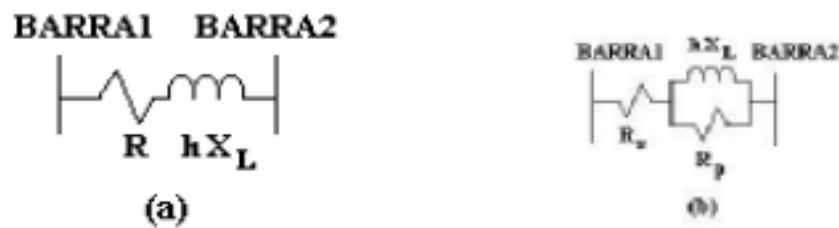


Figura 3.3. Modelos del transformador, (a) Modelo 1 y (b) Modelo 2.

Modelo 1. Es la representación más simple de un transformador y está compuesta por la inductancia de dispersión en serie con la resistencia del devanado. La reactancia debe ser multiplicada por h, [28].

Modelo 2. Una resistencia R_p es colocada en paralelo con una inductancia X_L , que es obtenida por medio de la reactancia de dispersión a la frecuencia fundamental, esta combinación, es colocada en serie con una resistencia R_s . Ver Figura 3.3 (b).

Las resistencias R_p y R_s son independientes de la frecuencia y son estimadas a través de las ecuaciones (2) y (3):

$$90 < \frac{v^2}{SxRs} < 110 \quad (3.2)$$

$$13 < \frac{SxRp}{v^2} < 30 \quad (3.3)$$

Este modelo fue propuesto por el grupo de trabajo de CIGRE y es más recomendado que el primero para estudios de penetración armónica [40].

A.3.4 -CARGAS ROTATORIAS GRANDES

En las máquinas síncronas e inducción el campo magnético rotatorio creado por un estator armónico gira a una velocidad significativamente diferente a la del rotor. Por consiguiente, las frecuencias armónicas de impedancia se aproximan a la impedancia de la secuencia negativa. En el caso de las máquinas síncronas, la inductancia está normalmente próxima para ser la impedancia de la secuencia negativa o el promedio de las impedancias subtransitoria del eje directo y de cuadratura. Para las máquinas de inducción, la inductancia es tomada para ser la inductancia del rotor bloqueado [42].

En cada caso, la frecuencia dependiente de resistencias puede ser significativa. La resistencia normalmente se incrementa en la forma n^a , donde n es el orden armónico y el parámetro 'a' va de 0.5 -1.5. La mayoría de los motores se conecta en delta y, por consiguiente, no se proporciona un camino para el armónico en la secuencia cero.

A.3.4.1 MÁQUINA SÍNCRONA. El comportamiento de las máquinas síncronas sometidas a frecuencias armónicas es bastante difícil de ser evaluado. Normalmente, los valores de las inductancias son determinados a partir de reactancias de eje directo y/o de eje en cuadratura, transitorias o subtransitoria (de secuencia negativa). En caso de que la inductancia sea obtenida usando la reactancia de secuencia negativa a frecuencia fundamental se aplica la siguiente relación, [28, 30].

$$L = \frac{X_2}{2X_pX_f} \quad (3.4)$$

$$X_2 = \frac{Xd''+Xq''}{"2} \quad (3.5)$$

Algunos modelos de la máquina síncrona utilizados son:

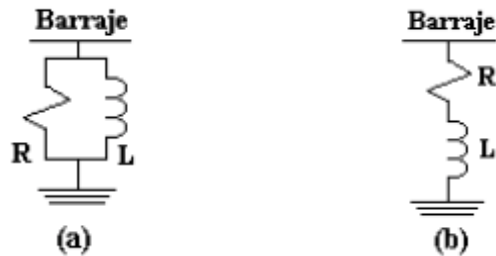


Figura 3.4. Modelos de la máquina síncrona, (a) Modelo 1y (b) Modelo 2.

Modelo 1. La inductancia obtenida a través de la relación de reactancias presentadas es colocada en paralelo con una resistencia que representa las pérdidas de los devanados, la reactancia es multiplicada por h. Ver Figura 3.4a.

Modelo 2. El modelo 2 es una derivación del modelo1 donde la inductancia L es colocada en serie con la resistencia R y su reactancia resultante también es multiplicada por h. Ver Figura (a) 3.4b.

3.4.2 MOTORES DE INDUCCIÓN. Un modelamiento para frecuencias armónicas obedece básicamente a los modelos convencionales para la frecuencia industrial.

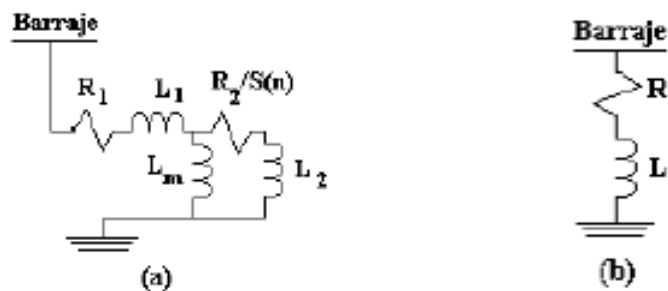


Figura 3.4.2 Modelos de los motores de inducción, (a) Modelo 1 y (b) Modelo 2.

Modelo 1. El deslizamiento para frecuencias armónicas es dado por;

$$S(n) = \frac{n + [1 - S(1)]}{n} \text{ para secuencia negativa} \quad (3.6)$$

$$S(n) = \frac{n + [1 - S(1)]}{n} \text{ para secuencia positiva} \quad (3.7)$$

$S(1)$ es el deslizamiento a frecuencia fundamental y el valor típico para el deslizamiento armónico $S(n)$ es muy próximo a la unidad y todas las reactancias se deben multiplicar por h , [17, 18].

Modelo 2. Es una simplificación del modelo 1, el motor es representado solamente por la reactancia equivalente, ya que para altas frecuencias, el deslizamiento se aproxima a la unidad, volviendo a las resistencias R_1 y R_2/S despreciables cuando se comparan con los valores de X_1 y X_2 . En este modelo, L es la inductancia de rotor bloqueado y R es la resistencia de amortiguamiento, que representa las pérdidas del motor. También la reactancia resultante debe ser multiplicada por h .

A.3.4.3 CARGAS PEQUEÑAS

En un estudio de flujo armónico las cargas de baja potencia no se representan individualmente; ellas son combinadas en circuitos equivalentes que representan mejor las características de impedancia del conjunto de cargas.

Es posible considerar variaciones en la impedancia del sistema con la frecuencia o con el nivel de cargabilidad, tanto para consumidores domésticos como para industriales. Sin embargo, como normalmente son las cargas industriales las que utilizan capacitores para la compensación del factor de potencia, son ellas las que presentan grandes posibilidades de contribuir para que ocurra una resonancia serie y/o paralela en el sistema eléctrico [42].

Otros modelos empleados para el análisis de armónicos son;

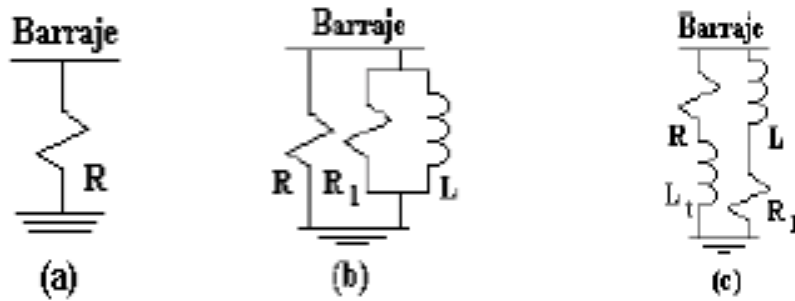


Figura 3.4.3. Modelos de cargas, (a) Modelo 1, (b) Modelo 2 y (c) Modelo 3.

Modelo 1. Es utilizado cuando las cargas son predominantemente resistivas (cargas comerciales o domésticas) y donde el efecto de los motores puede ser despreciado.

La resistencia R es obtenida a través de la potencia activa P y la tensión nominal a frecuencia fundamental [30].

$$R = \frac{V^2}{P} \quad (3.8)$$

Modelo 2. Representa, cargas compuestas principalmente por motores. Los parámetros son determinados de la siguiente forma:

$$R = \frac{V^2}{P(1-k-ke)} \quad (3.9)$$

$$L = \frac{V^2}{1.2kxk_1xPx\omega} \quad (3.10)$$

Donde, P es la demanda total (W), k es la fracción de la demanda total correspondiente a los motores, k_1 es la severidad en las condiciones de arranque y ke es la fracción de la carga controlada electrónicamente, [30]. La resistencia de amortiguamiento del motor se calcula (11), el valor k_2 está cerca de 0.20 según referencia [29].

$$R_1 = \frac{L}{K_2} \quad (3.11)$$



Modelo 3. Representa una carga compuesta de grandes motores de inducción o grupos de motores conectados directamente a tensión de Subtransmisión como en el caso de cargas industriales. Los parámetros R y L son definidos como en el modelo 2, en tanto que R1 y Lt son dados por:

$$R_1 = \frac{X_L}{K_3} \quad (3.12)$$

$$L_t = \frac{0.1R}{\omega} \quad (3.13)$$

k3 es el factor de mérito efectivo del circuito del motor, w es la frecuencia angular fundamental ($w = 2\pi f$; Rad. /Seg) y Lt representa la inductancia de dispersión equivalente de los devanados de los transformadores en los que las cargas están conectadas, del lado de baja tensión, y R1 es la resistencia serie del modelo equivalente del motor. Las reactancias resultantes ($X_L = \omega \times L$) deben ser multiplicadas por h, [28].

A.3.5 Condensadores

Son modelados por su capacitancia equivalente, constituyendo un modelo único que puede ser incorporado en un sistema serie o paralelo, estos dan como resultado reactancias capacitivas que para efectos del flujo armónico deben ser multiplicadas por h, [6,11, 12,].

A.3.6 Reactores

Los reactores utilizados en sistemas de potencia se pueden dividir en dos, dependiendo de cómo esté formado el núcleo.

- Núcleo de material ferromagnético que se comporta como un transformador en vacío y se utiliza en paralelo con el sistema.
- Núcleo de aire que se comporta como un transformador en corto circuito y se utiliza en serie con el sistema.

Cada uno de estos se representa por su valor de reactancia y para efectos de flujo armónico se deben multiplicar por h , [28, 29] como lo muestran las siguientes figura.

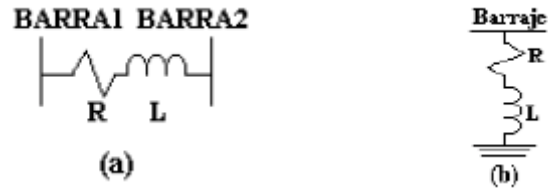


Figura 3.6.1. Modelo 1 del reactor, (a) en serie con el sistema y (b) en paralelo con el sistema.

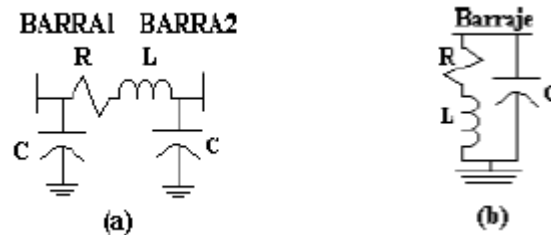


Figura 3.6.2. Modelo 2 del reactor, (a) en serie con el sistema y (b) en paralelo con el sistema.

Modelo 1. El reactor está en serie con el sistema. Normalmente, los reactores pueden ser representados con una combinación RL, siendo L la inductancia del reactor y R representa las pérdidas en el devanado.

Modelo 2. Se incorpora la capacitancia presentada por los reactores entre los devanados y tierra. La capacitancia total es distribuida entre los dos terminales del reactor. Esta capacitancia es mucho menor que la de los transformadores, [28, 29].

**APENDICE 4**

Características de los dispositivos que integra el diagrama Unifilar de la red principal de Kimberly y los datos esenciales para el estudio del análisis armónico.

Tipos LINEAS	V _L [kV]	Inom [kA]	R	X	L [mH/km]	R0	X0	L0 [mH/km]
			[ohm/k m]	[ohm/k m]		[ohm/k m]	[ohm/k m]	
2/0-0.6KV	0.6	212	0.33	0.1417	0.3747	0.99	0.423	1.12204
4/0-15KV	13.8	0.357	0.2097	0.2797	0.7421	0.6075	0.5656	1.50030
500 KCM- 0.6KV	0.6	0.46	0.089	0.1285	0.3395	0.267	0.384	1.01859
4/0 15KV	13.8	1	0.4194	0.3059	0.8114	1.0631	0.6954	1.84466
4/0-15KV	13.8	0.357	0.2097	0.2797	0.7421	0.6075	0.5656	1.50031
XLP- 13.8KV	13.8	0.277	0.333	0.2974	0.7889	0.869	0.6403	1.69845

Tabla 6.1. Diseño de las líneas tipo cable de tres fases a una frecuencia de 60 Hz.

MOTOR	TENSIO	SUB. ALIM.	Máq.		F.P DEL MOTOR	P OT. REAL [KW]	SPOT. APAR. [KVA]
	N[kV]		Mot.	Par			
S10M1	0.48(10)	SE10-1	1	1	0.8	44.76	48.195
S1M1	0.48(5)	SE1-1	1	1	0.8	889.232	1111.53
S1M2	0.48(5)	- SE1-1	1	1	0.8	889.232	1111.53
S1ME	0.48(5)	- SE1-1	1	1	0.8	889.232	1111.53
S3M1	4.16(1)	SE3-1	1	1	0.8	932.57	1169.085
S5M1	0.48(1)	SE5-1	1	2	0.8	134.28	144.58
S5M2	0.48(1)	SE5-1	1	1	0.8	55.95	60.24
S5M3	0.48(1)	SE5-1	1	1	0.8	600	642.41
S6M1	0.48(6)	SE6-1	1	2	0.8	186.1	200.217
S8M1	4.16	SE8-1	1	2	0.8	932.57	1169.085
S9M1	0.48(3)	SE9-1	1	2	0.8	74.65	80.32
SEM1	0.48(4)	SE7-1	1	6	0.8	119.2	120.49

Tabla 6.2. Datos de Motores trifásicos con la conexión de neutro a tierra a frecuencia de 60 Hz.



Tabla 6.3. Datos de las líneas tipo cable de tres fases a una frecuencia de 60 Hz.

Lon											
line	N	g[k	I _{nom}	Z1	Ang1						
a	L	m]	[kA]	[Ω]	[deg]	R1 [Ω]	X1 [Ω]	R0 [Ω]	X0 [Ω]	R2 [Ω]	X2[Ω]
L12	1	0.17	0.36	0.059	53.146	0.0356	0.0476	0.1033	0.0962	0.4751	-17.47
L(13)	4	0.02	1.84	0.006	55.189	0.0003	0.0005	0.0013	0.0015	0.6667	0.002
L(14)	5	0.02	2.3	0.005	55.189	0.0003	0.0004	0.0008	0.0012	0.6667	0.002
L(0)	1	0.02	0.36	0.007	53.146	0.0042	0.0056	0.0125	0.0113	0.4751	-17.47
L(10)	2	0.02	0.55	0.004	41.769	0.0026	0.0022	0.0066	0.0048	0.4751	-9.161
L(3)	1	0.05	0.28	0.023	41.769	0.0167	0.0149	0.0435	0.0321	0.4751	-9.161
L(1)	2	0.02	0.55	0.004	41.769	0.0025	0.0022	0.0066	0.0048	0.4751	-9.161
L(8)	2	0.8	0.55	0.178	41.769	0.1332	0.1170	0.3476	0.2561	0.4751	-9.161
L(9)	2	0.02	0.55	0.004	41.769	0.0025	0.0022	0.0066	0.0048	0.4751	-9.161
L(11)	1	0.96	1	0.498	36.106	0.4026	0.2937	1.0206	0.6676	0.4831	-4.928
L(15)	2	0.01	424	0.002	23.136	0.0017	0.0007	0.0049	0.0021	0.6667	0.002
L(16)	1	0.02	0.36	0.005	53.149	0.0032	0.0042	0.0092	0.0085	0.4670	-17.47
L(4)	2	0.75	0.55	0.167	41.769	0.1249	0.1115	0.3259	0.2401	0.4750	-9.161
L(2)	1	0.05	0.28	0.023	41.769	0.0167	0.0149	0.0435	0.0320	0.4751	-9.161
L(6)	2	0.02	0.55	0.004	41.769	0.0025	0.0022	0.0076	0.0048	0.4751	-9.161
L(7)	2	0.02	0.55	0.004	41.77	0.003	0.003	0.007	0.005	0.475	-9.161

Tabla 6.4. Datos característicos de las Fuentes Armónicas.

FTES						
ARMONICAS	SUBESTAC	TERMINAL	POT.REAL	POT.REAC	POT.APR	CONEXION
FTE ARM	SE8-1	4.16	0.9356	0.699375	1.168106	ABC-'YN'
FTE ARM(3)	SE3-1	4.16(1)	0.9325	0.699375	1.165625	ABC-'YN'
FTEARM(1)	SE1-1	0.48(5)	0.88923	0.6669225	1.111537	ABC-'YN'
FTEARM(2)	SE1-1	0.48(5)	0.88923	0.6669225	1.111537	ABC-'YN'
FTEARMO	SE10-1	0.48(5)	0.04476	0.03356	0.055944	ABC-'YN'
FTEARMRT2	SE1-1	0.48(5)	0.88923	0.6669225	1.111537	ABC-'YN'



Características del Espectro armónico del horno de arco eléctrico empleado en el caso de sistemas desbalanceado

Carga General - REDLUNAL...Horno.ElMod

Corto Circuito ANSI | Simulación RMS | Simulación EMT | Armónicos
 Optimización | Estimator de Estado | Confiabilidad | Descripción
 Datos Básicos | Flujo de Carga | Corto Circuito VDE/IEC | Corto Circuito Completo

Modo de Entrada: Defecto

Balanceado/Desbalanceado: Desbalanceado

Punto de Operación: Valores actuales

Potencia Activa: 60.1 MW | 60.1 MW
 Potencia Reactiva: 135.19 Mvar | 135.19 Mvar
 Tensión: 1. p.u.
 Factor de escala: 1.

Ajustada a través de escalamiento de caFactor de escala-Zona: 1.

Fase 1: Valores actuales

Potencia Activa: 19.4 MW | 19.4 MW
 Potencia Reactiva: 44.45 Mvar | 44.45 Mvar

Fase 2: Valores actuales

Potencia Activa: 20.1 MW | 20.1 MW
 Potencia Reactiva: 45.83 Mvar | 45.83 Mvar

Fase 3: Valores actuales

Potencia Activa: 20.6 MW | 20.6 MW
 Potencia Reactiva: 44.91 Mvar | 44.91 Mvar

Fuentes de Armónicos - Library\FTE_HORNO.TypHmccur

Nombre: FTE_HORNO

Fuentes Balanceadas/Desbalanceadas:
 Balanceadas
 Desbalanceadas

Armónicos:

	I_{a_h}/I_{a_1} %	I_{b_h}/I_{b_1} %	I_{c_h}/I_{c_1} %	$\phi_{hA}-\phi_{hA_1}$ deg	$\phi_{hB}-\phi_{hB_1}$ deg	$\phi_{hC}-\phi_{hC_1}$ deg
1	0.21	0.21	0.25	185	110	255
2	0.23	0.35	0.25	85	145	209
3	0.105	0.2	0.18	278	165	110
4	0.3	0.24	0.15	135	75	275
5	0.1	0.05	0.12	90	158	68
6	0.5	0.07	0.4	105	210	275
7	0.8	0.04	0.1	90	178	165
8	0.14	0.1	0.04	330	110	315
9	0.1	0.04	0.14	165	68	145
10	0.2	0.1	0.04	135	315	275
11	0.098	0.028	0.12	105	210	268



Tabla 6.5. Datos importantes de los Transformadores Trifásicos en las subestaciones.

SUB	ELE M.	LADO HV		LADO LV		S [MVA]	F[Hz]	LAD O HV	LADO LH	CONX.	Z _T %
		SUB.		SUB.							
TRP1	TR1	115KV	BGS	13.8K	B1	9.375	60	115	13.8	D - YN	5.75
TRP2	TR2	115KV	BGS	13.8K	B2	14	60	115	13.8	D - YN	5.75
TSE1	T1	13.8	SE1	0.48(5)	SE11	3.22	60	13.8	0.48	D - ZN	5.75
TSE10-1	T10	13.8(9)	SE10	SE10-	SE10	0.225	60	13.8	0.48	D - YN	3.0
TSE11	T11	B2	SE11	13.8	SE11	3	60	13.8	0.48	D - YN	5.75
TSE12	T12	13.8kV	SE12	SE12- 0.48	SE12	2.576	60	13.8	0.48	D - YN	5.75
TSE2	T2	13.8(1)	SE2	0.48	SE2	2.576	60	13.8	0.48	D - YN	5.75
TSE3	T3	13.8(6)	SE3	4.16(1)	SE31	2.578	60	13.8	4.16	D - YN	5.75
TSE4	T4	13.8(5)	SE4	0.48(2)	SE41	3.22	60	13.8	0.48	D - YN	5.75
TSE5	T5	13.8(4)	SE-5	0.48(1)	SE51	3.22	60	13.8	0.48	D - YN	5.75
TSE6	T6	13.8(8)	SE6	0.48(6)	SE61	3	60	13.8	0.48	D - YN	5.75
TSE7	T7	13.8(3)	SE7	0.48(4)	SE71	3	60	13.8	0.48	D - YN	5.75
TSE8	T8	13.8(2)	SE8	4.16	SE81	2.576	60	13.8	4.16	D - YN	5.75
TSE9	T9	13.8(7)	SE9	0.48(3)	SE91	3.22	60	13.8	0.48	D - YN	5.75

Nombre de archivo: TESIS_ARM
Directorio: C:\Mis documentos
Plantilla: C:\WINDOWS\Application
Data\Microsoft\Plantillas\Normal.dot
Título: RESUMEN
Asunto:
Autor: krullbad
Palabras clave:
Comentarios:
Fecha de creación: 27/06/2007 07:52
Cambio número: 3
Guardado el: 27/06/2007 08:08
Guardado por: .
Tiempo de edición: 20 minutos
Impreso el: 27/06/2007 08:08
Última impresión completa
Número de páginas: 154
Número de palabras: 76,586 (aprox.)
Número de caracteres: 398,250 (aprox.)