

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

01170

COMPONENTES ARMONICAS EN SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA GENERÁCION. EFECTOS Y MEDIDAS

CORRECTIVAS

Т		Ε		S		1	S
QUE	PA	AF	OBTE	NER	EL	GRADO	DE:
MAE	STRO	E	N II	IGEN	IERIA	(ELECT	RICA)
SIST	EMAS	6	ELECTRI	cos	DE	POTE	NCIA
P	R	Е	S	E	N	т	A :
GON	IZALO		\SAN	DOV	4L	RODRI	GUEZ

DIRECTOR DE TESIS: ING. RAFAEL GUERRERO CEPEDA

TENS CON

ORIGEN



CIUDAD UNIVERSITARIA



Universidad Nacional Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedicatorias

Con este trabajo se culmina una etapa muy importante de mi vida, durante la cual recibí el apoyo de muchas personas. A ellas les dedico esta tesis.

Mi mayor agradecimiento y reconocimiento a mi familia, especialmente a mis padres, Horacio Sandoval y Delia B. Rodríguez, por haberme apoyado durante esta etapa y haberme aconsejado en los momentos difíciles. Mil gracias por todo lo que me han dado y por ser unos padres ejemplares.

A Ma. Teresa Peñuñuri, amiga y compañera, que me tuvo una gran paciencia durante todo este tiempo y que constituyó una motivación para salir adelante.

A César "Dr. Cronch" Vargas Razo por el privilegio de gozar de su amistad y por ser un ejemplo de superación.

Al Ing. Eduardo Kuri, de TV Azteca, por haberme dado la oportunidad de combinar mis estudios de Maestría con mi trabajo.

Al Ing, Jesús Gómez, de TV Azteca, por haber contribuido a mi formación profesional en el área de Mantenimiento Eléctrico, y por haberme apoyado y dado las facilidades para realizar mis estudios.

A mis compañeros del Cuarto de Máquinas:

Adrián "Gasparin" Martínez Montiel, que verdaderamente es todo un espectro en su trabajo y en hacerme reir.

Ernesto Ocaña "El que regaña" Villeda, que con su frase ¿Qué &%#@\$%# &\$#%@\$%#@& &#% &#%@?, siempre me hizo muy ameno el trabajo.

Héctor "*Alguien*" Manuel Gómez, porque fue *alguien* que siempre hizo muy agradables mis sesiones sabatinas en la empresa.

Joel "Cuiquín" Jaime Serrano, por haberme cuidado en la empresa como todo un *papiringo*.

Gracias a todos ustedes por su apoyo, por ser compañeros y, principalmente, por ser amigos.

Quiero también agradecer a Rolando "Rolas" Aguilar César por su confianza y amistad, así como a Mauricio "Tranza-Mauri" Albarrán Suárez por los momentos tan divertidos en el Cuarto de Máquinas.

Dedicatorias

Al Ing. Rafael Guerrero Cepeda, por habernos compartido sus conocimientos y por haber dirigido este trabajo de tesis.

Al Ing. Jorge Quintana Castañeda, amigo y compañero de la Maestría, por su confianza y su apoyo durante el tiempo que estudiamos juntos.

Al Ing, Juan Manuel Rojas Gómez, por haberme dado su apoyo para realizar una gran parte de las mediciones que figuran en esta tesis.

A todo el personal del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad, por haberme permitido el uso de los recursos del laboratorio para realizar muchas de las mediciones que figura en esta tesis..

Al Ing. Santiago Barcón, de Inelap, por haberme dado la oportunidad de colaborar con una empresa eléctrica de excelencia y por su confianza.

Quiero agradecer también a los integrantes del jurado:

Dr. Gerardo Espinoza Pérez. M.I. Rafael Cristerna Ocampo. Ing. Rafael Guerrero Cepeda. M.A. Santiago Barcón Palomar. M.I. Luis Cisneros Villalobos.

Por sus consejos, para mejorar la calidad de este trabajo de tesis.

Muchas gracias a todos.

Gonzalo Sandoval Rodríguez



Índice

	Índic	e de figuras	i
	Nome	enclatura	v
	Íntro	ducción	xi
1.	Volta	jes y corrientes con distorsión armónica	1
	1.1.	Introducción	1
	1.2.	Voltajes y corrientes con distorsión armónica	1
	1.3.	Secuencia de fases de las armónicas de corriente y voltaje	4
	1.4.	Comportamiento de las armónicas de corriente y voltaje en un	
		sistema eléctrico	6
	1.5.	Valor eficaz de una forma de onda distorsionada	11
	1.6.	Factor de cresta	13
	1.7.	Figuras de mérito que cuantifican distorsión armónica	15
		1.7.1. Distorsión armónica total respecto a la componente	
		fundamental	16
		1.7.2. Distorsión armónica total respecto al valor eficaz	17
		1.7.3. ¿Qué figura de mérito conviene utilizar?	18
2.	Dispo	sitivos generadores de distorsión armónica	20
	2.1.	Introducción	20
	2.2.	Elementos lineales y no lineales	. 20
	2.3.	Dispositivos ferromagnéticos	22
		2.3.1. Transformadores	22
		2.3.2. Motores de inducción	29
	2.4.	Convertidores electrónicos de potencia	30
		2.4.1. Rectificador monofásico de onda completa	31
		2.4.2. Rectificador trifásico de seis pulsos	34
		2.4.3. Rectificador trifásico de seis pulsos con un	
		transformador delta-estrella en la entrada	38
		2.4.4. Rectificador trifásico de doce pulsos	42
		2.4.5. Rectificadores trifásicos con un mayor número de	
		pulsos	44
	2.5.	Dispositivos a base de arco eléctrico	44
		2.5.1. Alumbrado fluorescente	44
		2.5.2. Alumbrado de vapor de mercurio	47
		2.5.3. Soldadoras eléctricas	47
		2.5.4. Hornos de arco	48
3.	Efecto	en los componentes del sistema eléctrico	50
	3.1.	Introducción	50
	3.2.	Esfuerzos térmicos sobre equipo en general	50
	3.3.	Efectos sobre conductores y líneas de transporte de energía	51
		3.3.1. Resistencia a la corriente alterna	51
		3.3.2. Reactancia inductiva	51
		3.3.3. Reactancia capacitiva	52

TESIS CON CONCEN

	3.3.4. Caídas de tensión no senoidales	52
	3.3.5. Suma de corrientes en el neutro	54
3.4.	Efectos sobre transformadores	
	3.4.1. Incremento del ruido	57
	3.4.2. Aumento en las pérdidas en el hierro	57
1.1.1	3.4.3. Aumento en las pérdidas en el cobre	58
3.5.	Efectos sobre las máquinas eléctricas rotatorias	60
3.6.	Efectos sobre equipo y dispositivos de protección	63
	3.6.1. Relevadores	63
	3.6.2. Fusibles	63
~ 7	3.0.3. Interruptores	64
3.7.	Electos sobre equipo electronico	67
	3.7.1. Cambios en los cruces por cero de la senal	07
	3.7.2. Cambio de la tension en el lado de corriente directa de	20
	un recunctador	70
70	5.7.5. Modificación del factor de cresta	70
5.0.	2.9.1 Environ and directly induction	70
	3.8.1. Equipos con disco de inducción	
	3.8.2. Equipos que miden en base al valor pico y al valor	71
20	Ffortes sobre la state finiere	71
3.9.	2.0.1 Eactor de paso de la interferencia teleférica	72
	3.9.1. Factor de peso de la interferencia telefonica	72
3 10	Fluctos sobre bancos de canacitores	73
3 11	Resonancia	75
5.11.	3 11 1 Resonancia en serie	77
•	3.11.2. Resonancia en paralelo	70
3 12	Efectos sobre el cálculo de la potencia eléctrica	84
52.	3.12.1. Potencia activa	84
	3 12.2. Potencia reactiva	85
	3.12.3. Potencia aparente	85
	3.12.4. Potencia de distorsión	86
	3.12.5. Factor de potencia total, de desplazamiento y de	
	distorsión	86
	3.12.6. Consideraciones adicionales sobre el cálculo de la	
	potencia bajo condiciones de distorsión armónica	87
Técn	icas para el control de las armónicas	88
4.1.	Introducción	88
4.2.	Norma IEEE Std 519-1992	88
	4.2.1. Limites de distorsión de corriente	88
	4.2.2. Límites de distorsión de voltaje	91
4.3.	Soluciones por medio de transformadores tipo K	91
4.4.	Soluciones por medio de filtros	98
	4.4.1. Tipos de filtros pasivos	98
	4.4.2. Filtro serie sintonizado en conexión en paralelo	99
	•	
		T'
	TESIS CON	1
		TING
		JEIN]

4.

		4.4.3.	Filtros activos	110
	4.5.	Otras	normas sobre los límites de distorsión armónica	110
		4.5.1.	Normas del IEC	111
1	1	4.5.2.	Norma CFE-L0000-45	
	Simul	ación d	e un caso de distorsión armónica	114
5	5.1.	Introd	ucción	114
	5.2.	Plante	amiento del problema	114
	5.3.	Cálcul	os previos a la simulación	115
		5.3.1.	Reactancia de Thevenin del alimentador	116
		5.3.2.	Cargas R-L agrupadas en el tablero BUS1	117
		5.3.3.	Cargas R agrupadas en el tablero BUS2	119
		5.3.4.	Parámetros eléctricos del transformador	120
	5.4.	Simula	aciones del sistema eléctrico	127
		5.4.1.	Primer caso. Evaluación de las figuras de mérito en el	
			punto de acoplamiento común y cálculo de los	
			requerimientos de potencia reactiva en el tablero 1	127
		5.4.2.	Segundo caso. Verificación de la corrección del factor	
			de potencia con la capacidad calculada para el banco	
			de capacitores y amplificación de corrientes armónicas	146
		5.4.3.	Tercer caso. Cálculo de los filtros para 5 ^e y 7 ^e	
	1.1		armónica sintonizados a 300 y 420 Hz respectivamente	
			y simulación del sistema eléctrico con los filtros	148
		5.4.4.	Cuarto caso. Cálculo de los filtros para 5 ^e y 7 ^e	
			armónica con el método propuesto en el capítulo	
			cuatro y simulación del sistema eléctrico con los filtros	158
		5.4.5.	Quinto caso. Simulación al agregar otros dispositivos	11 A.
		2	no lineales en el sistema eléctrico	171
	Conclu	usiones		176
	Refere	encias b	oibliográficas	178

TFSIS CON

GEN

5.

Índice de figuras

Para facilitar la consulta y localización de figuras, a continuación se presenta un índice de figuras donde se indica el número de la figura, su descripción y la página donde se ubica.

Figura	Descripción	ágina
. 1.1	Voltaje con distorsión armónica	3
1.2	Análisis de espectro del voltaje de la figura 1.1	3
1.3	Corriente con distorsión armónica	3
1.4	Análisis de espectro de la corriente de la figura 1.3	3
1.5	Representación de fuentes de corrientes armónicas	4
1.6	Representación de fuentes de corrientes armónicas como una fuente única	4
1.7	Fuentes de corrientes armónicas en un alimentador trifásico	5
1.8	Fuentes de corrientes armónicas en un sistema de tres fases y cuatro hilos	7
1.9	Corrientes de tercera armónica con secuencia de fases cero	7
1.10	Fuentes de corrientes armónicas en un sistema de tres fases y cuatro hilos	
	considerando la impedancia de los conductores	8
1.11	Voltaje distorsionado con factor de cresta menor a $\sqrt{2}$	14
1.12	Corriente distorsionada con factor de cresta superior a $\sqrt{2}$	14
1.13	Análisis de espectro de un voltaje con distorsión armónica referido en	
	porcentaje de la fundamental	19
1.14	Análisis de espectro de una corriente con distorsión armónica referido en	
	porcentaje de la fundamental	19
2.1	Curva de corriente contra voltaje en un elemento resistivo	20
2.2	Curva de corriente contra voltaje en un elemento resistivo - inductivo	20
2.3	Curva de corriente contra voltaje en un elemento no lineal	21
2.4	Forma de onda de la corriente que produce la curva de la figura 2.3	21
2.5	Curva de magnetización para acero laminado	22
2.6	Ciclo de histéresis para acero laminado	22
2.7	Curvas de flujo, ciclo de histéresis y corriente de excitación para un	47 - F 1 (1
	transformador con núcleo ferromagnético	23
2.8	Corriente de excitación de un transformador monofásico	24
2.9	Análisis de espectro de la corriente de la figura 2.8	24
2.10	Corriente de irrupción de un transformador monofásico	24
2.11	Corriente de excitación de un banco trifásico a base de unidades monofásicas,	
	en conexión estrella - estrella, con el neutro de la estrella del primario sin	
	conexión con el neutro de la fuente	26
2.12	Análisis de espectro de la corriente de la figura 2.11	26
2.13	Tensión inducida entre fases en el secundario de un banco trifásico a base de	
	unidades monofásicas, en conexión estrella - estrella, con el neutro de la	
	estrella del primario sin conexión con el neutro de la fuente	26
2.14	Tensión inducida de fase a neutro en el secundario de un banco trifásico a base	
	de unidades monofásicas, en conexión estrella - estrella, con el neutro de la	
	estrella del primario sin conexión con el neutro de la fuente	26

i



Indice de figuras an an go nghadaling a

	en e	
2.15	Corriente de excitación de un banco trifásico a base de unidades monofásicas,	
	en conexión estrella - estrella, con el neutro de la estrella del primario con	nn a se Gaelain
	conexión con el neutro de la fuente	27
2.16	Análisis de espectro de la corriente de la figura 2.15	27
2.17	Tensión inducida entre fases en el secundario de un banco trifásico a base de	
	unidades monofásicas, en conexión estrella - estrella, con el neutro de la	
	estrella del primario con conexión con el neutro de la fuente	27
2.18	Tensión inducida de fase a neutro en el secundario de un banco trifásico a base	
	de unidades monofásicas, en conexión estrella - estrella, con el neutro de la	
	estrella del primario con conexión con el neutro de la fuente	27
2.19	Corriente de irrupción de un banco trifásico a base de unidades monofásicas, en	
	conexión estrella - estrella, con el neutro de la estrella del primario sin	
	conexión con el neutro de la fuente	28
2.20	Corriente de irrupción de un banco trifásico a base de unidades monofásicas, en	
	conexión estrella - estrella, con el neutro de la estrella del primario con	
	conexión con el neutro de la fuente	28
2.21	Transformador de núcleo de cinco columnas	28
2.22	Transformador tipo acorazado	28
2.23	Comparación de las curvas de magnetización de un motor de inducción y un	199
	transformador	29
2.24	Corriente de excitación de un motor de inducción de 3 HP	30
2.25	Análisis de espectro de la corriente de la figura 2.24	30
2.26	Rectificador monofásico, tipo puente, de onda completa con carga inductiva	31
2.27	Formas de onda de la corriente en los lados de directa y alterna del rectificador	
	monofásico, tipo puente, de onda completa con carga inductiva	31
2.28	Rectificador trifásico de seis pulsos con carga inductiva	34
2.29	Forma de onda de la corriente de la fase A en la entrada de un rectificador	34
	trifásico de seis pulsos con carga inductiva	
2.30	Rectificador trifásico de seis pulsos con carga inductiva y transformador de	
	entrada con conexión delta - estrella	38
2.31	Corriente en la delta y su alimentador, de un rectificador trifásico de seis pulsos	
	con carga inductiva y transformador de entrada con conexión delta - estrella	41
2.32	Corriente en la delta de un rectificador trifásico de seis pulsos con	
	transformador de entrada en conexión delta - estrella	42
2.33	Análisis de espectro de la corriente de la figura 2.32	42
2.34	Rectificador trifásico de doce pulsos	43
2.35	Forma de onda de la corriente de un rectificador trifásico de doce pulsos	44
2.36	Corriente de una balastra electromagnética con dos lámparas fluorescentes de	
	39 W	45
2.37	Análisis de espectro de la corriente de la figura 2.36	45
2.38	Corriente de una balastra electrónica con dos lámparas fluorescentes de 32 W	46
2.39	Análisis de espectro de la corriente de la figura 2.38	46
2.40	Corriente de un circuito con lámparas de vapor de mercurio	47
2.41	Análisis de espectro de la corriente de la figura 2.40	47
2.42	Corriente de una soldadora eléctrica	48
2.43	Análisis de espectro de la corriente de la figura 2.42	48
2.44	Corriente en un horno de arco	49
		T
	H TREAS AND	r I

Indice de figuras

<u>.....</u>N

<u>t.</u> 3 .

	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
2.45	Análisis de espectro de la corriente de la figura 2.44	49
2.46	Corriente en un horno de arco	49
2.47	Análisis de espectro de la corriente de la figura 2.46	49
3.1	Voltaje en un tablero de distribución de baja tensión	52
3.2	Análisis de espectro del voltaje de la figura 3.1	52
3.3	Corriente del alimentador que va del tablero de distribución hacia un centro de	53
	carga de baja tensión	
3.4	Análisis de espectro de la corriente de la figura 3.3	53
3.5	Tensión en el extremo final del alimentador (barras del centro de carga)	53
3.6	Análisis de espectro de la tensión de la figura 3.5	53
3.7	Corriente de la fase A del alimentador de un tablero de distribución en un	
	edificio de oficinas	55
3.8	Corriente de la fase B del alimentador de un tablero de distribución en un	\$4. Š.
	edificio de oficinas	55
3.9	Corriente de la fase C del alimentador de un tablero de distribución en un	
	edificio de oficinas	55
3.10	Corriente del neutro del alimentador de un tablero de distribución en un	
	edificio de oficinas	55
3.11	Análisis de espectro de la corriente de la figura 3.7	56
3.12	Análisis de espectro de la corriente de la figura 3.8	56
3.13	Análisis de espectro de la corriente de la figura 3.9	56
3.14	Análisis de espectro de la corriente de la figura 3.10	56
3.15	Flujo de dispersión que enlaza a los devanados de un transformador y origina	
	corrientes parásitas en las espiras	- 58
3.16	Corriente en un interruptor termomagnético de 30 A (#1)	65
3.17	Temperatura en el interruptor termomagnético (#1)	65
3.18	Corriente en un interruptor termomagnético de 30 A (#2)	66
3.19	Temperatura en el interruptor termomagnético (#2)	66
3.20	Análisis de espectro de la corriente de la figura 3.16	66
3.21	Análisis de espectro de la corriente de la figura 3.18	66
3.22	Forma de onda de voltaje que muestra la ocurrencia de varios cruces por cero	ele ker
	en un ciclo	67
3.23	Análisis de espectro del voltaje de la figura 3.22	68
3.24	Circuito a base de un transformador y banco de capacitores conectado en el	
	secundario	73
3.25	Curva de vida de un capacitor en función de la temperatura	75
3.26	Curva de cambio de la capacitancia en función de la temperatura	75
3.27	Curva de vida de un capacitor en función del voltaje aplicado	76
3.28	Sistema eléctrico con resonancia en serie	78
3.29	Curva de impedancia de un circuito resonante en serie	78
3.30	Sistema cléctrico con resonancia en paralelo	79
3.31	Curva de impedancia de un circuito resonante en paralelo	81
4.1	Transformador con conexión delta - estrella con dispositivos no lineales en el lado secundario	94
4.2	Transformador con conexión delta - estrella con dispositivos no lineales en el	
	lado secundario, donde se indican tres puntos de medición de corriente	97
4.3	Corriente en el lado en estrella del transformador de la figura 4.2	97
		1

iii

4.

Indice de figuras

4.4	Análisis de espectro de la corriente de la figura 4.3	97
4.5	Corriente en el lado en delta del transformador de la figura 4.2	97
4.6	Análisis de espectro de la corriente de la figura 4.5	97
4.7	Corriente en alimentador de la delta del transformador de la figura 4.2	. 98
4.8	Análisis de espectro de la corriente de la figura 4.7	98
4.9	Tipos distintos de filtros pasivos	. 99
4.10	Triángulo de potencias antes y después de corregir el factor de potencia	101
4.11	Sistema eléctrico con filtro pasivo serie sintonizado con conexión en derivación	103
4.12	Curva de respuesta en frecuencia de la corriente en un filtro pasivo sintonizado	
	a la frecuencia de la componente armónica que se desea filtrar	106
4.13	Comparación de las curvas de respuesta en frecuencia de la corriente en un	
	filtro pasivo sintonizado a la frecuencia de la componente armónica que se	
	desea filtrar y sintonizado a una frecuencia ligeramente menor a la de la	
	armónica que se desea filtrar	106
5.1	Sistema eléctrico para simulación	114
5.2	Rectificador trifásico de seis pulsos utilizado para la simulación	115
5.3	Curva de saturación en vacío del transformador de 750 kVA utilizado para la	
	simulación	126
5.4	Forma de onda de la corriente de la fase A en el punto de acoplamiento común	138
5.5	Forma de onda del voltaje entre las fases A y B en el punto de acoplamiento	
	común	140
5.6	Formas de onda del voltaje entre las fases A y B y la corriente de la fase A en	
	las barras del tablero BUS1A	142
5.7	Formas de onda del voltaje entre las fases A y B y la corriente de la fase A en	147
	las barras del tablero BUSIA después de corregir el factor de potencia	
5.8	Formas de onda del voltaje entre las fases A y B y la corriente de la fase A en	an Alberto
	las barras del tablero BUS1A con los filtros de 5 ^ª y 7 ^ª armónica sintonizados a	
	300 y 420 Hz respectivamente	152
5.9	Formas de onda del voltaje entre las fases A y B y la corriente de la fase A en	
	las barras del tablero BUSIA con los filtros de 5ª y 7ª armónica sintonizados a	
	276 y 376 Hz respectivamente	167
5.10	Forma de onda de la corriente de la fase A en el punto de acoplamiento común	
	con los filtros de 5 ^ª y 7 ^ª armónica sintonizados a 276 y 376 Hz respectivamente	169
	그는 것 같은 것 같	

TERC CON 17 December 19 DECEN

iv

A continuación se presenta la lista de variables y símbolos utilizados en el desarrollo de este trabajo.

VARIABLE O SÍMBOLO	SIGNIFICADO
φı	Ángulo entre la potencia activa y la potencia reactiva antes de corregir el factor de potencia
φ ₂	Ángulo entre la potencia activa y la potencia reactiva después de corregir el factor de potencia
φ _n φ(ι)	Ángulo de fase de la enésima componente armónica de la corriente Flujo magnético instantáneo
φ _n	Ángulo de fase de la enésima componente armónica del voltaje
θ _i	Ángulo de fase de la componente fundamental de la corriente
θ _n θ _v	Ängulo de fase de la componente fundamental del voltaje
0 _Ζ ω	Angulo de la impedancia Z Frecuencia angular
(tan(δ)) _n a	Pérdidas dieléctricas de un dispositivo Relación de proporción entre la corriente de excitación de un transformador y su
	corriente en el primario Relación de proporción entre las corrientes armónicas y la fundamental
· ·	Relación de proporción entre las corrientes $I_n e I_{max}$ del filtro pasivo sintonizado Relación de transformación de un transformador
A-V/m a ₀	Amperes-vuelta/metro, unidades de la excitación magnética Valor promedio o componente de corriente directa de la serie de Fourier
АЛ	Enfriamiento de un transformador a base de aire (Air) para el conjunto activo y el tanque; los transformadores con este sistema de enfriamiento son denominados de tipo seco
a _n ATP	Amplitud del coeficiente cosenoidal de enésimo orden de la serie de Fourier Programa de simulación de transitorios electromagnéticos
В	Densidad de flujo magnético
BIL	Nivel básico de impulso (Basic Impulse Level)
B _m	Densidad máxima de flujo magnético
b b	Amplitud del coeficiente senoidal de enésimo orden de la serie de Fourier
$B_{\pi}(t)$	Densidad de fluio total de la enésima armónica en una máquina rotatoria
C	Capacitancia
CDF	Factor de distorsión de la corriente (Current Distortion Factor), es igual a THD
CF	Factor de cresta obtenido por el software FlukeView
d	Diámetro de un conductor

v

r(1)

and the second	
D	Potencia de distorsión
	Factor de disminución de capacidad de un transformador sometido a corriente con
	distorsión armónica
DC	Componente de corriente directa obtenida por el software FlukeView
DF	Factor de distorsión (Distortion Factor), para la corriente es CDF, para el voltaje es
	VDF
DN .	Diodo en un puente rectificador, N identifica el número asignado al diodo
\mathbf{f}_{1}	Frecuencia
f(t)	Función que depende del tiempo
fe	Factor de cresta de una señal periódica
tp	Factor de potencia total
IP ₁	Factor de potencia antes de hacer la corrección con el banco de capacitores
. 1p ₂	Factor de potencia después de nacer la corrección con el banco de capacitores
1 Pdesp	Factor de potencia de distorsión
¹ Pdist Fund	Frequencia de la componente fundamental obtenida por el software ElukeView
H	Excitación magnética
HVDC	Corriente directa de alto voltaie (High Voltage Direct Current)
I.	Valor de la corriente
i(t)	Corriente instantánea
l _o	Corriente de excitación de un transformador
1_1	Corriente nominal del primario de un transformador
i,	Corriente instantánea de la fase A del alimentador del lado de alta de un
	transformador (lado de alta en delta)
ia	Corriente instantánea en la fase A del lado de baja de un transformador (lado de
	baja en estrella)
i _{AB}	Corriente instantánea entre las fases A y B del lado de alta de un transformador
	(lado de alta en delta)
Ah	Fuente de corrientes armónicas en la lase A
113	Corriente instantanea de la lase B del alimentador del lado de alta de un
;	Corriente instantánes en la fase B del lado de baia de un transformador (lado de
'b	baja en estrella)
l	Corriente base
inc	Corriente instantánea entre las fases B v C del lado de alta de un transformador
-nc	(lado de alta en deita)
Lan	Fuente de corrientes armónicas en la fase B
i _c	Corriente instantánea de la fase C del alimentador del lado de alta de un
	transformador (lado de alta en delta)
	Corriente instantánea en el lado de directa de un rectificador
i _c	Corriente instantánea en la fase C del lado de baja de un transformador (lado de
	baja en estrella)
I _{CA}	Corriente instantánea entre las fases C y A del lado de alta de un transformador
	(lado de alta en delta)
lcc	Corriente de cortocircuito
CC-pu	Corriente de cortocirculot en por unidad
1 _{Ch}	ruente de corrientes armonicas en la fase C

107 CON ONCEN 12

1	Valor eficar de la enérima componente armónica de la corriente en un capacitor
'Cn I	Componente de pérdidos en el fierro de la corriente de excitación de un
*Fe	componente de perduas en el nerio de la contente de contación de un
a provinción de la companya de la co	Componente de pérdides en el fierro de la corriente de excitación de un
¹ Fe•D	transformadar que circula sobre la delta del primario
: (1)	Corriente instantéene de conde na cui d'un activitéene de la cui d
Fally	Componente arménica de la carriente
41	Componente armonea de la corriente
4h	Continue de corrientes armonicas
IL.	Corriente de carga
IL.	Corriente instantanea en el circuito anmentador de corriente anerna de un
	recurrendor
max	valor maximo de corriente a traves del filtro pasivo sintonizado
N	Corriente eficaz en el conductor neutro de un sistema de tres fases cuatro nilos
1 _N	Corriente instantanca en el neutro
1 _n	valor effeaz de la enesima componente armonica de la corriente
In(pu)	Valor en por unidad de la enesima corriente armónica
Ip	Valor máximo instantanco o de pico de la corriente
Irms	Valor eficaz de la corriente
Isc	Corriente máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común
IT	Interferencia telefónica expresada mediante el valor eficaz del producto del factor
	de peso W_n del TIF y del valor eficaz de la enésima componente armónica de la
	corriente
I _{Tn}	Valor eficaz de la enésima componente armónica de la corriente en un
	transformador
ĸ	Factor K
k	Número entero (k = 1, 2, 3, 4,) que permite calcular las armónicas características
	en rectificadores
	Factor que agrupa el producto de $k_1 y k_2$
K- <i>N</i>	Factor K disponible en transformadores comerciales, N indica el número del factor
	K, los valores de N son: 4, 9, 13, 20, 30, 40 y 50
k _i	Constante para evaluar las pérdidas por histéresis y que depende de la geometría del
	material ferromagnético
k ₂	Constante para evaluar las pérdidas por corrientes parásitas y que depende del
	ancho de las laminaciones del material ferromagnético
k,	Constante que agrupa el número de vueltas de un devanado, la longitud del circuito
	magnético y la permeabilidad magnética
Kfact	Factor K obtenido por el software FlukeView
kV	Kilo Volts
kVA	Kilo Volts Amperes
L	Inductancia
1	Longitud del circuito magnético
L	Inductancia de la reactancia de dispersión del primario de un transformador
L'	Inductancia de la reactancia de dispersión del secundario de un transformador
2 m	Orden de las componentes armónicas de la serie de Fourier, se utiliza para expresar
	armónicas de orden diferente de "n"
MSNM	Metros sobre el nivel del mar
MVA	Mena Volte Amperes
141 V / L	Mega + one Ampered

TELES CON FALLA DE ORIGEN

a she gar ƙw	en e
MVAca	Mega Volts Amperes de cortocircuito
N	Número de muestras de una señal periódica en un ciclo
	Número de espiras o vueltas en un devanado
n	Orden de las componentes armónicas de la serie de Fourier
N.	Número de vueltas en el devanado primario de un transformador
N-	Número de vueltas en el devanado secundario de un transformador
ne	Orden de la armónica que se desea filtrar con un filtro pasivo sintonizado
n	Armónica de resonancia
The states	Orden de sintonía del filtro pasivo sintonizado
	Enfriamiento de un transformador a base de aceite (Oil) para el conjunto activo y
	aire para el tanque (Air)
р	Potencia activa
n	Porcentaie de desviación del orden de sintonía de un filtro pasivo con respecto a la
	armónica que se requiere filtrar
n(t)	Potencia instantánea
P	Potencia base
P.	Pérdidas en cl cobre
PCC	Punto de acontamiento común (Point of Common Coupling)
Р.	Pérdidas dieléctricas de un dispositivo
P	Pérdidas por corrientes parásitas o de eddy
P	Pérdidas por corrientes parásitas o de eddy a frecuencia fundamental
Peak	Valor pico obtenido por el software FlukeView
Pala	Pérdidas eléctricas en los devanados de un transformador
P_	Pérdidas por corrientes parásitas o de eddy a la enésima armónica
с. Р.,	Pérdidas totales por corrientes parásitas o de eddy, se obtienen de sumar las
1997 - 1 997 - 1997 -	pérdidas a frecuencia fundamental con la suma de las pérdidas a las componentes
	armónicas
Ph	Pérdidas por histéresis
Pmm	Pérdidas magnéticas de un transformador
P.	Valor de la curva "C-message" en la enésima armónica para el cálculo de W.
Ö	Potencia reactiva
	Factor de calidad del reactor
Q ₁	Potencia reactiva en un sistema eléctrico antes de corregir el factor de potencia
Q,	Potencia reactiva en un sistema eléctrico después de corregir el factor de potencia
Qc	Potencia reactiva aportada por un banco de capacitores para corregir el factor de
	potencia
Q _{C nom}	Potencia reactiva nominal (o de diseño) de un banco de capacitores
QC oper	Potencia reactiva de operación de un banco de capacitores
Q _{can}	Potencia del banco de capacitores
Q	Potencia reactiva del reactor del filtro pasivo sintonizado
R	Resistencia
R ₁	Resistencia del devanado primario de un transformador
R _{1-D}	Resistencia del devanado primario de un transformador con conexión en delta
R ₂	Resistencia del devanado secundario de un transformador
R _{CD}	Resistencia de un conductor a la corriente directa
Regi	Resistencia equivalente de las pérdidas eléctricas referida al lado primario
	r i i i i i i i i i i i i i i i i i i i

viii



R _{Fe}	Resistencia que representa a las pérdidas en el fierro en el núcleo de un transformador				
RMS	Valor eficaz obtenido por el software FlukeView				
R.	Resistencia de un conductor a la enésima armónica				
R _T	Resistencia de los devanados de un transformador				
S	Potencia aparente				
S.	Potencia aparente para las componentes fundamentales del voltaje y la corriente				
	Potencia aparente en un sistema eléctrico antes de corregir el factor de potencia				
S1	Potencia aparente en un sistema eléctrico después de corregir el factor de potencia				
Sec	Potencia de cortocircuito				
Sccore	Potencia de cortocircuito en por unidad				
SCR	Rectificador controlado de silicio				
SN	Potencia aparente nominal de un transformador				
T	Periodo de una señal				
	Tesla, unidad de la densidad de fluio magnético				
t	Tiempo				
t.	Tiempo de diferencia entre el cruce por cero del voltaje y de la corriente				
TDD	Distorsión total de la demanda (Total Demand Distortion)				
THD	Distorsión armónica total del voltaie (Total Harmonic Distortion) con respecto a la				
	componente fundamental nominal en el estándar IEEE 519-1992				
THDe	Distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion) con respecto a la				
	componente fundamental obtenida por el software FlukeView				
THD	Distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion) de la corriente con respecto				
•	a la componente fundamental				
THD _{trms}	Distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion) de la corriente con respecto				
	al valor eficaz de la corriente				
THD,	Distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion) con respecto al valor eficaz				
	obtenida por el software FlukeView				
THD _V	Distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion) del voltaje con respecto a la				
	componente fundamental				
THD _{Vrms}	Distorsión armónica total (Total Harmonic Distortion) del voltaje con respecto al				
	valor eficaz del voltaje				
TIF	Factor de interferencia telefónica (Telephone Influence Factor)				
TRUE RMS	Valor eficaz verdadero				
u	Variable auxiliar para resolver integrales por el método de cambio de variable				
UPS	Sistema de energia ininterrumpible (Uninterruptible Power System)				
v	Exponente de Steinmetz para el cálculo de las pérdidas por histéresis en un material				
	ferromagnético, sus valores son $1.5 \le v \le 2.5$				
v(t)	Voltaje instantáneo				
V2	Voltaje en el secundario de un transformador				
V _A	Fuente de voltaje en la fase A				
V _B	Fuente de voltaje en la fase B				
Vbase	Voltaje base				
v _c	Fuente de voltaje en la fase C				
V _{Cn}	Voltaje en el banco de capacitores en la enésima armónica				
V _{DC}	Voltaje de corriente directa				
VFD	Factor de distorsión del voltaje (Voltage Factor Distortion), es igual a THDv				
	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·				

TAMÉS CON Fallet de Crigen

Vra	Voltaie de la fuente en la enésima armónica
Vu	Componente armónica del voltaje
V	Voltaje del reactor del filtro pasivo sintonizado
V	Voltaje entre líneas
VIN	Voltaje de línea a neutro
V	Valor máximo instantáneo o de pico del voltaje
V.	Valor eficaz de la enésima componente armónica del voltaje
V	Voltaie nominal (o de diseño) de un banco de capacitores
V	Voltaje de operación de un banco de capacitores
V	Valor pico o máximo instantáneo del voltaje
V	Valor promodio del voltaje
V	Voltaje reducido aplicado en el lado primario de un transformador en la prueba de
· real	contocircuito
v	Valor eficaz del voltaje
Value	Voltaie de Thevenin en por unidad
W	Factor de neso del TIE a la enésima armónica
Xe	Reactancia canacitiva
Xa	Reactancia capacitiva a frecuencia fundamental
Xe	Reactancia capacitiva a la enésima componente armónica
X	Reactancia de dispersión del lado primario de un transformador
Xun	Reactancia de dispersión del lado primario de un transformador para conexión en
	delta
Xa	Reactancia de dispersión total de un transformador vista desde el lado secundario
	Reactancia de dispersión del lado secundario de un transformador
Xeal	Reactancia de dispersión equivalente de un transformador referida al lado primario
X	Reactancia inductiva
\mathbf{x}_{LI}	Reactancia inductiva a frecuencia fundamental
XLn	Reactancia inductiva a la enésima componente armónica
\mathbf{x}_{T}	Reactancia inductiva de un transformador
XTI	Reactancia inductiva de un transformador a frecuencia fundamental
X_{Th}	Reactancia de Thevenin
X _{Thbase}	Reactancia base de Thevenin
X _{Thpu}	Reactancia de Thevenin en por unidad
Z	Impedancia
Z_1	Impedancia en ohms de un transformador, referida al lado primario
Zbl	Impedancia base de un transformador referida al lado primario
Zn	Impedancia del filtro pasivo sintonizado a la armónica enésima
Zpu	Impedancia en por unidad
Żs	Impedancia del sistema eléctrico

х

Introducción

Contexto

Los problemas relacionados con las componentes armónicas en los sistemas eléctricos son más antiguos de lo que se imagina. En 1893 se reportaron los primeros problemas de calentamiento de motores en Hartford, Connecticut, mientras que en forma simultánea Charles P. Steinmetz se dedicaba a resolver problemas relacionados con las componentes armónicas, propuso el uso del transformador con conexión delta - estrella como medio para evitar la propagación de las terceras armónicas de la corriente. Para 1896 se reportaron los primeros problemas de resonancia en líneas de transmisión en Portland, Oregon, mientras que en el mismo año General Electric y Westinghouse Co. describieron que el generador de tipo AT estaba limitado a líneas de transmisión de determinadas longitudes a causa de deformaciones en la forma de onda.

Entre 1884 y 1900 el American Institute of Electrical Engineers (AIEE) ya había publicado siete documentos en referencia a las componentes armónicas. De 1901 a 1910, el número de documentos publicados sobre el tema subió a doce, mientras que en el periodo de 1911 hasta 1921 no se publicaron documentos adicionales. En las décadas de 1920 y 1930 el tema volvió a cobrar importancia, ya que los operadores de los sistemas suministradores de energía empezaron a observar problemas relacionados con las distorsiones de los voltajes y las corrientes.

De 1922 a 1938 existían trece documentos publicados referentes al tema, mientras que entre 1950 y 1959 el número de publicaciones subió a dicciocho. A partir de 1960 se inició la instalación de un gran número de bancos de capacitores en sistemas eléctricos industriales sin prestar atención al problema de resonancia por armónicas.

El uso actual de los dispositivos electrónicos para conversión de potencia eléctrica, ha contribuido a incrementar la cantidad de componentes armónicas en los sistemas eléctricos siendo aún más notables sus efectos. Los bancos de capacitores, como medio de corrección de factor de potencia, amplifican las componentes armónicas de corriente del sistema eléctrico y generan problemas de resonancia.

Actualmente existen diversas técnicas para la mitigación de armónicas en los sistemas eléctricos. Uno de los dispositivos de mayor uso es el filtro serie pasivo sintonizado con conexión en derivación, porque además de disminuir el contenido de la armónica de sintonía en el sistema eléctrico, corrige el factor de potencia del dispositivo no lineal. Este tipo de filtro se basa en un circuito resonante en serie, cuya frecuencia de resonancia coincide con la frecuencia de la componente armónica que se desea filtrar.

Justificación

En la literatura disponible sobre componentes armónicas existen publicaciones con distintos objetivos y alcances; por una parte existen publicaciones como "Harmonics. A field handbook for the professional and the novice" de Mark Waller y "Practical guide to power factor correction and harmonics ... and your electrical bill" de John Paschal que, sin perder rigor y veracidad, han sido

desarrolladas para aquellos profesionales que buscan soluciones prácticas a los problemas provocados por las armónicas, y que no desean profundizar en los fundamentos matemáticos.

Por otra parte existen otras publicaciones como "Power system harmonic analysis" y "Power system harmonics" de J. Arrillaga, que por una parte requieren que el lector tenga conocimientos y antecedentes teóricos sólidos y, por otra parte, su enfoque no va dirigido a la solución de problemas de tipo práctico sino al desarrollo de herramientas de cómputo, para resolver problemas en sistemas de transmisión y distribución.

"Power systems harmonics. Fundamentals, analysis and filter design" de George J. Wakileh es una publicación en donde se trata la teoría con los fundamentos matemáticos necesarios, hace un uso intensivo del software gnuplot para la obtención de una gran variedad de gráficas, y contiene una sección donde explica a detalle cómo realizar estudios de componentes armónicas en redes eléctricas.

En publicaciones no especializadas en las componentes armónicas se abordan ciertos tópicos relacionados con el tema, tal es el caso de "*Transformadores de potencia, de medida y de protección*" de Enrique Ras o de "*Máquinas eléctricas*" de Stephen J. Chapman, los cuales son abordados en ocasiones en forma somera por las publicaciones especializadas, llegando incluso a ser pasados de largo en algunos casos.

En las publicaciones especializadas sobre componentes armónicas es común encontrar que las figuras de mérito suelen definirse desde un punto de vista matemático; no es raro ver definiciones como: "*factor de cresta: es la relación del valor de pico al valor eficaz de una forma de onda periódica*". Desafortunadamente, en muchas de las referencias utilizadas se da por hecho que éste es un término de uso frecuente en la literatura de armónicas, y no van más allá de esta definición, ni abundan más sobre su aplicación o la utilidad de conocer este valor.

Dentro de las referencias utilizadas, y publicadas, la única que aborda el tema del filtrado armónico con cierta profundidad es "Power systems harmonics. Fundamentals, analysis and filter design". En esta referencia se establecen las ecuaciones fundamentales para sintonizar el filtro pasivo serie con conexión en derivación, y establecer las especificaciones del filtro. "Armónicos en sistemas eléctricos industriales. Curso tutorial" del Dr. Armando Llamas trata con profundidad el tema del filtrado armónico, sin embargo estos magníficos apuntes no están publicados por ser de la Maestría en Energética del ITESM.

Cuando se especifica un filtro pasivo serie con conexión en derivación, siempre se hace considerando una desviación que va del 3 al 10% por debajo de la frecuencia de sintonía del filtro, para evitar que la corriente de la armónica de sintonía alcance valores muy elevados en el filtro y se generen sobretensiones. Desafortunadamente, "*Power systems harmonics. Fundamentals, analysis and filter design*", aborda el tema sobre la base de sintonizar los filtros pasivos exactamente a la frecuencia de la armónica que se desea eliminar, lo cual no se lleva a cabo en la práctica.

En la gran mayoría de las publicaciones especializadas las gráficas que ejemplifican las formas de onda distorsionadas son teóricas o bien simuladas, aunque publicaciones como "*Harmonics*. A field handbook for the professional and the novice" constituyen una verdadera excepción.

Formulación del problema

La especificación de filtros pasivos serie con conexión en derivación es un tema que no se aborda en las publicaciones especializadas, salvo en "Power systems harmonics. Fundamentals, analysis and filter design" con el inconveniente mencionado previamente. Esta bibliografía trata este tema desde un punto de vista teórico, ya que proporciona ejemplos de cómo especificar el filtro, gráficas de la impedancia vs. la frecuencia del filtro y del sistema mediante gnuplot, pero no aborda el uso de simuladores para comprobar la efectividad de los filtros especificados.

La especificación de un filtro pasivo, con miras a limitar la distorsión armónica a valores inferiores a los límites establecidos en las normas, requiere de considerar ciertos aspectos en la especificación, como evitar la generación de sobretensiones en los capacitores utilizando celdas capacitivas de mayor nivel de tensión, el porcentaje de desviación de la frecuencia de sintonía del filtro, si el filtro debe ser sintonizado o desintonizado.

La evaluación de la efectividad del filtro, como medio de mitigación de componentes armónicas, mediante el uso de las simulaciones se ha constituido en una herramienta de gran utilidad para el diseño y especificación final del filtro, ya que se puede ver por anticipado si el filtro operará de acuerdo a como fue concebido.

Contribuciones

La problemática asociada a la definición de las figuras de mérito fue abordada desde el punto de vista de la interpretación física, sin descuidar el aspecto matemático. Se establecieron definiciones desde el punto de vista del fenómeno físico de las figuras de mérito.

Debido a que el factor de cresta es la figura de mérito que menos atención ha recibido en las publicaciones especializadas consultadas, para el desarrollo de este trabajo, a ésta se le ha dado un mayor peso. Esta figura es tratada en dos capítulos; en el primero, donde se le define y se proporciona su significado físico con apoyo en mediciones de dispositivos reales, mientras que en el tercer capítulo se presentan los efectos de tener voltajes con bajo factor de cresta, así como de tener corrientes con factor de cresta muy elevado. Una conclusión interesante sobre esta figura es que es un indicador cualitativo de la presencia de distorsión armónica.

Para abordar los temas con la mayor realidad posible se presentan mediciones de dispositivos y circuitos operando bajo condiciones de distorsión. Aunque estas mediciones no son novedad en lo referente a los convertidores estáticos de potencia, no se encuentran făcilmente en publicaciones, especialmente las mediciones de los dispositivos ferromagnéticos y los dispositivos de arco eléctrico. En estas mediciones, se ve que el contenido armónico de la corriente de excitación de un transformador cambia, según el tipo de conexión de los devanados y de construcción del núcleo.

La especificación del filtro pasivo serie con conexión en paralelo, se aborda desde el punto de vista de la sintonización del dispositivo, a una frecuencia ligeramente distinta de la armónica que se desa filtrar. Este tema se ha abordado mediante la presentación de un método, basado en la curva de respuesta en frecuencia de un circuito serie RLC resonante, para calcular la frecuencia de sintonía del filtro y limitar en forma natural la corriente y las sobretensiones en el filtro.



xiii

Para valorar la efectividad del método presentado para mantener la corriente dentro del valor deseado, se recurrió a una simulación en ATP, en donde se presenta la forma de evaluar los límites de distorsión armónica en el punto de acoplamiento común, en base a las recomendaciones del Std. 519 - 1992 del IEEE.

Se presenta una simulación con los filtros sintonizados exactamente a la frecuencia de las armónicas que se desean filtrar, y otra simulación con los filtros sintonizados mediante el método propuesto, comparándose los resultados obtenidos en ambas simulaciones, y verificando si se cumple el objetivo del método propuesto. Se evaluaron los niveles de tensión y de corriente en los filtros, así como la disminución de la distorsión armónica en el punto de acoplamiento común del sistema simulado.

Organización de la tesis

El primer capítulo describe los antecedentes teóricos necesarios para emprender el estudio de las componentes armónicas. Se presenta la serie trigonométrica de Fourier aplicada a voltajes y corrientes con distorsión armónica y se analiza su comportamiento en el sistema en base a la teoría de circuitos. Se describe el cálculo del valor eficaz para voltajes y corrientes con distorsión armónica y se presentan las figuras de mérito básicas para el cálculo de la distorsión armónica.

En el segundo capítulo se presentan los principales dispositivos generadores de distorsión armónica. Estos dispositivos se elasifican en base a su operación como ferromagnéticos, convertidores estáticos de energía y a base de arco eléctrico. Se incluyen gráficas tomadas en dispositivos físicos en operación. Los análisis teóricos y de espectro permiten ver las armónicas características para cada dispositivo.

En el tercer capítulo se analizan los efectos de las componentes armónicas sobre los elementos que forman parte del sistema eléctrico. El análisis se efectúa acompañado de figuras de mérito que permiten evaluar el comportamiento o los efectos de las armónicas sobre los elementos que forman parte del sistema eléctrico. Se presentan ecuaciones para calcular el incremento del voltaje en un sistema eléctrico con compensación central de potencia reactiva, así como para calcular la corriente en el transformador y el banco de capacitores para cualquier componente armónica.

El cuarto capítulo presenta algunos de los métodos para mitigación de las armónicas en un sistema eléctrico. Primero se presentan los valores límites de distorsión en voltaje y en corriente que establece el Std. IEEE 519 - 1992 en el punto de acoplamiento común, al final del capítulo se presentan brevemente los estándares IEC y CFE L0000-45. Se analiza el uso de transformadores delta - estrella como medio de mitigación de las armónicas triples y se presenta la metodología para especificación de filtros pasivos sintonizados mediante un método basado en la curva de resonancia del filtro.

En el capítulo quinto se presenta una simulación en ATP de un sistema eléctrico con dispositivos no lineales en donde se evalúan las figuras de mérito en el punto de acoplamiento común (PCC) antes y después de realizar el filtrado armónico. Este capítulo también incluye todos los cálculos necesarios que se realizaron para simular el sistema eléctrico en el ATP, desde los dispositivos lineales hasta el transformador principal del sistema.



Mediciones y pruebas realizadas en dispositivos y sistemas eléctricos

Las mediciones fueron realizadas con dos medidores fabricados por Fluke Corporation. Las mediciones preliminares se efectuaron con un medidor de potencia Fluke 39, con capacidad de hacer análisis de espectro en tiempo real. La captura de formas de onda de voltajes y de corrientes que figuran en la tesis fueron realizadas con un osciloscopio digital Fluke 105B Series II y sus análisis de espectro fueron realizados mediante el software FlukeView incluido con el instrumento.

Las pruebas realizadas a transformadores y motores de inducción para determinar sus armónicas características fueron realizadas en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Las mediciones de las componentes armónicas en lámparas fluorescentes y de vapor de mercurio, así como las mediciones del capítulo tres (efectos de las armónicas), fueron realizadas en distintas áreas de TV Azteca, durante mi estancia en la empresa como Supervisor de Mantenimiento Eléctrico. Las mediciones del horno de arco fueron tomadas en Aceros Corsa durante el faseo realizado, en colaboración con COINEL, a los transformadores de la subestación eléctrica de la empresa. Las mediciones de las armónicas del transformador delta - estrella se obtuvieron en la CNBV, durante el estudio del sistema eléctrico que INELAP le realizó a la Comisión.

× 1

1. Voltajes y corrientes con distorsión armónica

1.1 Introducción

El voltaje y la corriente en un sistema eléctrico generalmente son funciones periódicas. La teoría de circuitos proporciona herramientas para analizar la respuesta de un sistema eléctrico cuando es excitado con una función senoidal, sin embargo estas herramientas dejan de ser aplicables cuando los voltajes o las corrientes no tienen forma de onda senoidal.

Para analizar el comportamiento de un sistema eléctrico cuando el voltaje o la corriente no son senoidales se utiliza el análisis de Fourier, el cual permite descomponer una forma de onda no senoidal (o distorsionada) en una componente constante más una serie de componentes senoidales o cosenoidales, relacionadas armónicamente con la frecuencia de la señal original. Mediante la teoría de circuitos se puede analizar la respuesta del sistema eléctrico a las componentes armónicas, del voltaje y de la corriente.

Las componentes armónicas de una forma de onda distorsionada constituyen el espectro de dicha señal. No todas las componentes armónicas aparecen en el espectro, esto depende de la simetría de la función distorsionada y no todas las componentes se comportan del mismo modo en el sistema eléctrico. Conociendo el contenido espectral de un voltaje o una corriente con distorsión se puede calcular el valor eficaz, el factor de cresta, el contenido armónico y los índices de distorsión, éstos últimos conocidos como figuras de mérito, con el propósito de evaluar el impacto provocado por la distorsión sobre la forma de onda.

1.2 Voltajes y corrientes con distorsión armónica

Una función f(t) se considera periódica si satisface la siguiente condición [1]:

$$f(t) = f(t+T), \text{ para toda } -\infty < t < \infty$$
(1.1)

en donde: T es el periodo de la función f(t).

El periodo se puede expresar en función de la frecuencia de la función mediante la siguiente relación:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega}$$
(1.2)

en donde:

f es la frecuencia de f(t) en Hz y

 ω es la frecuencia angular de f(t) en rad/s.

Una función periódica f(1) puede expresarse como una serie trigonométrica de Fourier de la siguiente forma [2]:

 $f(t) = a_0 + a_1 \cos(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + a_3 \cos(3\omega t) + \dots + b_1 \sin(\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) + b_3 \sin(3\omega t) + \dots (1.3)$



PAGINACION DISCONTINUA

(1.4)

en donde:

 a_0 es el valor promedio, también denominado componente de corriente directa, y a_1 , a_2 , a_3 ,... b_1 , b_2 , b_3 ... son las amplitudes de las cosenoides y las senoides respectivamente.

Aplicando la descomposición anterior en un sistema eléctrico, un voltaje no senoidal puede expresarse, omitiendo la componente de corriente directa, en función de sus componentes armónicas mediante la siguiente expressión [3]:

$$v(t) = \sqrt{2}V_1 \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_1) + \sqrt{2}V_2 \operatorname{sen}(2\omega t + \varphi_2) + \sqrt{2}V_3 \operatorname{sen}(3\omega t + \varphi_3) + \dots$$

en donde:

V1 es el valor eficaz de la primera armónica o componente fundamental,

φ1 es el ángulo de fase de la componente fundamental,

V₂ es el valor eficaz de la segunda armónica,

φ2 es el ángulo de fase de la segunda armónica,

V3 es el valor eficaz de la tercera armónica y

φ₃ es el ángulo de fase de la tercera armónica.

y para el caso de corrientes no senoidales se puede utilizar la siguiente ecuación [3]:

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \operatorname{sen}(\omega t + \phi_1) + \sqrt{2}I_2 \operatorname{sen}(2\omega t + \phi_2) + \sqrt{2}I_3 \operatorname{sen}(3\omega t + \phi_3) + \dots$$
(1.5)

en donde:

I₁ es el valor eficaz de la componente fundamental,

 ϕ_1 es el ángulo de fase de la componente fundamental,

l₂ es el valor eficaz de la segunda armónica,

 ϕ_2 es el ángulo de fase de la segunda armónica,

I3 es el valor eficaz de la tercera armónica y

 ϕ_1 es el ángulo de fase de la tercera armónica.

En la figura 1.1 se muestra la forma de onda de un voltaje con distorsión armónica, mientras que en la figura 1.2 se muestra su espectro correspondiente, en donde cada barra representa el valor eficaz de cada una de las componentes armónicas. La figura 1.3 muestra la forma de onda de una corriente con distorsión armónica y la figura 1.4 muestra su espectro correspondiente.

De los análisis de espectro de las figuras 1.2 y 1.4 se puede observar que las componentes armónicas pares son nulas, como en el caso de la figura 1.2 o bien son despreciables junto a las componentes impares, como lo muestra la figura 1.4 y que tampoco existe componente de corriente directa. Esto se debe a que ambas formas de onda tienen simetría de media onda, es decir, los semiciclos positivos tienen la misma forma de los semiciclos negativos [4].

2

La condición de simetría de media onda se expresa de la siguiente forma [4 y 5]:

$$f(t) = -f(t + T/2)$$
(1.6)

y cuando se cumple únicamente se presentan armónicas impares en el análisis de espectro [5].



En general las formas de onda de voltaje y corriente con distorsión armónica poseen simetría de media onda, y por este motivo las componentes armónicas pares en sus respectivos análisis de espectro prácticamente son despreciables, así como la componente de corriente directa.



Debido a que en ocasiones el valor eficaz de la componente fundamental es muy grande, comparado con los valores eficaces de las armónicas, como se muestra en la figura 1.2, la información presentada en los análisis de espectro bajo estas condiciones es difícil de evaluar.

Por el motivo anterior, los análisis de espectro a partir de este punto son realizados expresando las componentes armónicas como un porcentaje del valor eficaz de la componente fundamental. La componente fundamental no se incluye en los análisis de espectro subsecuentes, ya que por ser referencia siempre es el 100%.



1.3 Secuencia de fases de las armónicas de corriente y voltaje

Un elemento generador de corriente no senoidal, en el sistema eléctrico puede representarse en base a la ecuación 1.5 como varias fuentes de corriente conectadas en paralelo al sistema. Cada una de estas fuentes representa una armónica de corriente con su respectiva magnitud, frecuencia y ángulo de fase, como se muestra en la figura 1.5. Al sumar los efectos de todas las fuentes conectadas al sistema se tiene una corriente resultante i(t) que no es senoidal y que fluye a través del sistema eléctrico.





Esta representación sucle simplificarse sustituyendo a todas las fuentes de corrientes concetadas en paralelo mediante una sola fuente de corriente armónica denominada I_h , la cual contiene a todas las fuentes de componentes armónicas representadas en la figura 1.5. Esta representación simplificada se muestra en la figura 1.6.



Figura 1.6

Prescindiendo en estos momentos del tipo de conexión, supóngase que se tienen tres elementos generadores de corrientes armónicas y que dichos elementos son iguales entre sí, de modo que la corriente que demanda cada uno de estos elementos se puede expresar mediante la ecuación 1.5.

Al suponer que los tres elementos son iguales, los valores eficaces de sus componentes armónicas son iguales y los ángulos de fase asociados a cada componente armónica también son iguales, por este motivo se omiten los ángulos de fase en el análisis, ya que afectan por igual a cada una de las componentes armónicas, sin importar la fase.

Si cada uno de estos elementos se conecta a cada una de las fases de un sistema trifásico balanceado de secuencia positiva, como se muestra en la figura 2.3, entonces las corrientes armónicas, considerando la fase A como referencia, para cada uno de los tres elementos se pueden expresar mediante la ecuación 1.5 como:

$$i_{A}(t) = \sqrt{2}I_{A1} \operatorname{sen}(\omega t) + \sqrt{2}I_{A2} \operatorname{sen}(2\omega t) + \sqrt{2}I_{A3} \operatorname{sen}(3\omega t) + \sqrt{2}I_{A4} \operatorname{sen}(4\omega t) + \dots$$
(1.7)

 $i_{\rm B}(t) = \sqrt{2} I_{\rm B1} \operatorname{sen}(\omega t - 120^\circ) + \sqrt{2} I_{\rm B2} \operatorname{sen}(2(\omega t - 120^\circ)) + \sqrt{2} I_{\rm B3} \operatorname{sen}(3(\omega t - 120^\circ)) + \sqrt{2} I_{\rm B4} \operatorname{sen}(4(\omega t - 120^\circ)) + \dots$ (1.8)

 $i_{\rm C}(t) = \sqrt{2} I_{\rm C1} \operatorname{sen}(\omega t + 120^\circ) + \sqrt{2} I_{\rm C2} \operatorname{sen}(2(\omega t + 120^\circ)) + \sqrt{2} I_{\rm C3} \operatorname{sen}(3(\omega t + 120^\circ)) + \sqrt{2} I_{\rm C4} \operatorname{sen}(4(\omega t + 120^\circ)) + \dots$ (1.9)



Figura 1.7

Por estar concetados estos elementos a un sistema trifásico de secuencia positiva entonces las corrientes $i_A(t)$, $i_B(t)$ e $i_C(t)$ tienen secuencia positiva, con $i_B(t)$ atrasada 120° con respecto a $i_A(t)$ y con $i_C(t)$ adelantada 120° con respecto a $i_A(t)$.

De las ecuaciones 1.7, 1.8 y 1.9 se puede observar que las componentes fundamentales de las corrientes conservan entre sí la secuencia de fases de sus respectivas corrientes totales, esto es, l_{A1} , l_{B1} e l_{C1} tienen secuencia positiva.

Analizando la segunda armónica en las ecuaciones 1.7, 1.8 y 1.9 se obtienen las siguientes expresiones:

$$\sqrt{21}_{A2} \operatorname{sen}(2\omega t)$$

$$\sqrt{21}_{B2} \operatorname{sen}(2(\omega t - 120^{\circ})) = \sqrt{21}_{B2} \operatorname{sen}(2\omega t - 240^{\circ}) = \sqrt{21}_{B2} \operatorname{sen}(2\omega t + 120^{\circ})$$
(1.10)
$$\sqrt{21}_{C2} \operatorname{sen}(2(\omega t + 120^{\circ})) = \sqrt{21}_{C2} \operatorname{sen}(2\omega t + 240^{\circ}) = \sqrt{21}_{C2} \operatorname{sen}(2\omega t - 120^{\circ})$$

de donde se concluye que las segundas armónicas de corriente tienen secuencia de fase negativa.

Realizando un análisis similar para la tercera armónica de corriente en las ecuaciones 1.7, 1.8 y 1.9 se obtienen las siguientes expresiones:

$$\sqrt{2}I_{A3} \operatorname{sen}(3\omega t)$$

$$\sqrt{2}I_{B3} \operatorname{sen}(3(\omega t - 120^{\circ})) = \sqrt{2}I_{B3} \operatorname{sen}(3\omega t - 360^{\circ}) = \sqrt{2}I_{B3} \operatorname{sen}(3\omega t)$$

$$\sqrt{2}I_{C3} \operatorname{sen}(3(\omega t + 120^{\circ})) = \sqrt{2}I_{C3} \operatorname{sen}(3\omega t + 360^{\circ}) = \sqrt{2}I_{C3} \operatorname{sen}(3\omega t)$$
(1.11)



de donde se observa que las terceras armónicas de corriente tienen secuencia cero.

Mediante un análisis similar para la cuarta armónica de corriente en las ecuaciones 1.7, 1.8 y 1.9 se obtienen las siguientes expresiones:

$$\sqrt{21}_{A4} \operatorname{sen}(4\omega t)$$

$$\sqrt{21}_{B4} \operatorname{sen}(4(\omega t - 120^{\circ})) = \sqrt{21}_{B4} \operatorname{sen}(4\omega t - 480^{\circ}) = \sqrt{21}_{B4} \operatorname{sen}(4\omega t - 120^{\circ})$$
(1.12)
$$\sqrt{21}_{C4} \operatorname{sen}(4(\omega t + 120^{\circ})) = \sqrt{21}_{C4} \operatorname{sen}(4\omega t + 480^{\circ}) = \sqrt{21}_{C2} \operatorname{sen}(4\omega t + 120^{\circ})$$

de donde se puede observar que las cuartas armónicas de corriente tienen una secuencia de fase positiva.

Si se continúa este análisis para las demás componentes armónicas se observa que las quintas. armónicas tienen secuencia de fase negativa, que las sextas armónicas tienen secuencia de fase cero, que las séptimas. armónicas tienen secuencia de fase positiva, repitiéndose este comportamiento en forma cíclica; las componentes armónicas del voltaje también se comportan del mismo modo. A continuación se presenta un resumen de las componentes armónicas, para voltajes o corrientes, con su respectiva secuencia de fase [3, 6 y 7].

Orden de la armónica	Secuencia	de fase	Orden de la armónica	Secuencia de fase	
1	Positiva	(+)	8	Negativa	(-)
2	Negativa	(-)	9	Cero	(0)
3	Cero	(0)	10	Positiva	(+)
4	Positiva	(+)	11	Negativa	(-)
5	Negativa	(-)	12	Cero	(0)
6	Cero	(0)	13	Positiva	(+)
7	Positiva	(+)			

Tabla 1.1. Secuencia de fase de las componentes armónicas

Todas las armónicas múltiplos de tres, ya sea para voltajes o para corrientes, tienen secuencia de fase cero y reciben el nombre de armónicas triples [7].

1.4 Comportamiento de las armónicas de corriente y voltaje en un sistema eléctrico

Supóngase ahora que los tres elementos generadores de corrientes armónicas están conectados formando un sistema de tres fases y 4 hilos con el sistema generador, en donde el cuarto hilo es el neutro de retorno (sistema de conexión en estrella) tal y como se muestra en la figura 1.8.

En caso de no existir conductor neutro el camino de retorno también puede ser a través de la puesta a tierra de los neutros, siempre y cuando ambos neutros, el de la generación y el de los elementos generadores de corrientes armónicas estén puestos a tierra.



Voltajes y corrientes con distorsión armónica

Al circular por el sistema eléctrico, las corrientes armónicas con secuencia de fase positiva se cancelan en el neutro de retorno, ya que la suma fasorial de estas corrientes es cero. Las corrientes con secuencia de fases negativa también se cancelan al llegar al neutro de retorno debido a que la suma fasorial de estas corrientes también es cero. El resultado final es que las componentes armónicas de secuencia positiva y de secuencia negativa no producen corriente en el neutro.



Figura 1.8

Las corrientes armónicas con secuencia de fase cero también se suman fasorialmente en el punto neutro, pero al tener la misma magnitud y ángulo de fase, por el neutro retorna una corriente armónica de secuencia cero de una magnitud de tres veces mayor a la magnitud de la corriente que circula por las fases, como se muestra en la figura 1.9.



Figura 1.9

Las armónicas de secuencia positiva y negativa pueden circular sin mayor problema a través de un sistema trifásico de tres o cuatro hilos, sin que el tipo de conexión, delta o estrella, impida o limite de algún modo su paso a través del sistema. Las armónicas triples necesitan de un conductor de retorno, que es el neutro en un sistema de tres fases y cuatro hilos, o bien la tierra en un sistema de tres fases con neutros puestos a tierra, para poder circular de regreso hacia los elementos que las generan. La ausencia del conductor o del medio de retorno impide la circulación de las armónicas de secuencia cero.



Cuando circulan corrientes armónicas por el sistema eléctrico, se tienen caídas de tensión que dependen de tales corrientes. Por ejemplo, la circulación de corrientes de componente fundamental da origen a caídas de tensión de componente fundamental con secuencia de fase positiva, la circulación de corrientes de segunda armónica da lugar a caídas de tensión de segunda armónica con secuencia de fase negativa, la circulación de corrientes de tercera armónica da lugar a caídas de tensión de tercera armónica con secuencia de fase cero y así sucesivamente. Al sumar estas componentes armónicas de caídas de tensión, de acuerdo a la expresión 1.4 se tiene la caída de tensión resultante.

La caída de tensión a través de la línea por la circulación de las corrientes armónicas no es senoidal y por lo tanto, el voltaje al final de la línea tampoco tiene una forma de onda senoidal. La distorsión a la forma de onda del voltaje depende de la impedancia de la línea, del orden de las componentes armónicas, de su magnitud, así como de su ángulo de fase.

Supóngase ahora que se tiene el sistema mostrado en la figura 1.10, en donde figuran las impedancias de los conductores del sistema eléctrico, las cuales también son iguales y se sigue asumiendo que los tres elementos generadores de corrientes armónicas son iguales.



Figura 1.10

Al circular por el sistema eléctrico las corrientes de las ecuaciones 1.7, 1.8 y 1.9 se tienen caídas de tensión no senoidales, ocasionando que los voltajes no sean senoidales en el extremo final de la línea. Los voltajes de línea a neutro, en el punto en donde se conectan los elementos generadores de corrientes no senoidales, pueden ser representados mediante las siguientes expresiones:

$$v_{A}(t) = \sqrt{2}V_{A1} \operatorname{sen}(\omega t) + \sqrt{2}V_{A2} \operatorname{sen}(2\omega t) + \sqrt{2}V_{A3} \operatorname{sen}(3\omega t) + \sqrt{2}V_{A4} \operatorname{sen}(4\omega t) + \dots$$
(1.13)

$$v_{\rm B}(t) = \sqrt{2} V_{\rm H1} \operatorname{sen}((\omega t - 120^\circ)) + \sqrt{2} V_{\rm H2} \operatorname{sen}(2(\omega t - 120^\circ)) + \sqrt{2} V_{\rm H3} \operatorname{sen}(3(\omega t - 120^\circ)) + \sqrt{2} V_{\rm H4} \operatorname{sen}(4(\omega t - 120^\circ)) + \dots$$
(1.14)

 $v_{\rm C}(t) = \sqrt{2}V_{\rm C1} \operatorname{sen}((\omega t + 120^{\circ})) + \sqrt{2}V_{\rm C2} \operatorname{sen}(2(\omega t + 120^{\circ})) + \sqrt{2}V_{\rm C3} \operatorname{sen}(3(\omega t + 120^{\circ})) + \sqrt{2}V_{\rm C4} \operatorname{sen}(4(\omega t + 120^{\circ})) + \dots$ (1.15)



en donde:

 $V_{A1}, \, V_{B1}, \, V_{C1}, ...,$ son los valores eficaces de las componentes fundamentales del voltaje en el lado de la carga,

 V_{A2} , V_{B2} , V_{C2} ,..., son los valores eficaces de las componentes de segunda armónica del voltaje en el lado de la carga,

 $V_{A3},\,V_{B3},\,V_{C3},...,$ son los valores eficaces de las componentes de tercera armónica del voltaje en el lado de la carga y

 V_{A4} , V_{D4} , V_{C4} ,..., son los valores eficaces de las componentes de cuarta armónica del voltaje en el lado de la carga.

En base a la suposición de que los elementos generadores de corrientes armónicas son iguales y las impedancias de la línea también son iguales, entonces para cualquier componente armónica de fase a neutro se tiene que $V_{An} = V_{Bn} = V_{Cn} = V_{Fn}$.

Para las componentes fundamentales se tiene el siguiente sistema de ecuaciones de tensiones de fase a neutro:

$$\sqrt{2} \nabla_{F_1} \operatorname{sen}(\omega t)$$

$$\sqrt{2} \nabla_{F_1} \operatorname{sen}(\omega t - 120^\circ)$$

$$\sqrt{2} \nabla_{F_1} \operatorname{sen}(\omega t + 120^\circ)$$

$$(1.16)$$

Estas tensiones de componente fundamental de fase a neutro tienen su respectivo sistema de tensiones entre fases con una magnitud $\sqrt{3}(\sqrt{2}V_{F1-rms})$ y con 30° de adelanto y con secuencia de fases positiva:

$$\sqrt{3} \left(\sqrt{2} \vee_{F_{\rm I}} \right) \operatorname{sen}(\omega t + 30^{\circ})$$

$$\sqrt{3} \left(\sqrt{2} \vee_{F_{\rm I}} \right) \operatorname{sen}((\omega t - 120^{\circ}) + 30^{\circ}) = \sqrt{3} \left(\sqrt{2} \vee_{F_{\rm I}} \right) \operatorname{sen}(\omega t - 90^{\circ})$$

$$\sqrt{3} \left(\sqrt{2} \vee_{F_{\rm I}} \right) \operatorname{sen}((\omega t + 120^{\circ}) + 30^{\circ}) = \sqrt{3} \left(\sqrt{2} \vee_{F_{\rm I}} \right) \operatorname{sen}(\omega t + 150^{\circ})$$
(1.17)

Para las componentes de segunda armónica se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones para las tensiones de fase a neutro:

$$\sqrt{2} V_{F2} \operatorname{scn}(2\omega t)$$

$$\sqrt{2} V_{F2} \operatorname{scn}(2(\omega t - 120^\circ)) = \sqrt{2} V_{F2} \operatorname{scn}(2\omega t - 240^\circ) = \sqrt{2} V_{F2} \operatorname{scn}(2\omega t + 120^\circ)$$

$$\sqrt{2} V_{F2} \operatorname{scn}(2(\omega t + 120^\circ)) = \sqrt{2} V_{F2} \operatorname{scn}(2\omega t + 240^\circ) = \sqrt{2} V_{F2} \operatorname{scn}(2\omega t - 120^\circ)$$
(1.18)

y se observa que el sistema de ecuaciones tiene secuencia negativa y tiene su correspondiente sistema de tensiones entre fases:

$$\sqrt{3} \left(\sqrt{2} V_{F2} \right) \operatorname{sen}(2\omega t + 30^{\circ})$$

$$\sqrt{3} \left(\sqrt{2} V_{F2} \right) \operatorname{sen}(2\omega t + 150^{\circ})$$

$$\sqrt{3} \left(\sqrt{2} V_{F2} \right) \operatorname{sen}(2\omega t - 90^{\circ})$$

$$(1.19)$$

y este sistema de tensiones entre fases, de componente de segunda armónica, también tiene secuencia negativa como el sistema de tensiones de fase a neutro.

Realizando la suma del sistema de tensiones 1.16y 1.18 se obtiene el siguiente sistema de tensiones de fase a neutro:

$$\sqrt{2} V_{F1} \operatorname{sen}(\omega t) + \sqrt{2} V_{F2} \operatorname{sen}(2\omega t)$$

$$\sqrt{2} V_{F1} \operatorname{sen}((\omega t - 120^{\circ})) + \sqrt{2} V_{F2} \operatorname{sen}(2\omega t + 120^{\circ})$$

$$\sqrt{2} V_{F1} \operatorname{sen}((\omega t + 120^{\circ})) + \sqrt{2} V_{F2} \operatorname{sen}(2\omega t - 120^{\circ})$$

$$(1.20)$$

obteniendo la diferencia de los sistemas de ccuaciones 1.17 y 1.19 se obtiene el siguiente sistema de tensiones entre fases:

$$\sqrt{3} \left(\left(\sqrt{2} \nabla_{F_{1}} \right) \operatorname{sen}(\omega t) - \left(\sqrt{2} \nabla_{F_{1}} \right) \operatorname{sen}(2\omega t + 30^{\circ}) \right)$$

$$\sqrt{3} \left(\left(\sqrt{2} \nabla_{F_{1}} \right) \operatorname{sen}(\omega t - 90^{\circ}) - \left(\sqrt{2} \nabla_{F_{1}} \right) \operatorname{sen}(2\omega t + 150^{\circ}) \right)$$

$$\sqrt{3} \left(\left(\sqrt{2} \nabla_{F_{1}} \right) \operatorname{sen}(\omega t + 150^{\circ}) - \left(\sqrt{2} \nabla_{F_{1}} \right) \operatorname{sen}(2\omega t - 90^{\circ}) \right)$$

$$(1.21)$$

Del sistema de ecuaciones 1.20 se observa que los voltajes de fase a neutro dejan de ser senoidales al aparecer las componentes de segunda armónica, ya que ahora los voltajes están formados por la suma de una componente de secuencia positiva a 60 Hz y una componente de secuencia negativa a 120 Hz.

Para el sistema de ecuaciones 1.21 se llega a la misma conclusión, las tensiones entre fases dejan de ser senoidales debido a que ahora tienen componentes armónicas.

Este comportamiento, observado para las componentes armónicas de secuencia negativa, también se manifiesta en las componentes armónicas de secuencia positiva. Las componentes armónicas de voltaje de fase a neutro de secuencia positiva y negativa también distorsionan a los voltajes entre fases.

Para las componentes de tercera armónica se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones de tensiones de fase a neutro:

$$\sqrt{2} V_{F3} \operatorname{sen}(3\omega t)$$

$$\sqrt{2} V_{F3} \operatorname{sen}(3(\omega t - 120^\circ)) = \sqrt{2} V_{F3} \operatorname{sen}(3\omega t - 360^\circ) = \sqrt{2} V_{F3} \operatorname{sen}(3\omega t)$$

$$\sqrt{2} V_{F3} \operatorname{sen}(3(\omega t + 120^\circ)) = \sqrt{2} V_{F3} \operatorname{sen}(3\omega t + 360^\circ) = \sqrt{2} V_{F3} \operatorname{sen}(3\omega t)$$

$$(1.22)$$

de este sistema de ecuaciones se observa que las componentes de voltaje de tercera armónica son iguales, sin importar en qué fase está la componente.

Las tensiones entre fases se obtienen de la diferencia fasorial de las tensiones de fase al neutro del sistema, esto es:



Voltajes y corrientes con distorsión armónica

 $V_{ABn} = V_{An} - V_{Bn}$ $V_{BCn} = V_{Bn} - V_{Cn}$ $V_{CAn} = V_{Cn} - V_{An}$ (1.23)

Al realizar la diferencia fasorial de las terceras armónicas de voltaje de fase a neutro el resultado es cero, esto significa que para las armónicas múltiplos de tres no existen componentes de tercera armónica de voltaje entre fases.

Las tensiones de fase a neutro sí tienen distorsión por efecto de las componentes de tercera armónica de voltaje, mientras que las tensiones entre fases permanecen sin distorsión. La distorsión causada por las armónicas triples puede observarse mediante el uso de un instrumento apropiado conectado entre las terminales de fase y neutro; en cambio si el instrumento se conecta entre los conductores de fases la distorsión causada por las terceras armónicas no sería apreciada [8].

Los resultados obtenidos anteriormente dejan de ser ciertos cuando:

- Las fuentes generadoras de corrientes armónicas conectadas en fases diferentes no son iguales, formando una carga desbalanceada para el sistema o porque tienen un contenido espectral distinto.
- Las impedancias de los conductores del sistema son distintas.
- Las tensiones de generación del sistema trifásico no son senoidales o están desbalanceadas.

Cuando las componentes armónicas están desbalanceadas dejan de comportarse como se expuso anteriormente. En estos casos cada componente armónica se descompone en sistemas de secuencia positiva, negativa y cero [6], lo cual complica el análisis de las armónicas dentro del sistema eléctrico debido a que las armónicas de frecuencia fundamental tienen componentes de secuencia positiva, negativa y cero, que las armónicas de segundo orden también tienen componentes de secuencia positiva, negativa y cero, que las armónicas de tercer orden dejan de estar en fase, descomponiéndose en sistemas de secuencia positiva, negativa y cero y así sucesivamente.

1.5 Valor eficaz de una forma de onda distorsionada

Cuando un voltaje no es senoidal su valor eficaz se calcula mediante la siguiente ecuación [4]:

$$V_{\rm rms} = \sqrt{\frac{1}{T}} \int_{0}^{T} v^2(t) dt \qquad (1.24)$$

y aplicando la ecuación 1.24 en la ecuación 1.4 se tiene la siguiente expresión:

$$V_{\rm rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{0}^{T} \left(\sqrt{2} V_1 \, \operatorname{sen}(\omega t + \varphi_1) + \sqrt{2} \, V_2 \, \operatorname{sen}(2\omega t + \varphi_2) + \sqrt{2} \, V_3 \, \operatorname{sen}(3\omega t + \varphi_3) + \ldots \right)^2 dt} \quad (1.25)$$

al hacer el desarrollo del cuadrado de v(t) dentro de la integral se llega a la expresión:

$$V_{\rm rms} = \sqrt{\frac{1}{T}} \int_{0}^{T} \left(\sqrt{2} \, V_1 \, \text{sen}(\omega t + \varphi_1) \left(\sqrt{2} \, V_1 \, \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + \sqrt{2} \, V_2 \, \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + ... \right) + \sqrt{2} \, V_2 \, \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) \left(\sqrt{2} \, V_1 \, \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + \sqrt{2} \, V_2 \, \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + ... \right) + ... \right) dt + \sqrt{2} \, V_3 \, \text{sen}(3\omega t + \varphi_3) \left(\sqrt{2} \, V_1 \, \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + \sqrt{2} \, V_2 \, \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + ... \right) + ... \right) dt$$

$$(1.26)$$

Dentro de la integral se tienen básicamente dos tipos de términos, uno que expresa el producto de dos componentes armónicas de orden distinto:

$$2V_n V_m \operatorname{sen}(n\omega t + \varphi_n) \operatorname{sen}(m\omega t + \varphi_m)$$
(1.27)

y otro que expresa el producto de dos componentes armónicas del mismo orden:

$$2V_n^2 \operatorname{sen}^2(\operatorname{n\omega t} + \varphi_1) \tag{1.28}$$

La ecuación 1.27 puede expresarse como:

$$V_{n}V_{m}\cos((n-m)\omega t + \varphi_{n} - \varphi_{m}) + V_{n}V_{m}\cos((n+m)\omega t + \varphi_{n} + \varphi_{m})$$
(1.29)

por otra parte, la ecuación 1.28 se puede expresar como:

$$V_{n}^{2} + V_{n}^{2} \cos(2n\omega t + 2\phi_{n})$$
(1.30)

La integral de la ecuación 1.29 para un ciclo completo de v(t) es igual a cero, mientras que la integral de la ecuación 1.30 para un ciclo completo de v(t) es TV_n^2 . Utilizando estos resultados en la ecuación 1.26 se obtiene:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \left(TV_1^2 + TV_2^2 + TV_3^2 + ... \right)}$$
(1.31)

Finalmente el valor eficaz de un voltaje con distorsión armónica es [2 y 6]:

$$V_{\rm rms} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}$$
(1.32)

para corrientes con componentes armónicas se obtiene una expresión similar [6]:

$$I_{\rm mms} = \sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2 + \dots} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} l_n^2}$$
(1.33)

El valor eficaz proporciona un valor constante (o de directa) con la misma capacidad de entregar potencia que una forma de onda de alterna [4]. El uso de valores eficaces, tanto para corriente como

ĺ	JESSE CON
	FALLA DE ORIGEN

para voltaje ofrece ventajas sobre el empleo de los valores máximos o de pico, por ejemplo, los instrumentos de medición de hierro móvil y los electrodinamométricos miden valores eficaces en forma natural [9]. El calor generado en un equipo eléctrico se debe al valor eficaz de la corriente que circula a través de él y el calor constituye la limitante principal en la operación de los equipos eléctricos y electrónicos, por este motivo se prefiere su uso sobre el valor de pico.

1.6 Factor de cresta

El factor de cresta, es definido como la relación del valor de pico al valor eficaz de una forma de onda [9, 10 y 11], y se le considera un indicador de qué tan puntiaguda o que tan aplanada es la forma de onda con respecto a una senoidal [4].

El factor de cresta para un voltaje, también conocido como factor de amplitud [9], se define del siguiente modo:

$$fc = \frac{V_p}{V_{mis}}$$
(1.34)

y del mismo modo, para una corriente, el factor de cresta es:

$$fc = \frac{l_p}{l_{rms}}$$
(1.35)

Para una forma de onda senoidal el factor de cresta tiene un valor de $\sqrt{2}$, que es aproximadamente 1.4142.

Este parámetro proporciona información muy valiosa, junto con el valor eficaz, sobre la forma que guarda la corriente o el voltaje en un sistema eléctrico. Las formas de onda periódicas no senoidales con factores de cresta mayores a 1.4142 tienen valores de pico elevados y tienden a ser esbeltas y puntiagudas, mientras que aquellas formas de onda periódicas no senoidales con factores de cresta menores a 1.4142 tienen valores de pico reducidos y tienden a ser amplias y aplanadas.

El factor de cresta es un indicador de cuál es el valor de pico que necesita alcanzar una forma de onda distorsionada para que pueda entregar su valor eficaz. Por ejemplo una forma de onda ancha y de poca amplitud no requiere de un factor de cresta elevado para poder entregar su valor eficaz, ya que la forma de onda contiene en un periodo la potencia necesaria. Del mismo modo, una forma de onda alta y esbelta requiere un factor de cresta elevado para poder contener en un periodo el valor eficaz adecuado para satisfacer las necesidades de potencia de la carga.

En la figura 1.11 se muestra una forma de onda de voltaje no senoidal, con un valor eficaz de 120 V y con un valor de pico de 159 V_p . El factor de cresta para este voltaje es de:

$$fc = \frac{159}{120} = 1.325$$


El valor calculado para el factor de cresta es menor a 1.4142, lo cual indica que la forma de onda del voltaje está ligeramente achatada en sus puntos máximos y mínimos como se muestra en la figura 1.11.



Para el mismo valor eficaz de 120 V, un voltaje senoidal tiene un valor de pico de 169 Volts. Aunque el voltaje de la figura 1.11 tiene un valor eficaz de 120 V, los valores instantáneos en las crestas y los valles son menores a los valores que tendría si su forma de onda fuera senoidal. Esto significa que el voltaje mostrado en la figura 1.11 alcanza valores de pico menores a los que alcanzaría si fuera senoidal. De acuerdo a la figura 1.11, el valor de pico alcanzado por el voltaje distorsionado es el 94% del valor que tendría si fuera senoidal.

En la figura 1.12 se presenta una forma de onda de corriente no senoidal con un valor eficaz de 58.4 A y con un valor de pico de 122 A.

El factor de cresta para esta corriente es de

$$fc = \frac{122}{58.4} = 2.089$$

El valor obtenido para el factor de cresta es mayor a 1.4142, esto indica que la forma de onda de la corriente tiene picos de corriente que alcanzan valores muy elevados.

Para el mismo valor eficaz de corriente de 58.4 A, una corriente senoidal tiene un valor de pico de 82.59 A, esto indica que la corriente de la figura 1.12 alcanza un valor de pico del 147% de lo que alcanzaría si la forma de onda de la corriente fuera senoidal.

Una forma de onda con un factor de cresta menor a 1.4142 presenta infravalores instantáneos por estar aplanada en sus crestas y sus valles. Por otra parte, una forma de onda con un factor de cresta mayor a 1.4142 tiene sobrevalores instantáneos por tener valores de pico muy elevados. El factor de cresta es un indicador de la existencia de distorsión en una forma de onda cuando tiene un valor diferente a 1.4142.



Voltajes y corrientes con distorsión armónica

Una corriente como la mostrada en la figura 1.12 que tiene una forma de onda esbelta requiere un valor de pico muy elevado para contener, dentro de un periodo, el valor eficaz necesario para la potencia que debe de entregar. Esta corriente tiene un contenido elevado de tercera armónica, que provoca la forma pulsante y esbelta de la corriente.

Si el valor de pico fuera menor y la corriente conservara su forma esbelta, el valor eficaz se reduciría ya que el cuadrado de la corriente en un ciclo tendría un área menor bajo la curva, y la potencia que podría entregar esta corriente sería menor. Claro que esta situación no sería posible fisicamente porque, la disminución del valor eficaz de la tercera armónica ocasionaría que la componente fundamental tuviera una amplitud relativa mayor y, la disminución del valor de pico vendría acompañada de un ensanchamiento de la forma de onda de la corriente.

La forma en que disminuyendo el valor de pico la corriente conserve su valor eficaz sería que la disminución en la amplitud fuera acompañada por un ensanchamiento de la forma de onda de la corriente, motivado por un cambio de fase en la tercera armónica de la corriente.

No debe de tomarse la magnitud del factor de cresta como un indicador del grado de distorsión, es decir, un factor de cresta muy alejado de 1.4142 no siempre es un indicador de distorsión elevada en una forma de onda, del mismo modo que un factor de cresta muy cercano a 1.4142 no siempre es un indicador de distorsión reducida en una forma de onda.

Aunque las formas de onda de las figuras 1.11 y 1.12, y sus factores de cresta correspondientes, llevarían a concluir que el valor del factor de cresta es un indicador del grado de distorsión, esta conclusión no es de caracter general. Como se verá más adelante, existen situaciones donde una forma de onda tiene mayor distorsión armónica, a pesar de tener un factor de cresta mas cercano a 1.4142, que otras formas de onda con un factor de cresta mayor. Un factor de cresta distinto a 1.4142 es un indicador cualitativo de la existencia de distorsión armónica en una forma de onda.

Los valores eficaces se utilizan ampliamente por ser un valor asociado a la cantidad de potencia que la forma de onda puede entregar, sin embargo no se debe descartar el uso de los valores máximos o de pico, ya que ciertas situaciones son evaluadas de mejor forma mediante su uso en lugar de los valores eficaces.

Por ejemplo, la tensión máxima a la que se somete un aislamiento es el valor pico del voltaje [9], del mismo modo que la corriente máxima instantánea en un dispositivo electrónico es el valor de pico de la corriente [2]. El uso del valor eficaz en este tipo de situaciones sin conocer el factor de cresta daría origen a errores, ya que bajo condiciones de distorsión armónica el factor de cresta es distinto a 1.4142 y los valores que proporcionan información útil son los de pico.

1.7 Figuras de mérito que cuantifican distorsión armónica

Las figuras de mérito son expresiones que se utilizan para cuantificar los efectos que genera la distorsión armónica en un parámetro eléctrico, en un dispositivo que forma parte del sistema eléctrico o en equipos cercanos. Existen figuras que indican los niveles de distorsión armónica del voltaje y de la corriente, así como una figura de mérito que evalúa el sobrecalentamiento que experimentan los



devanados de un transformador cuando es sometido a corrientes armónicas y una figura que se encarga de evaluar la interferencia en las líneas telefónicas cercanas a conductores que transportan armónicas.

Las figuras de mérito que evaluan distorsión armónica indican mediante una proporción el grado de distorsión contenido en una forma de onda. Esta evaluación se hace comparando, mediante un cociente, el valor eficaz de la componente armónica, del voltaje o de la corriente, con el valor eficaz de la componente fundamental o con el valor eficaz de la forma de onda distorsionada.

Las componentes armónicas del voltaje y de la corriente se calculan mediante las siguientes expresiones [12]:

$$=\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty}V_{n}^{2}}$$
(1.36)

٧_{II}

 $I_{H} =$

El factor de distorsión del voltaje o Voltage Factor Distortion (VFD), se calcula como el cociente de la raiz cuadrada de la suma de los cuadrados de los valores de pico (no valores eficaces) de las componentes armónicas con el valor de pico de la componente fundamental [3]:

$$FD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{pn}^2}}{V_{p1}}$$
(1.38)

en donde;

 V_{Pn} es el valor de pico de la enésima componente armónica del voltaje y V_{P1} es el valor de pico de la componente fundamental del voltaje.

El factor de distorsión de corriente o Current Factor Distorsion (CFD) se obtiene de una forma similar [3]:

$$CFD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} l_{p_n}^2}}{l_{p_1}}$$

en donde:

 I_{Pn} es el valor de pico de la enésima componente armónica de la corriente e I_{P1} es el valor de pico de la componente fundamental de la corriente.

TE	319	01) <u>"</u> .'	
<u>FALL</u>	¥ 1,1 , • 1			<u>en N</u>

(1.37)

(1.39)

Las figuras de mérito de las ecuaciones 1.38 y 1.39 se han definido en forma genérica bajo el nombre de factor de distorsión (Distortion Factor) mediante la ecuación [12]:

$$DF = \sqrt{\frac{\sum (Componentes armonicas)^2}{(Componente fundamental)^2}}$$
(1.40)

Actualmente, los factores de distorsión armónica, se calculan mediante las figuras de mérito denominadas distorsión armónica total o Total Harmonic Distortion (THD), las cuales se han vuelto de uso común [12]. Estos factores consideran el uso de los valores eficaces de las armónicas en vez de sus valores de pico.

La distorsión armónica total con respecto al valor eficaz de la fundamental es la proporción del valor eficaz de las componentes armónicas con respecto al valor eficaz de la fundamental.

La distorsión armónica total del voltaje y de la corriente con respecto a la componente fundamental se pueden obtener mediante las expresiones siguientes [6, 11, 12 y 13]:

$$THD_{\mathbf{V}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1}$$
(1.41)

$$THD_{1} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_{n}^{2}}}{I_{1}}$$
(1.42)

Estas ecuaciones llegan al mismo resultado de las ecuaciones 1.38 y 1.39 por ser 1.4142 la relación entre valores de pico y valores eficaces para las componentes armónicas.

La referencia [3] fue editada en 1984 mediante la integración de artículos existentes previamente. Los instrumentos de medición disponibles en aquella época no tenían las capacidades de los instrumentos de la actualidad, y con los equipos disponibles era más sencillo obtener el valor de pico de las componentes armónicas que su valor eficaz. El autor piensa que por el motivo anterior todas las figuras de mérito que aparecen en la referencia [3] siempre vienen referidas a las amplitudes o valores de pico.

Debido a que los valores eficaces son de mayor uso que los valores de pico, por los motivos expuestos en la sección 1.5, actualmente estas figuras de mérito se calculan mediante el valor eficaz, aprovechando que la capacidad de procesamiento de los equipos de medición actuales permite obtener estos parámetros fácilmente.

(1.43)

(1.44)

1.7.2 Distorsión armónica total respecto al valor eficaz

El THD con respecto al valor eficaz es otra forma de cuantificar la distorsión armónica del voltaje o la corriente. Este factor de distorsión se calcula como la relación de la raiz cuadrada de la componente armónica del voltaje o la corriente, al valor eficaz del voltaje o la corriente no senoidales.

La distorsión armónica total con respecto al valor eficaz es la proporción del valor eficaz de las componentes armónicas con respecto al valor eficaz de la forma de onda distorsionada.

Para voltajes y corrientes la distorsión armónica total con respecto al valor eficaz de la forma de onda se calcula mediante las siguientes expresiones [11]:

$$THD_{Vrms} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_{rms}}$$

$$THD_{Irms} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} l_n^2}}{l_{rms}}$$

Al factor de distorsión de la ecuación 1.43 también se le conoce como índice de distorsión armónica o Harmonic Distortion Index (DIN) [6].

1.7.3 ¿Qué figura de mérito conviene utilizar?

Ahora que se sabe que existen dos figuras de mérito que cuantifican la distorsión armónica surge la cuestión acerca de qué figura es la que más conviene utilizar. Los equipos de medición actuales pueden calcular ambas figuras en forma simultánea, en algunos casos, o bien permiten seleccionar la figura que se desea calcular.

Los límites de distorsión armónica de la referencia [12] para el voltaje se establecen en base a la distorsión con respecto al valor eficaz de la componente fundamental. Esta misma referencia establece límites de distorsión para la corriente con respecto al valor eficaz de la componente fundamental de la demanda máxima de corriente. La referencia [8] compara el contenido armónico de la corriente de excitación de un transformador con respecto al valor eficaz de la componente fundamental. La referencia [14] indica que la distorsión armónica se obtiene al dividir entre el valor eficaz de la componente fundamental.

Idealmente el voltaje y la corriente deberían ser senoidales, sin distorsión. La distorsión armónica total, con respecto a la componente fundamental, compara la componente armónica del voltaje o de la corriente, con el valor eficaz de una senoidal a frecuencia fundamental, que es el estado ideal de ambos parámetros eléctricos.



Por otra parte, la distorsión armónica total con respecto al valor eficaz compara la componente armónica, del voltaje o de la corriente, con el valor eficaz de la forma de onda. La diferencia radica en que no se compara contra el valor eficaz de una senoidal, sino contra el valor eficaz de una señal que puede tener cualquier forma de onda.

Cuando la distorsión es muy baja, el valor eficaz de la componente fundamental es muy parecido al valor eficaz de la forma de onda analizada, ya que las componentes armónicas prácticamente no producen cambios en el valor eficaz total. Esta situación es ilustrada en la figura 1.13, en donde se observa un análisis de espectro y que ambas figuras de mérito tienen el mismo valor.

Por otra parte, cuando la distorsión es elevada, el valor eficaz del contenido armónico ya tiene una magnitud considerable, con respecto al valor eficaz de la componente fundamental, y las componentes armónicas ya intervienen en la magnitud resultante del valor eficaz. Un contenido armónico alto produce una elevada distorsión armónica total con respecto a la fundamental debido a que algunas componentes armónicas puede tomar valores cercanos al de la fundamental, llegando en algunos casos a ser incluso superiores.

Estas componentes armónicas con valor elevado, también afectan al valor eficaz total, y el resultado es que éste aumenta con el contenido armónico y la distorsión armónica total con respecto al valor eficaz no es tan elevada. Esta situación es ilustrada en la figura 1.14 en donde se muestra un análisis de espectro y se observa que la distorsión armónica total con respecto al valor eficaz es mayor a la distorsión armónica total con respecto a la forma de onda.





Figura 1.14

Por los motivos anteriores se recomienda el uso de la distorsión armónica total con respecto a la componente fundamental, ya que su base de comparación es una onda senoidal, que constituye la forma de onda ideal para el voltaje y la corriente.

2. Dispositivos generadores de distorsión armónica

2.1 Introducción

Un sistema eléctrico es integrado por diversos elementos como transformadores, generadores, motores, convertidores de estado sólido, conductores, bancos de capacitores, entre otros; algunos de estos elementos tienen la propiedad de no modificar la forma senoidal del voltaje o la corriente, recibiendo el nombre de elementos lineales.

Las armónicas en los sistemas eléctricos se originan por la presencia de elementos no lineales los cuales distorsionan la corriente o el voltaje. Las características particulares de operación de cada elemento no lineal hace que las distorsiones ocasionadas en la corriente y el voltaje sean distintas para cada uno, tanto en su contenido armónico como en su contribución en el sistema eléctrico.

2.2 Elementos lineales y no lineales

En un sistema eléctrico existen elementos lineales y elementos no lineales. Tal clasificación se basa en la relación de proporción entre la corriente y el voltaje en un elemento. La gráfica de corriente vs. voltaje del elemento es de utilidad para determinar si la relación entre la tensión y la corriente es lineal o no [11].

Un elemento lineal es aquel cuyo voltaje entre sus terminales cambia en la misma proporción de la corriente que circula a través de él [2 y 6]. Esto implica que un elemento lineal demanda una corriente senoidal al sistema eléctrico cuando se le aplica una tensión senoidal.

Los resistores son elementos lineales porque demandan una corriente proporcional a la tensión aplicada. En el caso de los inductores y los capacitores, la corriente es proporcional al voltaje del elemento pero con un desfasamiento. La figura 2.1 muestra la gráfica de corriente contra voltaje en un elemento resistivo.



Figura 2.1

Figura 2.2

TESE CON Falla de origen

En los inductores y los capacitores la corriente no está en fase con el voltaje, por lo tanto la gráfica de corriente contra voltaje no es una recta. La gráfica para un elemento resistivo-inductivo o resistivo-capacitivo tiene una forma elíptica. En la figura 2.2 se muestra una gráfica de corriente vs. voltaje para un elemento resistivo inductivo con un ángulo de desfasamiento de 30° entre el voltaje y la corriente.

Un elemento no lineal es aquel que demanda una corriente no senoidal cuando se le aplica una tensión senoidal [7 y 15]. La figura 2.3 muestra que, la gráfica de corriente vs. voltaje para un elemento no lineal no tiene la forma de una línea recta o una elipse, que caracteriza a los elementos lineales.



En la figura 2.4 se muestra que, la forma de onda de la corriente que produce la curva de corriente vs. voltaje de la figura 2.3 tiene distorsión armónica y, por lo tanto, el dispositivo que genera esta corriente es considerado como no lineal.

Los elementos no lineales que forman parte de un sistema eléctrico pueden clasificarse de la siguiente manera [6]:

- 1. Dispositivos ferromagnéticos.
- 2. Convertidores estáticos de potencia.
- 3. Dispositivos a base de arco eléctrico.

Esta clasificación se basa en los principios físicos de funcionamiento de cada uno de estos elementos.

La primera categoría abarca las máquinas eléctricas que tienen devanados arrollados alrededor de un núcleo ferromagnético, que se caracteriza por ser un material saturable como transformadores, motores y generadores síncronos y motores de inducción [6].

Los convertidores estáticos de potencia, basados en la conmutación de dispositivos semiconductores de potencia, han tenido un amplio desarrollo y actualmente se les encuentra en controladores de velocidad para motores, en fuentes de alimentación, controles de iluminación,

1	TESIS CADIN	
	FALLA DE OTTOEN	

sistemas de energía ininterrumpida y sistemas de corriente directa de alto voltaje, etc, constituyendo la fuente más importante de distorsión armónica [6].

Los dispositivos a base de arco eléctrico comprenden a los hornos de arco y de inducción, las soldadoras eléctricas, el alumbrado fluorescente y el alumbrado a base de vapor de sodio y vapor de mercurio [6].

2.3 Dispositivos ferromagnéticos

2.3.1 Transformadores

La característica principal del núcleo de acero de un transformador es que su permeabilidad μ no es constante [16]. La figura 2.5 muestra una curva de magnetización típica a la corriente directa del acero laminado para transformadores.



La densidad de flujo B y la excitación magnética H se relacionan mediante la siguiente ecuación:

 $\mathbf{B} = \boldsymbol{\mu} \mathbf{H} \tag{2.1}$

Para valores pequeños de H, la permeabilidad μ del núcleo tiene un valor constante ocasionando que B sea proporcional a la excitación magnética; sin embargo, llega un momento en el que cualquier incremento en H ocasiona que B apenas cambie [5 y 16], esta es la condición de saturación del núcleo, que se caracteriza porque la permeabilidad del acero disminuye notablemente [16], como se puede apreciar en la figura 2.5.

Cuando el devanado primario de un transformador es excitado con una tensión senoidal, se obtiene la curva de histéresis característica de los materiales ferromagnéticos. En la figura 2.6 se muestra el ciclo de histéresis para un núcleo de acero laminado [17], en donde se aprecia la relación no lineal entre la excitación magnética y la densidad de flujo magnético en el núcleo.



Dispositivos generadores de distorsión armónica

En la figura 2.7 se muestran el ciclo de histéresis, el flujo magnético que circula por el núcleo y la corriente de excitación resultante de la relación no lineal entre la densidad de flujo, B, y la excitación magnética H; esta relación establece que se requiere un flujo senoidal para que la corriente tenga la forma mostrada en la figura, y del mismo modo, para que el flujo sea senoidal se requiere que la corriente tenga la forma mostrada en la figura. Al no ser lineal la relación entre la densidad de flujo B y la excitación magnética H la corriente de excitación no es senoidal aún cuando la tensión aplicada sea senoidal [8].

Si la tensión aplicada al devanado primario del transformador es senoidal, el flujo magnético también es senoidal [8]. La tensión inducida en el devanado secundario depende del flujo mútuo ϕ , si el flujo es senoidal la tensión inducida en el secundario también es senoidal.



Figura 2.7

Transformación monofásica

En la figura 2.8 se muestra la forma de onda de la corriente de excitación de un transformador monofásico de 3 kVA, alimentado con una tensión senoidal de 127 V a 60 Hz. Esta corriente tiene un valor eficaz de 2.67 A, un valor pico de 5.32 A y un factor de cresta aproximado de 2.0.

La figura muestra que la corriente de excitación tiene simetría de media onda y, por lo tanto, la magnitud de las armónicas pares es despreciable al compararlas con las componentes impares. La tercera armónica, que es la componente predominante, es el 41% de la fundamental, la quinta armónica tiene una magnitud del 10% de la fundamental, la séptima del 3% y la novena del 2%. Las demás componentes son de magnitudes despreciables.

Los valores de distorsión que alcanza la corriente de excitación del transformador son elevados. Para el caso de la unidad utilizada, su distorsión armónica total con respecto a la componente fundamental es del 39.16% y su principal componente es la tercera armónica. La magnitud de esta armónica, combinada con su ángulo de fase, provoca que la corriente de excitación sea alta y esbelta y con un factor de cresta elevado.



Las magnitudes de las componentes tercera, quinta y séptima, referidas en porcentaje de la componente fundamental, por lo regular caen dentro del siguiente intervalo [8], siempre y cuando la fuente de excitación sea senoidal:

3ª armónica:			10% al	60%
5ª armónica:			 0% al 3	30%
7ª armónica:			0% al 2	20%

Si el transformador está operando en la región de saturación, cualquier aumento pequeño en la tensión de alimentación provoca incrementos grandes en la corriente de excitación, haciendo que se deforme aún más, y que las armónicas alcancen valores elevados con respecto a la componente fundamental de la corriente [8].



Cuando se energiza en forma abrupta un transformador demanda una corriente distorsionada conocida como corriente de irrupción. La forma de onda de esta corriente depende de la densidad de

	TTT:	$\mathcal{A}_{\mathcal{A}}$	00	N
				ាកទា
TA T				<u></u>

flujo remanente en el núcleo y del valor instantáneo del voltaje al momento de energizar el transformador [8 y 18]. Esta corriente se caracteriza por tener inicialmente un alto contenido de segunda y cuarta armónicas [19].

Debido al flujo magnético remanente, al momento de energizar el transformador el flujo en el núcleo puede llegar ser más del doble del flujo normal [8 y 18]. Este valor excesivo de flujo provoca que el transformador entre en la zona de saturación del material magnético [18], demandando una corriente de irrupción muy elevada [8, 16 y 18] y con una distorsión armónica sumamente elevada. En la figura 2.10 se muestra la corriente de irrupción para la unidad monofásica de 3 kVA considerada anteriormente.

Transformación trifásica

La corriente de excitación para las transformaciones trifásicas tiene algunas variaciones con respecto a la transformación monofásica debido a:

- Los tipos distintos de conexión (delta o estrella) de los devanados.
- Los circuitos magnéticos formados por los núcleos de las unidades trifásicas (núcleos tipo columna y tipo acorazado).

Para ver los efectos de las conexiones sobre la corriente de excitación, se utilizó un banco trifásico formado a base de tres unidades monofásicas idénticas, en conexión estrella - estrella. De acuerdo a lo visto en el capítulo uno, es necesario que el neutro del primario del banco trifásico esté conectado con el neutro de la fuente de voltaje, para que las terceras armónicas de la corriente de excitación puedan circular a través del alimentador del primario.

La falta del neutro de retorno impide que las terceras armónicas de las corrientes de excitación circulen por el sistema y que las corrientes de excitación sean a base de una componente fundamental más quinta armónica y séptima armónica, básicamente [8]. La ausencia de la tercera armónica de corriente ocasiona que el flujo magnético no sea senoidal, de acuerdo a lo expuesto en la teoría de la transformación monofásica, y que tenga un alto contenido de tercera armónica [8].

Como el flujo que magnetiza al núcleo ya no es senoidal, las tensiones inducidas en el secundario del tranformador tampoco son senoidales y contienen un alto porcentaje de tercera armónica. El núcleo magnético de las unidades monofásicas constituye un circuito cerrado para que puedan circular las terceras armónicas del flujo [8], las cuales provocan distorsión en la tensión inducida del secundario del banco, ya que ésta depende del flujo magnético. De acuerdo a lo expuesto en el primer capítulo, las tensiones al neutro experimentan distorsión por tercera armónica, mientras que las tensiones entre fases carecen de esta componente y permanecen prácticamente senoidales.

En la figura 2.11 se muestra la corriente de excitación para un banco trifásico a base de tres unidades monofásicas, de 3 kVA cada una, en conexión estrella - estrella con el neutro del primario sin conectar al neutro de la red de alimentación. El espectro de la figura 2.12 muestra que la distorsión armónica de la corriente de excitación es menor con respecto al caso monofásico, por la magnitud casi despreciable de la tercera armónica. En este tipo de transformación, la quinta armónica tiene una amplitud del 24% de la componente fundamental, que es mayor a la que tiene en la transformación monofásica.



La tensión inducida entre fases se muestra en la figura 2.13 y aunque no tiene una forma de onda precisamente senoidal, su contenido armónico es reducido. La distorsión armónica total tiene un valor del 3.40% con respecto a la componente fundamental y al valor eficaz. La tensión inducida al neutro se muestra en la figura 2.14, donde se puede apreciar una elevada distorsión en la forma de onda, causada por tercera armónica. La distorsión armónica total para la tensión al neutro es de 53.44% con respecto a la componente fundamental y de 47.13% con respecto al valor eficaz.



Si el neutro del primario del banco trifásico se conecta con el neutro de la fuente, se tiene una trayectoria por donde pueden circular las terceras armónicas de la corriente de excitación. Esta circulación de terceras armónicas de corriente hace que el flujo magnético sea senoidal y que las tensiones inducidas en el secundario también lo sean.



En la figura 2.15 se muestra la forma de onda de la corriente de excitación del banco trifásico, para la condición expuesta en el párrafo anterior; en la figura 2.16 se muestra el análisis de espectro, donde se observa la presencia de la componente de tercera armónica de la corriente de excitación. Las tensiones al neutro del lado secundario del transformador se han vuelto prácticamente senoidales, como lo muestra la figura 2.18; la distorsión reducida de las tensiones entre fases disminuye aún más, como se observa en la figura 2.17, por la conexión del neutro del banco.



La corriente de irrupción para el banco trifásico a base de unidades monofásicas se presenta en las figuras 2.19 y 2.20 para los casos sin conexión entre el neutro del primario y el neutro de la fuente y con conexión respectivamente. Aunque el banco es igual y lo único que cambia en cada caso es la conexión del neutro del primario con el neutro de la fuente las formas de onda de las corrientes de



24 in 2.04 204 10 .10 -10 - 14 LB mad Dia .21.8-4 4 - - - 4 Dis 10 200 J IL CANNET I IL MOTOR ML PRIMA LO STATE 7 IN STATE OF STATE Figura 2.19 Figura 2.20

irrupción son diferentes para cada caso. Esta diferencia en las formas de onda ocasionada por el tipo de conexión provoca que el contenido espectral para cada caso sea distinto.

Transformador trifásico con núcleo de cinco columnas

Este transformador tiene un núcleo como el mostrado en la figura 2.21. La existencia de la cuarta y quinta columnas permite la circulación de terceras armónicas de flujo magnético en caso de que los devanados primario y secundario tengan conexión en estrella y el neutro de la estrella del primario no esté conectado con el neutro de la fuente, apareciendo terceras armónicas de voltaje en las tensiones de fase a neutro del secundario.







Figura 2.22

Transformador trifásico con núcleo de tipo acorazado

Este transformador tiene un núcleo como el mostrado en la figura 2.22; los yugos laterales que constituyen las partes del núcleo que envuelven a los devanados, permiten la circulación de terceras armónicas de flujo cuando la conexión de los devanados es estrella - estrella y el neutro del devanado

TE	20	CON
FALLA	DB	ORIGEN

primario no tiene conexión con el neutro de la fuente, apareciendo terceras armónicas de voltaje en las tensiones de fase a neutro del secundario.

2.3.2 Motores de inducción

En un motor de inducción, de forma semejante a un transformador, la permeabilidad μ del núcleo magnético no es constante y, por lo tanto, su corriente corriente de vacío también no es senoidal. Esta relación no lineal, entre la excitación magnética H y la densidad de flujo B de un motor de inducción, permite obtener una curva de magnetización similar a la curva de los transformadores.

Un motor de inducción tiene un entrehierro que provoca que las curvas de B vs. H sean distintas para un motor y un transformador de capacidades similares [16]. El entrehierro, además de ser un elemento lineal por ser de aire, tiene una reluctancia muy elevada que debilita el acoplamiento magnético entre el rotor y el estator, y provoca que para una cierta tensión un motor de inducción requiera una corriente de excitación mayor que un transformador para lograr un mismo nivel de flujo magnético [16].

En la figura 2.23 se presenta una comparación entre las curvas de magnetización de un transformador y un motor de inducción de capacidades similares [16]. Para un mismo valor de densidad de flujo B, un transformador y un motor de inducción tienen valores distintos de excitación magnética H. Para un mismo valor de la densidad de flujo, la excitación magnética de un motor de inducción es mayor a la un transformador.



Figura 2.23

La forma de onda de la figura 2.24 corresponde a la corriente de vacío de un motor de inducción de 3 HP. (2238 W) y, se observa que tiene menor distorsión armónica que la corriente del transformador monofásico de 3 kVA. La figura 2.25 muestra el espectro de magnitud de la corriente de vacío del motor de inducción, donde se observa que las armónicas características son la tercera, quinta y séptima, aunque existen otras componentes de orden superior de magnitud despreciable. La corriente



Dispositivos generadores de distorsión armónica

de vacio de este motor tiene un THD₁ del 7%, que comparado con el THD₁ del 40% del transformador monofásico de 3 KVA resulta ser mucho mas bajo, incluso aunque las capacidades de ambas máquinas no sean iguales.

La linealidad del entrehierro de los motores de inducción provoca que su corriente tenga una menor distorsión armónica que la de los transformadores.



2.4 Convertidores electrónicos de potencia

Los convertidores electrónicos son utilizados con el propósito de transformar la potencia eléctrica de una forma a otra [6], mediante la operación de interrupción y paso de energía eléctrica de los dispositivos electrónicos que forman parte de los convertidores.

La capacidad de la electrónica de potencia, de controlar cantidades de energía cada vez mayores con una gran eficiencia [20], ha propiciado su uso en una gran variedad de aplicaciones que requieren la conversión de potencia eléctrica.

Los convertidores electrónicos para el control de la potencia eléctrica constituyen la fuente actual más importante de generación de armónicas debido dos causas principales:

- Su operación se basa en el uso de elementos de estado sólido cuya característica principal es su operación no lineal.
- Su aplicación en una amplia variedad de equipos que incluyen computadoras, fotocopiadoras, impresoras, radios [7], televisores, equipo electrónico en general, sistemas de energía ininterrumpible (UPS), convertidores de CA a CD, variadores de velocidad, convertidores de CA a CA, entre otros, ha favorecido la difusión de las armónicas que generan estos equipos en los sistemas eléctricos de potencia.

2.4.1 Rectificador monofásico de onda completa

En la figura 2.26 se muestra un rectificador tipo puente alimentado con una tensión senoidal, cuya carga es un inductor con un valor muy elevado de inductancia, de forma que la corriente en el lado de directa sea constante y libre de ondulaciones; esta condición se muestra en la figura 2.27b.



Figura 2.26

 $a_0 = \frac{1}{T} \int f(t) dt$

Figura 2.27

Como la corriente en el lado de alterna no es senoidal se puede representar mediante una serie de Fourier. La serie trigonométrica de Fourier, para cualquier forma de onda periódica no senoidal, se expresa mediante la siguiente ecuación [21]:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t))$$
(2.2)

en donde:

$$a_{n} = \frac{2}{T} \int_{0}^{0} f(t) \cos(n\omega t) dt y$$

$$b_{n} = \frac{2}{T} \int_{0}^{T} f(t) \sin(n\omega t) dt .$$

Para obtener la serie de Fourier de la corriente en el lado de alterna del rectificador se requiere que sea modelada como una función. De la figura 2.27a se puede obtener el siguiente modelo matemático para la corriente del rectificador:



Dispositivos generadores de distorsión armónica

$$\mathbf{i}(t) = \begin{cases} 1 & 0 \le t < \frac{T}{2} \\ -I & \frac{T}{2} \le t < T \end{cases}$$

Para efectos de ilustrar el cálculo de los coeficientes se prescindirá de las propiedades de simetría de la serie de Fourier.

La componente de corriente directa a_0 se calcula como:

$$a_{0} = \frac{1}{T} \int_{0}^{T} i(t)dt = \frac{1}{T} \left(\int_{0}^{T/2} Idt - \int_{T/2}^{T} Idt \right) = \frac{1}{T} \left(1\frac{T}{2} - I\frac{T}{2} \right) = 0$$
$$a_{0} = 0$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt = \frac{2}{T} \left(\int_0^{T/2} I \cos(n\omega t) dt - \int_{T/2}^T I \cos(n\omega t) dt \right)$$

Si $u = n\omega t$, $du = n\omega dt$

$$a_{n} = \frac{2I}{T} \left(\int_{0}^{T/2} \cos(u) \frac{du}{n\omega} - \int_{T/2}^{T} \cos(u) \frac{du}{n\omega} \right) = \frac{2I}{T\omega n} \operatorname{sen}(u) \Big|_{0}^{T/2} - \frac{2I}{T\omega n} \operatorname{sen}(u) \Big|_{T/2}^{T}$$

sustituyendo $u = n\omega t$

$$a_{n} = \frac{21}{T\omega n} \left(\operatorname{sen} \left(n\omega \frac{T}{2} \right) - \operatorname{sen} (n\omega 0) - \operatorname{sen} (n\omega T) + \operatorname{sen} \left(n\omega \frac{T}{2} \right) \right)$$

pero $\omega = \frac{2\pi}{T}$, entonces:

$$a_{n} = \frac{2I}{T\frac{2\pi}{T}n} \left(\operatorname{sen}\left(n\frac{2\pi}{T}\frac{T}{2}\right) - 0 - \operatorname{sen}\left(n\frac{2\pi}{T}T\right) + \operatorname{sen}\left(n\frac{2\pi}{T}\frac{T}{2}\right) \right) = \frac{1}{n\pi} \left(\operatorname{sen}(\pi n) - \operatorname{sen}(2\pi n) + \operatorname{sen}(\pi n)\right)$$

 $a_n = 0$ para cualquier valor de n

	TE:		001
FAL	h.A.	DE	ORIGEN

Dispositivos generadores de distorsión armónica

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \operatorname{sen}(n\omega t) dt = \frac{2}{T} \left(\int_0^{T/2} I \operatorname{sen}(n\omega t) dt - \int_{T/2}^T I \operatorname{sen}(n\omega t) dt \right)$$

si $u = n\omega t$, $du = n\omega dt$

$$\mathbf{b}_{n} = \frac{21}{T} \left(\int_{0}^{T/2} \operatorname{scn}(\mathbf{u}) \frac{d\mathbf{u}}{n\omega} - \int_{T/2}^{T} \operatorname{scn}(\mathbf{u}) \frac{d\mathbf{u}}{n\omega} \right) = -\frac{21}{T\omega n} \cos(\mathbf{u}) \Big|_{0}^{T/2} + \frac{21}{T\omega n} \cos(\mathbf{u}) \Big|_{T/2}^{T}$$

sustituyendo $u = n\omega t$

$$b_{n} = \frac{2I}{T\omega n} \left(-\cos\left(n\omega \frac{T}{2}\right) + \cos(n\omega 0) + \cos(n\omega T) + \cos\left(n\omega \frac{T}{2}\right) \right)$$

pero $\omega = \frac{2\pi}{T}$, entonces: $b_{n} = \frac{21}{T\frac{2\pi}{T}n} \left(-\cos\left(n\frac{2\pi}{T}\frac{T}{2}\right) + 1 + \cos\left(n\frac{2\pi}{T}T\right) + \cos\left(n\frac{2\pi}{T}\frac{T}{2}\right) \right)$ $b_{n} = \frac{1}{n\pi} \left(-\cos(\pi n) + 1 + \cos(2\pi n) - \cos(\pi n) \right)$ $b_{n} = \frac{41}{n\pi} \text{ para } n = 1, 3, 5, 7, ...$

Con los resultados encontrados para a_0 , a_n , y b_n , la serie de Fourier de la corriente en el lado de corriente alterna del rectificador monofásico es [6]:

$$i_{L}(t) = i(t) = \frac{41}{\pi} \left(\frac{scn(\omega t)}{1} + \frac{scn(3\omega t)}{3} + \frac{scn(5\omega t)}{5} + \frac{scn(7\omega t)}{7} + \dots \right)$$
(2.3)

De la ecuación 2.3 se pueden obtener las siguientes conclusiones para el rectificador analizado:

33

 Las componentes armónicas impares, cuyo orden puede ser expresado como n = 2k-1, para k = 1, 2, 3, ..., son consideradas características de este tipo de rectificador por aparecer en su espectro.



- Las componentes armónicas pares, cuyo orden puede ser expresado como n = 2k, para k
 = 1, 2, 3, ... no son características de este tipo de rectificador, por estar ausentes de su espectro.
- La amplitud de las componentes armónicas decrece conforme aumenta su orden.

2.4.2 Rectificador trifásico de seis pulsos

Un rectificador trifásico de seis pulsos a base de diodos se muestra en la figura 2.28; su carga es una inductancia de valor muy elevado para que la corriente esté libre de ondulaciones.



Figura 2.28



Figura 2.29



De la figura 2.29, la corriente se define mediante la siguiente ecuación:

$$i_{L}(t) = \begin{cases} 1 & 0 \le t < T/6 \\ 0 & T/6 \le t < 2T/6 \\ -1 & 2T/6 \le t < 4T/6 \\ 0 & 4T/6 \le t < 5T/6 \\ 1 & 5T/6 \le t < 6T/6 \end{cases}$$

Los coeficientes de la serie de Fourier pueden ser obtenidos aprovechando sus propiedades de simetría. Existen varios tipos de simetría: de función par, de función impar y de media onda (vista en el primer capítulo).

Una función f(t) tiene simetría par cuando cumple la siguiente condición [22]:

$$f(t) = f(-t)$$

Cuando una función f(t) presenta simetría par, los coeficientes de la serie trigonométrica de Fourier se calculan de la siguiente forma [22]:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} f(t) dt$$
$$a_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} \frac{f(t)\cos(n\omega t)}{dt}$$

 $b_{n} = 0$

Por otra parte, una función f(t) tiene simetría impar cuando cumple con la siguiente condición [22]:

$$-f(t) = f(-t)$$

Cuando una función f(t) presenta simetría impar, los coeficientes de la serie trigonométrica de Fourier se calculan de la siguiente forma [22]:



$$b_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(t) \operatorname{sen}(n\omega t) dt$$

Observando la forma de onda de la figura 2.29 se puede apreciar que la corriente tiene simetría de función par, ya que f(t) = f(-t). Por otra parte, la corriente también tiene simetría de media onda y, por lo tanto, no existen armónicas pares y la componente de corriente directa es cero.

Aplicando las propiedades de simetría, al cálculo de la serie de Fourier de la corriente del rectificador, los coeficientes se calculan del modo siguiente:

 $a_0 = 0$ por tener simetría de media onda

$$a_n = \frac{4}{T} \int_{0}^{T/2} i(t) \cos(n\omega t) dt$$

$$a_{n} = \frac{4}{T} \left[\int_{0}^{T/6} I \cos(n\omega t) dt + \int_{T/3}^{T/2} - I \cos(n\omega t) dt \right] = \frac{4}{T} \left[I \int_{0}^{T/6} \cos(n\omega t) dt - I \int_{2T/6}^{3T/6} \cos(n\omega t) dt \right]$$

$$\mathbf{a}_{n} = \frac{41}{T} \left[\int_{0}^{T/6} \cos(n\omega t) dt - \int_{T/3}^{T/2} \cos(n\omega t) dt \right] = \frac{41}{T} \left[\frac{\sin(n\omega t)}{n\omega} \Big|_{0}^{T/6} - \frac{\sin(n\omega t)}{n\omega} \Big|_{T/3}^{T/2} \right]$$

$$a_{n} = \frac{41}{n\omega T} \left[\left(\operatorname{sen} \left(n\omega \frac{T}{6} \right) - \operatorname{sen} (n\omega 0) \right) - \left(\operatorname{sen} \left(n\omega \frac{T}{2} \right) - \operatorname{sen} \left(n\omega \frac{T}{3} \right) \right) \right]$$

pero $\omega = \frac{2\pi}{T}$, entonces:

$$a_n = \frac{41}{n\frac{2\pi}{T}T} \left[\operatorname{sen}\left(n\frac{2\pi}{T}\frac{T}{6}\right) - \operatorname{sen}(0) - \operatorname{sen}\left(n\frac{2\pi}{T}\frac{T}{2}\right) + \operatorname{sen}\left(n\frac{2\pi}{T}\frac{T}{3}\right) \right]$$

$$a_n = \frac{2i}{n\pi} \left[\operatorname{sen} \left(n \frac{\pi}{3} \right) - \operatorname{sen} \left(n \pi \right) + \operatorname{sen} \left(n \frac{2\pi}{3} \right) \right]$$



Dispositivos generadores de distorsión armónica

$$a_n = \frac{21}{n\pi} \left[\operatorname{sen} \left(n \frac{\pi}{3} \right) + \operatorname{sen} \left(n \frac{2\pi}{3} \right) \right] \text{ para } n = 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, .$$

 $a_n = 0$ para n = 2, 4, 6, 8, 10 ... por tener simetría de media onda

 $b_n = 0$ por tener simetría de función par

Los valores calculados de an para distintos valores de n se muestran en la tabla 2.1.

	and the second	 A state of the sta	and the second
n	$\operatorname{sen}\left(n\frac{\pi}{3}\right)$	$\operatorname{sen}\left(n\frac{2\pi}{3}\right)$	a _n
1	$\sqrt{3}/2$	√3/2	$\frac{2\sqrt{3}}{1\pi}$
2	$\sqrt{3}/2$	$-\sqrt{3}/2$	0
3	0	0	0
4	$-\sqrt{3}/2$	$\sqrt{3}/2$	0
5	$-\sqrt{3}/2$	- \sqrt{3}/2	$-\frac{2\sqrt{3}}{5\pi}$ I
6	0	0	0
7	$\sqrt{3}/2$	√3/2	$\frac{2\sqrt{3}}{7\pi}I$
8	$\sqrt{3}/2$	- \sqrt{3}/2	0
9	0	· · · 0	0
10	- \sqrt{3}/2	$\sqrt{3}/2$	0
11	$-\sqrt{3}/2$	- \sqrt{3}/2	$-\frac{2\sqrt{3}}{11\pi}I$
12	0		~ 1000 and ~ 0 (see the formula ~ 1000
13	√3/2	√3/2	$\frac{2\sqrt{3}}{13\pi}$

Tabla 2.1 Cálculo de los valores de an

Con los resultados calculados para a_0 , a_n , y b_n la serie de Fourier de la corriente del rectificador trifásico de seis pulsos es [21]:

$$i_{1.}(t) = i(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[\frac{\cos(1\omega t)}{1} - \frac{\cos(5\omega t)}{5} + \frac{\cos(7\omega t)}{7} - \frac{\cos(11\omega t)}{11} + \frac{\cos(13\omega t)}{13} - \dots \right]$$
(2.4)

De la ecuación anterior se pueden obtener las siguientes conclusiones para el rectificador trifásico analizado:

- Las componentes armónicas impares, cuyo orden es n = 6k ± 1 para k = 1, 2, 3, ..., son consideradas características de este tipo de rectificador por aparecer en el espectro de la corriente.
- Las componentes armónicas múltiplos de tres, cuyo orden es n = 3k para k = 1, 2, 3, ..., son consideradas no características de este tipo de rectificador por no aparecer en el espectro de la corriente.
- Las componentes armónicas pares, cuyo orden es n = 2k para k = 1, 2, 3, ..., son consideradas no características de este tipo de rectificador por no aparecer en el espectro de la corriente.
- Las armónicas cuyo orden es n = 6k + 1 son de secuencia positiva.
- Las armónicas cuyo orden es n = 6k 1 son de secuencia negativa.
- La amplitud de las componentes armónicas decrece con el orden de la componente.

Si las tensiones entre fases estuvieran desbalanceadas el rectificador también inyectaría armónicas triples en la línea de corriente alterna [14].

2.4.3 Rectificador trifásico de seis pulsos con un transformador delta-estrella a la entrada

Ahora se plantea el caso de un rectificador trifásico de 6 pulsos con un transformador en conexión delta - estrella a la entrada del mismo, el cual es mostrado en la figura 2.30.



Figura 2.30

Las corrientes de entrada del rectificador se pueden expresar mediante la ecuación 2.4, tomando a la corriente i_a como referencia:



$$i_{b}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I \left(\frac{\cos(\omega t - 2\pi\sqrt{3}) - \frac{1}{5}\cos(5(\omega t - 2\pi\sqrt{3})) + \frac{1}{7}\cos(7(\omega t - 2\pi\sqrt{3})) - \frac{1}{11}\cos(11(\omega t - 2\pi\sqrt{3})) + \frac{1}{13}\cos(11(\omega t - 2\pi\sqrt{3})) - \frac{1}{11}\cos(11(\omega t - 2$$

$$i_{c}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[\frac{\cos(\omega t + 2\pi/3) - \frac{1}{5}\cos(5(\omega t + 2\pi/3)) + \frac{1}{7}\cos(7(\omega t + 2\pi/3)) - \frac{1}{11}\cos(1!(\omega t + 2\pi/3)))}{+ \frac{1}{13}\cos(13(\omega t + 2\pi/3)) - \dots} \right]$$

Sabiendo que la relación de transformación del transformador está dada por:

$$\frac{V_{AB}}{V_a} = \frac{N_1}{N_2} = a$$
(2.5)

Considerando que $V_{ab} = V_{AB}$, la relación de transformación del transformador puede expresarse como a = $\frac{V_{AB}}{V_{ab}/\sqrt{3}} = \sqrt{3}$ esto implica que $\frac{N_1}{N_2} = \sqrt{3}$ y por lo tanto $N_1 = \sqrt{5}N_2$. Esto significa que los devanados del lado primario deben tener $\sqrt{3}$ veces más vueltas que los devanados del lado secundario [21] y, por lo tanto, la relación de transformación es a = $\sqrt{3}$.

La relación de transformación de corriente para una fase cualquiera del transformador se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\mathbf{I}_{AB}}{\mathbf{I}_{a}} = \frac{\mathbf{I}_{BC}}{\mathbf{I}_{b}} = \frac{\mathbf{I}_{CA}}{\mathbf{I}_{c}} = \frac{1}{a}$$
(2.6)

Para calcular la corriente de línea i_A se requiere conocer las corrientes i_{AB} e i_{CA} debido a que $i_A=i_{AB}-i_{CA}$.

Aplicando la relación de transformación, las corrientes de los devanados primarios son:

$$i_{AII}(t) = \frac{i_{a}(t)}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\pi} I \left(\cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) - \dots \right)$$
$$i_{BC}(t) = \frac{i_{b}(t)}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\pi} I \left(\frac{\cos(\omega t - 2\pi/3) - \frac{1}{5} \cos(5(\omega t - 2\pi/3)) + \frac{1}{7} \cos(7(\omega t - 2\pi/3))}{-\frac{1}{11} \cos(11(\omega t - 2\pi/3)) + \frac{1}{13} \cos(13(\omega t - 2\pi/3))} - \dots \right)$$



Dispositivos generadores de distorsión armónica

$$i_{CA}(t) = \frac{i_{c}(t)}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\cos(\omega t + 2\pi/3) - \frac{1}{5}\cos(5(\omega t + 2\pi/3)) + \frac{1}{7}\cos(7(\omega t + 2\pi/3))}{-\frac{1}{11}\cos(11(\omega t + 2\pi/3)) + \frac{1}{13}\cos(13(\omega t + 2\pi/3)) - \dots} \right]$$

haciendo las simplificaciones de los ángulos de desfasamiento la corriente ica se expresa como:

$$i_{CA}(t) = \frac{i_{c}(t)}{\sqrt{3}} = \frac{2}{\pi} \left[\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1}{5}\cos\left(5\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{7}\cos\left(7\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1}{11}\cos\left(11\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{13}\cos\left(13\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) - \dots \right] \right]$$

entonces i_A se obtiene haciendo $i_A = i_{AB} - i_{CA}$:

$$i_{A}(t) = i_{AB}(t) - i_{CA}(t) = \frac{2}{\pi} \left[\begin{pmatrix} \cos(\omega t) - \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{pmatrix} + \frac{1}{5} (\cos(5\omega t - 2\pi/3) - \cos(5\omega t)) \\ + \frac{1}{7} (\cos(7\omega t) - \cos(7\omega t + 2\pi/3)) + \frac{1}{11} (\cos(11\omega t - 2\pi/3) - \cos(11\omega t)) \\ + \frac{1}{13} (\cos(13\omega t) - \cos(13\omega t + 2\pi/3)) - \dots \end{pmatrix} \right]$$

$$H_{A}(t) = \frac{2}{\pi} I \left\{ \frac{\sqrt{3}\cos(\omega t - \frac{\pi}{6}) + \frac{\sqrt{3}}{5}\cos(5\omega t - \frac{5\pi}{6}) + \frac{\sqrt{3}}{7}\cos(7\omega t - \frac{\pi}{6}) + \frac{\sqrt{3}}{11}\cos(11\omega t - \frac{5\pi}{6})}{+ \frac{\sqrt{3}}{13}\left(\cos(13\omega t - \frac{\pi}{6})\right) + \dots} \right\}$$

$$i_{A}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I \left(\frac{\cos(\omega t - \frac{\pi}{6}) + \frac{1}{5}\cos(5\omega t - \frac{5\pi}{6}) - \frac{1}{7}\cos(7\omega t + \frac{5\pi}{6}) - \frac{1}{11}\cos(11\omega t + \frac{\pi}{6})}{+\frac{1}{13}(\cos(13\omega t - \frac{\pi}{6})) + \dots} \right)$$
(2.7)

Por lo regular la ecuación que se utiliza para expresar a la corriente $i_A(t)$ en el lado primario del transformador del rectificador deseis pulsos es:

$$i_{\Lambda}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I\left(\cos(\omega t) + \frac{1}{5}\cos(5\omega t) - \frac{1}{7}\cos(7\omega t) - \frac{1}{11}\cos(11\omega t) + \frac{1}{13}\cos(13\omega t) + \dots\right)$$
(2.8)

El desfasamiento, ocasionado por el transformador con conexión delta - estrella, no es tomado en cuenta en la ecuación 2.8, la cual se obtiene al sumar los resultados de la serie de Fourier de un pulso de ancho π y de un pulso de ancho $\pi/3$ [6], sin considerar que la corriente i_A(t) se produce por la diferencia de las corrientes i_{AB}(t) e i_{CA}(t) y ésta produce un desfasamiento de $\pi/6$.



De ambas ecuaciones se pueden obtener las siguientes conclusiones para el rectificador trifásico analizado:

- Las componentes armóneas impares, euyo orden es n = 6k±1 para k = 1, 2, 3, ..., son consideradas características de este tipo de rectificador por estar presentes en el espectro de la corriente.
- Las componentes armónicas múltiplos de tres, cuyo orden es n = 3k para k = 1,2, 3, ..., son consideradas no características de este tipo de rectificador por no estar presentes en el espectro de la corriente.
- Las componentes armónicas pares, cuyo orden es n = 2k para k = 1, 2, 3, ..., son consideradas no características de este tipo de rectificador por no estar presentes en el espectro de la corriente.
- · La amplitud de las componentes armónicas decrece conforme aumenta su orden.

Las formas de onda de las corrientes i_{AB} , i_{BC} i_{CA} , c i_A , considerando un número infinito de componentes armónicas, se muestran en la figura 2.31

En la figura 2.32 se muestra una forma de onda real para la corriente de entrada medida en el primario del transformador delta - estrella de un rectificador de seis pulsos. La figura está afectada por otras armónicas de orden superior, sin embargo puede observarse la gran similitud entre la forma de onda real y la forma de onda teórica.



Figura 2.31

En la figura 2.33 se muestra el espectro para la corriente de la figura 2.32, se observa que las armónicas definidas como características tales como la 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, etc. corresponden a las calculadas en forma teórica. Una armónica no característica, la tercera, está presente en el espectro debido a que los voltajes en el circuito donde se hizo la medición están desbalanceados.





2.4.4 Rectificador trifásico de doce pulsos

Un rectificador trifásico de doce pulsos se conforma mediante el arreglo de dos rectificadores trifásicos de seis pulsos; un rectificador tiene un transformador estrella - estrella a la entrada mientras que el otro rectificador tiene un transformador delta - estrella a la entrada, con el objetivo atrasar 30 grados las tensiones aplicadas al rectificador conectado a este transformador [21]. En la figura 2.34 se muestra un esquema del rectificador de doce pulsos el cual requiere que el sistema de control de disparo de los SCR's para sus rectificadores de 6 pulsos sea el mismo.

La corriente $i_{A1}(t)$ se expresa mediante la ecuación 2.4 y la corriente $i_{A2}(t)$ se expresa mediante la ecuación 2.8, la corriente total $i_A(t)$ es la suma de las corrientes $i_{A1}(t)$ y $i_{A2}(t)$

$$i_{A}(t) = i_{A1}(t) + i_{A2}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} l \left(\cos(\omega t) - \frac{\cos(5\omega t)}{5} + \frac{\cos(7\omega t)}{7} - \frac{\cos(11\omega t)}{11} + \frac{\cos(13\omega t)}{13} - \dots \right) + \frac{2\sqrt{3}}{\pi} l \left(\cos(\omega t) + \frac{1}{5}\cos(5\omega t) - \frac{1}{7}\cos(7\omega t) - \frac{1}{11}\cos(11\omega t) + \frac{1}{13}(\cos(13\omega t)) + \dots \right) \\ i_{A}(t) = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} l \left(\cos(\omega t) - \frac{\cos(11\omega t)}{11} + \frac{\cos(13\omega t)}{13} - \frac{\cos(23\omega t)}{23} + \frac{\cos(25\omega t)}{25} \dots \right)$$
(2.9)

De la ecuación 2.9 se pueden obtener las siguientes conclusiones para el rectificador trifásico de 12 pulsos :

42

 Las componentes armóneas impares, cuyo orden es n = 12k±1 para k = 1, 2, 3, ..., son consideradas características de este tipo de rectificador por estar presentes en el espectro de la corriente.



- Las componentes armónicas múltiplos de tres, cuyo orden es n = 3k para k = 1, 2, 3, ..., son consideradas no características de este tipo de rectificador por no estar presentes en el espectro de la corriente.
- Las componentes armónicas pares, cuyo orden es n = 2k para k = 1, 2, 3, ..., son consideradas no características de este tipo de rectificador por no estar presentes en el espectro dela corriente.
- Las componentes armónicas quinta, séptima, décimo séptima, décimo novena, etc. únicamente circulan entre los rectificadores y los transformadores sin pasar a la red eléctrica.
- La amplitud de las componentes armónicas decrece conforme aumenta su orden.





En la figura 2.35 se muestra la forma de onda de la corriente $i_A(t)$ tomando un número infinito de componentes para la ecuación 2.9

2.4.5 Rectificadores trifásicos con un mayor número de pulsos

Se pueden utilizar configuraciones con más transformadores para lograr un mayor número de pulsos a base de ir disminuyendo los desfasamientos entre los transformadores. Una configuración de 24 pulsos, cuyas armónicas características son $n = 24k \pm 1$, para cualquier valor de k, requiere de cuatro transformadores con 15° de desfasamiento; una configuración de 48 pulsos, cuyas armónicas características son $n = 48k \pm 1$, para cualquier valor de k, necesita ocho transformadores con 7.5° de

		CON
FALLS.	DE	ORIGEN

desfasamiento. Las configuraciones de este tipo son muy utilizadas en plantas rectificadoras de gran potencia, como en Cloro de Tehuantepec, cuya demanda es mayor a 110 MW.



Figura 2.35

2.5 Dispositivos a base de arco eléctrico

Los dispositivos a base de arco eléctrico, actualmente distribuidos ampliamente en los sistemas eléctricos, abarcan las lámparas de alumbrado fluorescente, las lámparas de vapor de sodio y de vapor de mercurio, los hornos de arco y las soldadoras eléctricas. A nivel individual, los hornos de arco constituyen la mayor fuente de generación de armónicas a base de arco eléctrico, sin embargo, el uso del alumbrado fluorescente lo convierte en la fuente de generación de armónicas a base de arco eléctrico con mayor distribución.

2.5.1 Alumbrado fluorescente

A base de balastra electromagnética

El alumbrado fluorescente tiene como elemento principal a una lámpara en forma de cilindro circular que puede ser en forma de U, recto o en cualquier otra configuración.

Cuando la lámpara es energizada se produce una corriente eléctrica que corre a través de los electrodos calentándolos y haciendo que liberen electrones del material emisivo con el cual están recubiertos. Los electrones que se liberan por la diferencia de potencial que existe entre los electrodos viajan a velocidades muy altas dentro del tubo, desde un electrodo a otro, estableciendo un arco eléctrico a través del vapor de mercurio, en el interior de la lámpara [23].

Para que la lámpara pueda operar correctamente se requiere de un accesorio especial denominado balastra, que tiene la función de suministrar el voltaje de arranque necesario y limitar la corriente a través de la lámpara, si no se controlara la corriente del arco ésta alcanzaría valores tan elevados que la lámpara se autodestruiría; para este fin, las balastras electromagnéticas utilizan un autotransformador o una bobina de reactancia [23]. La característica no lineal de la balastra, junto con la naturaleza aleatoria del arco, ocasionan que la corriente tenga distorsión. Aunque no se tienen

PALES DE ORI**gen**

expresiones analíticas para describir el comportamiento de la corriente, se ha visto que la componente armónica de mayor amplitud en este tipo de lámparas es la tercera [3].

En la figura 2.36 se muestra la forma de onda de la corriente de una balastra electromagnética que alimenta dos lámparas fluorescentes de 39 W de tipo T-12. La figura 2.37 muestra el espectro de la corriente de la balastra electromagnética siendo notable el predominio de las componentes armónicas tercera y quinta, aunque también existen otras componentes impares de menor magnitud presentes en el espectro como la séptima y novena. La corriente no tiene simetría de media onda y por este motivo aparecen armónicas pares en el espectro como la cuarta, sexta, octava y décima



La medición realizada a esta corriente con un analizador de espectro proporcionó los siguientes datos:

 $l_{rms} = 0.42 \text{ A}$ $l_p = 0.74 \text{ A}$ THD₁rms = 21.40 % THD₁ = 21.90 % fc = 1.75

El valor pico de la corriente es un 23% mayor al de una corriente senoidal con el mismo valor eficaz, mientras que la distorsión armónica alcanzó un valor del 21%. En las instalaciones donde se encuentren grandes cantidades de lámparas fluorescentes con este tipo de balastra, los porcentajes de distorsión de la corriente pueden ser muy elevados y, se puede tener distorsión en el voltaje, generada por un aplanamiento en sus valles y crestas por la caída de tensión que producen los valores de pico tan elevados de la corriente. También es posible que en los conductores neutros circule mas corriente que en los conductores de fase.

A base de balastra electrónica

Una balastra electrónica tiene como ventajas un ruido de operación prácticamente nulo, una menor temperatura de operación que implica una menor cantidad de calor disipado y una operación mas eficiente [6 y 7].

La balastra electrónica cambia la frecuencia de la línea elevándola a frecuencias que van de 20 a 60 kHz. La operación a esta frecuencia evita el problema de resonancia que se presenta en las balastras

45	TESIS CON
	FALLA DE ORIGEN
Say - Considerant, Sa	

electromagnéticas: la lámpara funciona en una forma más eficiente, proporcionando una mejor respuesta de lúmenes por watts consumidos, gracias a la mayor excitación que se produce en los electrones con el aumento de frecuencia [7].

En la figura 2.38 se muestra la forma de onda de la corriente de una balastra electrónica que alimenta dos lámparas fluorescentes de 32 W de tipo T-8. En la figura 2.39 se muestra el espectro de la corriente de la balastra electrónica, siendo notable el predominio de la tercera componente armónica, se observa que también existen otras componentes impares presentes en el espectro como la quinta, séptima, novena, décimo tercera y décimo novena, de las cuales la quinta armónica es la de mayor magnitud. El espectro muestra que también existen componentes pares como la cuarta, décima segunda. décima cuarta, entre otras,



Figura 2.38

Figura 2.39

La medición realizada a esta corriente con un analizador de espectro proporcionó los siguientes datos:

 $THD_{true} = 14.80 \%$ $I_{mr} = 0.45 A$ $I_{-} = 0.61 \text{ A}$ $THD_1 = 14.90$ % fc = 1.36

La distorsión armónica del 14% en la corriente, aunque es elevada, es mucho menor que la mostrada en la corriente de la balastra electromagnética. Incluso el valor de pico de esta corriente es un 4% menor al valor de pico de una corriente senoidal con el mismo valor eficaz. Este tipo de lámpara, además de los beneficios operativos que ofrece, genera menos distorsión armónica en la corriente y en el voltaje.

2.5.2 Alumbrado de vapor de mercurio

Las lámparas de vapor de mercurio consisten de dos bulbos, uno interior por el cual circula el arco eléctrico denominado "tubo de arco", que contiene vapor de mercurio y gas argón y uno exterior que contiene nitrógeno [23]. La balastra de este tipo de lámparas utiliza un autotransformador que tiene una serie de derivaciones, que permiten la operación de la lámpara a diferentes tensiones de alimentación. La función de la balastra, que es similar a la de una lámpara fluorescente, es controlar la

TES	SIS	CON
FALLA	DE	ORIGEN

tensión del bulbo y regular la corriente requerida por el arco de forma que la lámpara no se autodestruya por un consumo excesivo de corriente.

Para ver el tipo de distorsión generada en la corriente por este tipo de alumbrado se hizo una medición en un circuito que alimenta a varias lámparas de vapor de mercurio de 175 W con una tensión de alimentación de 220 V. En la figura 2.40 se muestra la forma de onda de la corriente de las balastras de este tipo de lámpara y se observa que existe distorsión. El análisis de espectro de la figura 2.41 de esta forma de onda muestra que las componentes armónicas más significativas son la segunda, tercera, cuarta, quinta y séptima, aunque también están presentes en magnitudes poco significativas las componentes novena, décima primera, décima quinta, entre otras.







Las figuras de mérito muestran que este tipo de lámpara tiene una distorsión menor que las lámparas fluorescentes, ya sean de balastra electromagnética o de balastra electrónica. El factor de cresta de 1.53 indica que el pico de esta corriente es un 8% mayor al pico de una corriente senoidal con el mismo valor eficaz, lo que puede provocar caídas de tensión con distorsión, aunque en un grado menor que las lámparas fluorescentes con balastra electromagnética.

2.5.3 Soldadoras eléctricas

Una soldadora eléctrica se compone de un transformador que cambia el nivel de tensión de la línea de alimentación a la tensión que es entregada al electrodo. Algunas soldadoras pueden entregar al electrodo una tensión de corriente alterna o una tensión de corriente directa, las cuales son menores a la tensión de alimentación.

Un cable de referencia, generalmente conocido como tierra, se conecta en la masa metálica que se desea soldar y en la punta con potencial se coloca el electrodo. El electrodo tiene un centro metálico hecho de soldadura que está envuelta de un material fundente. Al aplicar el electrodo a la masa metálica, se crea un arco eléctrico que funde la soldadura uniendo las dos piezas metálicas que se desean soldar.

En la figura 2.42 se muestra una parte de la forma de onda de la corriente de una soldadora eléctrica, donde se observa claramente la distorsión debida al arco eléctrico. El semiciclo negativo al centro de la gráfica tiene un valor de pico mayor a cualquiera de los otros dos semiciclos negativos, cuyos valores también difieren entre sí; se observa también que los semiciclos positivos tienen valores de pico distintos.



En la figura 2.43 se muestra el espectro de la corriente donde se observa la existencia de componentes armónicas impares y pares aunque las dominantes son las impares. Las componentes de magnitud considerable son la tercera y la quinta, mientras que las componentes de poca magnitud son la segunda, cuarta, sexta, séptima, novena y décimo primera. El factor de cresta para esta forma de onda fue elevado, sin embargo este valor no es constante, porque, debido a la naturaleza aleatoria del arco, este comportamiento cambia ciclo tras ciclo, ocasionando que las figuras de mérito tomen distintos valores.

2.5.4 Hornos de arco

Las componentes armónicas de los hornos de arco son impredecibles debido al comportamiento aleatorio del arco eléctrico, el cual cambia de forma ciclo tras ciclo [12], especialmente durante la etapa de fundición [6 y 12], por el movimiento de las partes metálicas que se están fundiendo [6]. La no periodicidad del arco eléctrico produce componentes armónicas de orden entero e interarmónicas [12], que pueden producir interferencia en las portadoras de señal que viajan por los conductores de las redes de potencia, y generar flicker en pantallas de tubos de rayos catódicos [24].

Las mediciones efectuadas en hornos de arco han demostrado que las componentes armónicas de orden entero, desde la segunda hasta la décimo séptima, predominan sobre las componentes armónicas de orden no entero, también se ha observado que la amplitud de las armónicas disminuye con el orden [12].



En las figuras 2.44 y 2.46 se muestran las formas de onda de la corriente de un horno de arco durante el proceso de fundición. El análisis de espectro de la corriente de la figura 2.44 se muestra en la figura 2.45, donde se puede observar la elevada distorsión armónica de la corriente y la presencia de componentes de diversos órdenes. La operación aleatoria del arco ocasiona que incluso la frecuencia fundamental sea, en ese instante de tiempo, de 77 Hz. En el análisis de espectro de la figura 2.47, correspondiente a la corriente de la figura 2.46, se observa una menor distorsión en la corriente cuya componente fundamental es de 63 Hz. En ambos espectros se aprecia la presencia de componentes armónicas en la corriente del horno de arco.

TEME CON FALLA DE ORIGEN
3.1 Introducción

Las componentes armónicas no solo distorsionan las corrientes y los voltajes. Cuando éstas se propagan a través del sistema crean una serie de efectos colaterales, que incluyen el aumento de pérdidas y operación inadecuada de equipos electrónicos, de medición y de protección. Así como se han desarrollado figuras de mérito que cuantifican el grado de distorsión en la corriente y el voltaje, se tienen algunas figuras que permiten cuantificar el grado de afectación que generan las armónicas en los dispositivos que intervienen en el sistema eléctrico, permitiendo tomar medidas preventivas o correctivas.

3.2 Esfuerzos térmicos sobre equipo en general

La causa principal del aumento de los esfuerzos térmicos sobre el equipo eléctrico en general se debe a la existencia de corrientes armónicas en la red eléctrica [3], que tienden a incrementar las pérdidas en el equipo eléctrico y lo someten a esfuerzos térmicos mayores a los previstos en su diseño. Las pérdidas que se ven modificadas por la circulación de corrientes armónicas en la red eléctrica son: en el cobre, en el hierro y por esfuerzos dieléctricos.

Las pérdidas en el cobre en general pueden ser calculadas mediante la expresión siguiente [3]:

$$P_{e} = R \sum_{n=1}^{\infty} l_{n}^{2} = R l_{1}^{2} \left(1 + (THD_{1})^{2} \right)$$
(3.1)

en donde:

R es la resistencia del cobre.

Las pérdidas en el hierro tienen dos componentes básicas: por histéresis y por corrientes parásitas o de eddy (también llamadas de remolino). Las pérdidas por histéresis dependen del tipo de material ferromagnético utilizado y aumentan en forma proporcional a la freguencia [3 y 8]. Se calculan con la expressión [3]:

$$P_h = k_1 f B_m^v$$

en donde:

k₁ es una constante que depende de la geometría del material ferromagnético.
 f es la frecuencia del voltaje.
 B_m es la densidad máxima de flujo en el material ferromagnético.

v es una constante que depende del material ferromagnético utilizado, $1.5 \le v \le 2.5$.

Las pérdidas por corrientes parásitas dependen de ciertos parámetros del material ferromagnético como la resistividad del núcleo (como conductor eléctrico) y el ancho de las laminaciones ,y aumentan en forma proporcional con el cuadrado de la frecuencia [3]. La siguiente ecuación permite cuantíficar las pérdidas por corrientes de eddy [3 y 8]:



(3.2)

(3.3)

$$P_e = k_2 f^2 B_m^2$$

en donde: k_2 es una constante que depende del ancho de las laminaciones del material. f es la frecuencia del voltaje.

B_m es la densidad máxima de flujo en el material ferromagnético.

Las pérdidas totales en el hierro se calculan sumando los resultados de las ecuaciones 3.2 y 3.3, si el voltaje es senoidal el resultado es correcto, pero si tiene distorsión los resultados son aproximaciones del valor correcto de las pérdidas [3].

Las pérdidas dieléctricas para una cierta componente armónica se pueden calcular mediante la siguiente figura de mérito [3]:

$$P_{d} = (\tan(\delta))_{n} V_{n}^{2} n \omega C$$
(3.4)

en donde:

 $(\tan(\delta))_n$ son las pérdidas dieléctricas del dispositivo en la enésima armónica y C es la capacitancia del dispositivo.

3.3 Efectos sobre conductores y líneas de transporte de energía

3.3.1 Resistencia a la corriente alterna

Cuando circula una corriente distorsionada por un conductor, la frecuencia de las componentes armónicas es un factor a considerar en la resistencia del conductor a cada componente. La resistencia de un conductor a la corriente alterna se puede calcular con la expressión [25]:

$$R_{n} = R_{CD} \left(1 + 7.5 \times 10^{-7} (60n)^{2} d^{4} \right)$$
(3.5)

en donde:

 R_n es la resistencia a la cnésima componente armónica, R_{CD} es la resistencia a la corriente directa, n es la componente armónica y d es el diámetro del conductor en centímetros.

3.3.2 Reactancia inductiva

Debido a que la reactancia inductiva depende de la frecuencia, la expresión que permite calcular esta reactancia en términos de las componentes armónicas es:

$$X_{Ln} = 2\pi fnL = nX_{L1}$$
(3.6)

en donde:

n es el orden de la componente armónica, f es la frecuencia de la componente fundamental y

 X_{L1} es la reactancia inductiva a frecuencia fundamental.

	and the second sec
1	TESIS COM
l	FALT & DE CERTAINT
l	TTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTTT
	and the second sec

3.3.3 Reactancia capacitiva

La reactancia capacitiva, también depende de la frecuencia. La expresión que permite calcular esta reactancia en términos de las componentes armónicas es:

$$X_{Cn} = \frac{1}{2\pi fnC} = \frac{X_{C1}}{n}$$

(3.7)

en donde:

n es el orden de la componente armónica, f es la frecuencia de la componente fundamental y X_{C1} es la reactancia capacitiva frecuencia fundamental.

3.3.4 Caídas de tensión no senoidales

Debido a que la resistencia y las reactancias de una línea de transporte de energía dependen de la frecuencia, al tener presencia de armónicas de corriente, las caídas de tensión que generan no son senoidales y provocan que la tensión al final de la línea tenga distorsión armónica.

Para demostrar los efectos de la caída de tensión sobre el voltaje al final de una línea de transporte de energía, cuando circulan corrientes con distorsión, se presenta el caso tomado en un tablero de distribución en baja tensión que alimenta dispositivos no lineales.

En la figura 3.1 se observa que el voltaje tiene distorsión, lo cual está confirmado el análisis de espectro de la figura 3.2, en donde se muestran las figuras de mérito. La distorsión se aprecia en un aplanamiento ligero en los valles y las crestas del voltaje.



En la figura 3.3 se presenta la forma de onda de la corriente que circula por ese circuito hacia la carga que alimenta. La corriente de este circuito tiene una distorsión muy elevada, corroborada por el análisis de espectro de la figura 3.4, donde se observa que la distorsión armónica con respecto a la componente fundamental es del 36%.

TE	570	CON .
FALLA	DE	ORIGEN



En la figura 3.5 se muestra la forma de onda del voltaje al final de la línea. La distorsión se aprecia notablemente por los aplanamientos pronunciados en los valles y las crestas, producidos por el contenido elevado de tercera armónica de la corriente, como lo demuestra la figura 3.4.



La distorsión de la tensión al final del alimentador es dos veces mayor que al inicio, como se puede observar en la figura 3.6. La impedancia del alimentador, que depende de la frecuencia (tanto para la resistencia como para la reactancia), junto con las componentes armónicas presentes en la corriente ocasionan la distorsión en el voltaje. La naturaleza pulsante de la corriente, ocasionada por el contenido elevado de tercera armónica, provoca el aplanamiento del voltaje, el cual tiene un contenido elevado de tercera armónica, como se observa en la figura 3.6.

El factor de cresta del voltaje al final de la línea es de 1.29; esto implica que el valor de pico de este voltaje es de 152 V, cuando este valor para una tensión senoidal, con el mismo valor eficaz, es de 166 V.

VEGS CCA	
FALLA DE ORIO	HEN

3.3.5 Suma de corrientes en el neutro

Si se tiene un sistema trifásico de tres fases y cuatro hilos cuyas corrientes pueden ser modeladas mediante las ecuaciones 1.7, 1.8 y 1.9, las componentes armónicas de secuencia positiva y negativa al sumarse en el neutro se cancelan, asumiendo que el sistema y la carga están balanceados. No ocurre así con las componentes de secuencia cero; asumiendo condiciones balanceadas y despreciando las componentes triples de orden mayor a la tercera, la corriente en el neutro es:

$$i_N = 3\sqrt{2}I_3 \cos(3\omega t) = 3\sqrt{2} aI_1 \cos(3\omega t)$$

en donde:

a es el factor de proporción de la componente de tercera armónica con respecto a la componente fundamental ($a = I_1/I_1$).

En el capítulo 2 se vio que en un rectificador monofásico la tercera armónica tiene un valor eficaz de una tercera parte del valor de la componente fundamental. Bajo tales condiciones la corriente en el neutro es:

$$i_N = 3\sqrt{2} \frac{1}{2} l_1 \cos(3\omega t) = \sqrt{2} l_1 \cos(3\omega t)$$

esto indica que en condiciones ideales el neutro conduce una corriente cuyo valor eficaz es igual al de la componente fundamental que circula por los conductores de fase.

Se ha observado que la tercera armónica puede alcanzar valores incluso superiores a una tercera parte de la componente fundamental. Algunas mediciones, como la corriente de la figura 3.9, demuestran que la componente de tercera armónica puede alcanzar valores hasta del 70% de la fundamental, como lo muestra el espectro de la figura 3.13.

Asumiendo que la tercera armónica es 2/3 de la componente fundamental, la corriente en el neutro es:

$$i_N = 3\sqrt{2} \frac{2}{3} I_1 \cos(3\omega t) = 2\sqrt{2} I_1 \cos(3\omega t)$$

y por lo tanto se tiene que por el conductor neutro circula una corriente cuyo valor eficaz es del doble del valor eficaz de la componente fundamental provocando que dicho conductor se sobrecargue.

Para pulsos de corriente menores a 60 ° eléctricos se ha observado que la corriente en el neutro puede ser hasta $\sqrt{3}$ mayor a la de los conductores de fase [14]. Aunque $\sqrt{3}$ se considera como el límite máximo de sobrecarga del conductor neutro [7], una práctica generalizada es recomendar el uso del conductor neutro con una capacidad del 200% de los conductores de fase [10].

Para demostrar la suma de corrientes en el neutro de un sistema de tres fases y cuatro hilos se tomaron lecturas de corriente en los conductores de un tablero de distribución de energía eléctrica de un edificio de oficinas.

	TESIS	CON
FAL	1,4 0	e origen



Las corrientes de los conductores de fases y neutro tuvieron las magnitudes y formas de ondas presentadas en las figuras 3.7, 3.8, 3.9 y 3.10. La magnitud de la corriente del conductor neutro es mayor a la magnitud del conductor con mayor corriente, que en este caso corresponde a la fase C. Las corrientes de los conductores de fase tienen factores de cresta superiores a $\sqrt{2}$ indicando que existe distorsión en las corrientes, lo cual se comprueba al observar las figuras 3.7, 3.8, y 3.9. La corriente en el conductor neutro tiene una distorsión mayor que las corrientes de fase y su factor de cresta también es superior a $\sqrt{2}$, pero menor a los factores de cresta de los conductores de fase.

En las figuras 3.11, 3.12, 3.13 y 3.14 se muestran análisis de espectro para las corrientes de los conductores de fase y el neutro. En primera instancia se observa que el valor eficaz del neutro es el 124% del valor del conductor de fase con mayor corriente, que es el de la fase C. Sin embargo, en el espectro del neutro, mostrado en la figura 3.14, no se observa que la componente predominante sea la

TES	NS.	CON
FALLA		ORIGEN

\$5

tercera, esto se debe a la naturaleza dinámica de las cargas conectadas en dichos circuitos, que provoca que el espectro cambie continuamente, por ese motivo incluso la frecuencia de la corriente en el neutro fue de 67.6 Hz en el instante de medición.



Aunque el factor de cresta de la corriente del conductor neutro está mas cercano a $\sqrt{2}$ con respecto a los factores de cresta de los conductores de fase no se puede concluir que tal corriente tiene una menor distorsión. Las figuras de mérito muestran que la corriente del conductor neutro tiene una distorsión mucho más elevada, ya sea con respecto al valor eficaz o a la componente fundamental, que los conductores de fase. Por este motivo no se debe utilizar indiscriminadamente el factor de cresta como un indicador del nivel de distorsión armónica en la corriente o el voltaje.

El aumento de la corriente en el neutro puede generar problemas muy serios ya que no se permite el uso de dispositivos de protección contra sobrecorriente en este conductor [26], a menos que el dispositivo desconecte tanto a los conductores de fase como al neutro [26]. La Norma Oficial

	ŢŢ	835	CON
L	FALL	4 a 6 a	E CEN

Mexicana NOM-001-SEDE-1999 indica que, cuando la mayoría de la carga en un sistema de tres fases y cuatro hilos son dispositivos no lineales, el neutro debe ser considerado un conductor activo [26], sin embargo no se proporciona alguna recomendación en cuanto a la capacidad de este conductor referida a los de fase para evitar sobrecargas en este tipo de situaciones.

La suma de corrientes en el neutro trae consigo los siguientes efectos sobre este conductor:

- Aumento en su temperatura por la resistencia mayor que le presenta el conductor a las componentes armónicas, especialmente a las triples.
- Incremento en la caída de tensión por la impedancia que le presenta el conductor a las armónicas triples, de las cuales la tercera es generalmente la de mayor magnitud.
- Aumento del voltaje entre neutro y tierra.

3.4 Efectos sobre transformadores

La tensión y la corriente con distorsión armónica generan efectos diversos en un transformador; en algunos casos no se afecta considerablemente su operación, sin embargo, en otros casos se puede reducir la vida útil del equipo y provocarle daños por operar bajo condiciones para las cuales no estaba diseñado.

3.4.1 Incremento del ruido

Un transformador tiene un zumbido característico cuando opera con un voltaje de 60 Hz y la corriente que circula por sus devanados es senoidal. Cuando existe distorsión en el voltaje o la corriente el zumbido aumenta [6 y 15] e incluso cambia de tono debido a la existencia de las componentes armónicas en el voltaje y la corriente. Se considera que el aumento del zumbido es el efecto de menor influencia sobre la operación normal del transformador [6].

Aunque el oido humano puede percibir sonidos comprendidos entre 20 y 20,000 Hz, el umbral auditivo no es igual en todas las frecuencias. La mayor sensibilidad se tiene en el intervalo de frecuencias que van de 1 a 5 KHz, con una disminución abrupta de sensibilidad por arriba de 5 KHz y una disminución gradual de la sensibilidad hacia abajo de 1 KHz [27].

El oído es más sensible a un tono de 300 Hz (quinta armónica) que a un tono de 60 Hz (fundamental) debido a que la quinta armónica, con un nivel de presión sonora de 16 dB es audible, mientras que la componente fundamental requiere un nivel de presión sonora de 30 dB para ser percibida.

3.4.2 Aumento en las pérdidas en el hierro

Cuando la tensión aplicada a un transformador tiene componentes armónicas, el flujo magnético también tiene armónicas. Si la densidad de flujo no es senoidal, el ciclo de histéresis de los transformadores pierde su forma característica, mostrada en el segundo capítulo, y aparecen pequeños ciclos de histéresis sobre el ciclo principal [3]. Aunque la distorsión armónica del voltaje ocasiona que las pérdidas en el hierro del transformador aumenten, el incremento en las pérdidas no es superior al 4% con respecto al caso sin distorsión armónica [3].

		· · · · ·	<u>1</u>
FA	<u>Li A Li</u>		ļ

3.4.3 Aumento en las pérdidas en el cobre

Las pérdidas en el cobre están relacionadas exclusivamente con la corriente que circula por los devanados del transformador.

La corriente que circula por los devanados de un transformador crea un flujo magnético que es conducido por el núcleo, sin embargo no todo el flujo creado puede ser conducido. El flujo que circula por trayectorias distintas al núcleo se llama flujo de dispersión o de fuga [28]. Cuando la corriente que circula por los devanados de un transformador tiene componentes armónicas, la fuerza magnetomotriz creada por los amperios-vuelta no es senoidal y el flujo magnético, creado a partir de dicha corriente, tiene distorsión [10].



Figura 3.15

En la figura 3.15 se presenta una figura del flujo conducido por el núcleo y se muestra el flujo de dispersión en los devanados de un transformador. Si el flujo de dispersión que enlaza a los devanados tiene armónicas, en los conductores se inducen corrientes parásitas del mismo orden, que circulan junto con la corriente de carga provocando un incremento en las pérdidas eléctricas y un mayor calentamiento en los devanados.

La gran mayoría del aumento de pérdidas por calor en un transformador se debe a las corrientes de eddy en los devanados originadas por las corrientes de carga con distorsión armónica [10]. Las armónicas del flujo, hasta la décimo quinta, generan corrientes de eddy que producen pérdidas que aumentan con el cuadrado del orden de las armónicas; por arriba de la décimo quinta armónica de flujo, las corrientes de eddy generan pérdidas que aumentan en forma lineal con el orden de las armónicas; y a muy altas frecuencias las pérdidas disminuyen en razón inversa al orden de las componentes [10].

Debido a que las pérdidas motivadas por las corrientes de eddy aumentan en forma exponencial hasta la décimo quinta componente, la mayor parte del calentamiento adicional de un transformador que está operando bajo condiciones de corriente con distorsión se debe precisamente a este tipo de componentes.

Las pérdidas generadas por las corrientes de eddy se pueden calcular mediante la ecuación 3.3. Para calcular las pérdidas por corrientes de eddy bajo condiciones de distorsión armónica en la corriente de carga del transformador, primero se aplica la ecuación 3.3 a la componente fundamental ya que se considera que las pérdidas eléctricas del equipo se obtienen mediante la prueba de cortocircuito con una corriente sin distorsión:

$$P_{e1} = k_2 60^2 B_1^2$$

en donde:

 P_{e1} son las pérdidas por corrientes de eddy a la frecuencia fundamental y B_1^2 es el cuadrado de la densidad de flujo para la componente fundamental.

En un transformador se tienen dos expresiones fundamentales, una proporciona la relación entre la densidad de flujo y la excitación magnética:

$$B = \mu H$$

y otra que proporciona la relación entre la corriente y la excitación magnética:

$$I = \frac{HI}{N}$$

en donde:

B es la densidad de flujo magnético,

 μ es la permeabilidad del núcleo,

H es la excitación magnética,

l es la longitud del circuito magnético formado por el núcleo,

I es la corriente que circula por el devanado y

N es el número de vueltas del devanado.

De estas ecuaciones se puede obtener una expresión que relacione la densidad de flujo magnético con la corriente en el devanado:

$$B = \frac{NI}{\mu}I = k_3I$$

Si se aplica la ecuación anterior a la de pérdidas por corrientes de eddy a frecuencia fundamental, las pérdidas son:

$$P_{e1} = k_2 60^2 k_3^2 l_1^2 = k 60^2 l_1^2$$

Las pérdidas por corrientes de eddy motivadas por la enésima componente armónica de la corriente son:

$$P_{en} = k(60n)^2 l_n^2$$

sumando las pérdidas por corrientes de eddy producidas por la componente fundamental y las componentes armónicas se tiene:

<u>IT</u>		COP
FALLA	DE	ORIGEN

$$P_{et} = 60^2 k \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 n^2$$

pero, de la ecuación de pérdidas a componente fundamental se puede despejar el término $k60^2$, sustituyéndolo en la ecuación anterior para obtener una expresión de pérdidas totales proporcionales a las pérdidas de la componente fundamental:

$$P_{et} = \frac{P_{et}}{I_1^2} \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 n^2$$

si se introduce en la sumatoria el cuadrado de la magnitud de la corriente para la componente fundamental, las magnitudes de las corrientes dentro de la sumatoria quedan normalizadas en por unidad a la magnitud de la corriente de la componente fundamental:

$P_{et} = P_{e1} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{l_n^2}{l_1^2} n^2$

de la ecuación anterior se deriva una figura de mérito conocida como factor K, que se utiliza para evaluar el sobrecalentamiento producido por las corrientes de eddy que circulan por los devanados del transformador bajo condiciones de distorsión armónica [7].

El factor K se calcula de la siguiente forma [7]:

$$K = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{I_n^2}{I_1^2} n^2 = \sum_{n=1}^{\infty} I_{n(pu)}^2 n^2$$
(3.8)

en donde:

 $I_{n(pu)}$ es la magnitud de corriente de la enésima componente armónica dividida entre la magnitud de la corriente de la componente fundamental.

El factor K indica cuánto aumenta las pérdidas una corriente con distorsión con respecto a las pérdidas provocadas por una corriente senoidal con el mismo valor eficaz.

El documento IEEE C57.12.00-1987 propone un 5% como límite máximo de distorsión armónica de la corriente, bajo condiciones de plena carga en un transformador [12].

3.5 Efectos sobre las máquinas eléctricas rotatorias

La presencia de voltajes y corrientes armónicas en el sistema eléctrico también influye en la operación de los generadores y los motores, ya sean síncronos o de inducción provocando un incremento en sus pérdidas tanto eléctricas como magnéticas, en forma similar a los transformadores. El campo magnético de una máquina eléctrica rotatoria se ve afectado cuando las corrientes que pasan por los devanados del estator tienen distorsión.



La densidad total de flujo bajo condiciones de distorsión armónica, en una máquina eléctrica rotatoria puede representarse mediante el sistema de ecuaciones siguiente:

 $B_{Tn}(t) = \left(\frac{\mu N}{l} I_n\right) \left[-\frac{3}{2} \cos(n\omega t + \theta_n) - j\frac{3}{2} \sin(n\omega t + \theta_n) \right] \quad \text{para } n = 1, 4, 7, 10 \dots$ $B_{Tn}(t) = \left(\frac{\mu N}{l} I_n\right) \left[-\frac{3}{2} \cos(n\omega t + \theta_n) + j\frac{3}{2} \sin(n\omega t + \theta_n) \right] \quad \text{para } n = 2, 5, 8, 11 \dots$ (3.9)

 $B_{Tn}(t) = 0$ para n = 3, 6, 9, 12,

La densidad de flujo total originada por las componentes armónicas de secuencia cero da como resultado cero, porque los vectores de densidad de flujo motivados por cada devanado se encuentran separados espacialmente 120° dentro del estator y su suma vectorial es cero.

Del sistema anterior de ecuaciones se obtiene información de los efectos de las componentes armónicas sobre el funcionamiento de la máquina eléctrica rotatoria [3]:

- Las componentes armónicas de secuencia positiva de la corriente provocan un flujo magnético con sentido de giro positivo y una velocidad de giro de nω.
- Las componentes armónicas de secuencia negativa de la corriene provocan un flujo magnético con sentido de giro negativo y una velocidad de giro de nω.
- Las componentes armónicas de secuencia cero de la corriente, no producen flujo magnético y por lo tanto no generan par, únicamente producen pérdidas eléctricas.

Se ha observado que las componentes armónicas quinta (secuencia negativa) y séptima (secuencia positiva) tienen la capacidad de generar oscilaciones mecánicas en un sistema turbinagenerador o en un sistema motor - carga [12]. Para que existan oscilaciones mecánicas se requieren torques oscilantes que se originan de la interacción entre las corrientes armónicas y la componente fundamental del flujo magnético, estos torques pueden provocar que el sistema oscile a alguna frecuencia de resonancia mecánica [12].

Los motores de inducción están sujetos a arranear produciendo un ruido de gran magnitud (cogging) o a tener deslizamientos pronunciados cuando existen componentes armónicas en la red eléctrica [12]. En un motor de inducción la velocidad relativa del campo magnético, provocado por las componentes armónicas de secuencia positiva de la corriente y el rotor es de $(n-1)\omega$, mientras que la velocidad relativa del campo magnético provocado por las componentes armónicas de secuencia negativa de la corriente y el rotor es de $(n-1)\omega$, mientras que la velocidad relativa del campo magnético provocado por las componentes armónicas de secuencia negativa de la corriente y el rotor es de $-(n+1)\omega$ [3].

Del sistema de ecuaciones 3.9 se puede ver que, en un motor de inducción las componentes armónicas de secuencia positiva de la corriente provocan un momento de torsión en sentido positivo, que tiene el mismo sentido de giro del rotor; por otra parte, las componentes armónicas de secuencia negativa de la corriente provocan un momento de torsión con sentido negativo, que tiene un sentido de giro opuesto al del rotor.

> TEST DOM FALLA DE ORIGEN

Si el contenido armónico del voltaje es menor al indicado en el Std. 519 - 1992 del IEEE (límites de distorsión del voltaje) la reducción de la vida útil no es pronunciada, aunque el calor adicional generado por las armónicas reduce el rendimiento a valores que van del 90 al 95% con respecto al obtenido con una tensión exclusivamente senoidal [12].

Las componentes armónicas influyen de manera distinta en la pérdida de vida útil de un motor de inducción de 100 HP. Si existen subarmónicas (componentes cuya frecuencia es un submúltiplo de la fundamental) la reducción de la vida útil se incrementa gravemente. Para una subarmónica con una frecuencia de una décima parte de la fundamental y un 1% de amplitud con respecto a la fundamental, la disminución de vida experimentada por el motor es del 90% [29].

El efecto de las armónicas sobre la pérdida de vida útil es menor; por ejemplo si la quinta armónica tiene una magnitud del 8%, la pérdida de vida útil del motor es del 30%; esta misma magnitud para la séptima armónica causa una pérdida de vida útil del 17% en el mismo motor; la décima primera armónica causa una pérdida de vida útil del 10% con una magnitud similar; mientras que la décimo tercera ocasiona que la pérdida de vida útil sea del 7% [29].

La distorsión armónica en el voltaje provoca que las pérdidas en los motores de inducción se incrementen, aumentando la temperatura de los devanados y disminuyendo la vida útil del motor. La disminución del par del motor bajo condiciones de distorsión en el voltaje provoca que el tiempo de arranque bajo estas condiciones sea mayor, que bajo condiciones en donde el voltaje no tiene distorsión, ocasionando que el metal se fatigue. Cuando la relación entre la componente armónica de la tensión a la componente fundamental (V_n/V_1) es menor a 0.05 el impacto de dichas armónicas es insignificante en el aumento de las pérdidas en el motor [29].

Una máquina síncrona se ve afectada por la interacción del campo magnético generado por las componentes armónicas de la corriente y el campo magnético de componente fundamental. El campo magnético generado por las componentes armónicas de secuencia positiva de la corriente tiene una velocidad relativa, con respecto al campo generado por el rotor, de $(n-1)\omega$, mientras que el campo magnético generado por las componentes armónicas de secuencia negativa de la corriente tiene una velocidad relativa, con respecto al campo generado por el rotor, de $(n+1)\omega$.

La interacción entre el campo magnético generado por las componentes de secuencia positiva y el campo generado por el rotor produce un par pulsante cuya frecuencia es f(n-1), mientras que la interacción entre el campo magnético generado por las componentes de secuencia negativa y el campo generado por el rotor produce un par pulsante cuya frecuencia es de f(n+1) [3].

Se observa que existen dos componentes armónicas en la corriente que generan un par pulsante de la misma frecuencia; por ejemplo, la quinta armónica, de secuencia negativa, genera un par pulsante de frecuencia 60(5+1) = 360 Hz, la séptima armónica, de secuencia positiva, da origen a un par pulsante de frecuencia 60(7-1) = 360 Hz. Las componentes armónicas séptima y décima primera originan un par pulsante de 720 Hz, las componentes décima séptima y décima novena dan lugar a un par pulsante de 1080 Hz, y así sucesivamente. Si la frecuencia de resonancia está cercana a la frecuencia del par pulsante la máquina se puede ver sometida a esfuerzos mecánicos elevados.

TESIS COM	7
FALLA DE ORIGEN	

Otro problema generado en las máquinas rotatorias es la circulación de corrientes armónicas en el rotor provocadas por el flujo magnético creado por las corrientes armónicas que circulan por los devanados del estator. Las corrientes armónicas que circulan por el rotor dependen de la frecuencia de las corrientes armónicas de los devanados del estator; para las componentes armónicas de secuencia positiva del estator las componentes armónicas de secuencia negativa del estator generan componentes armónicas de secuencia negativa del estator generan componentes armónicas en el rotor de frecuencia f(n-1), mientras que las componentes armónicas de secuencia negativa del estator generan componentes armónicas en el rotor de frecuencia f(n + 1) [3 y 12].

Al igual que en los pares pulsantes, existen dos componentes armónicas en la corriente que generan una componente armónica de corriente de la misma frecuencia en el rotor; por ejemplo, la quinta armónica, de secuencia negativa, genera una componente armónica de corriente de frecuencia 60(5+1) = 360 Hz, la séptima armónica, de secuencia positiva, da lugar a una componente armónica de corriente de frecuencia 60(7-1) = 360 Hz.

3.6 Efectos sobre equipo y dispositivos de protección

3.6.1 Relevadores

Los relevadores electromecánicos operan mediante un disco de inducción que se puede ver afectado por las componentes armónicas de la corriente debido a que modifican el par del disco, alterando sus características de retraso de tiempo [3]. Los relevadores de tierra se ven afectados por la existencia de armónicas triples de corriente ya que no pueden distinguir entre una componente de secuencia cero a fuedunata y una componente de secuencia cero a cualquier otra frecuencia [3].

Algunos relevadores electrónicos, digitales o de estado sólido, operan midiendo los valores de pico del voltaje o de la corriente y en algunos casos toman como referencia los cruces por cero del voltaje [3]. Los voltajes y las corrientes con factor de cresta distinto a $\sqrt{2}$ dan origen a errores de operación en este tipo de dispositivos.

3.6.2 Fusibles

Los fusibles son dispositivos que operan en condiciones de sobrecarga o de cortocircuito para proteger al sistema eléctrico y se diseñan para fundirse en un cierto tiempo para un valor determinado de corriente.

La operación del fusible por cortocircuito no se ve afectada por la existencia de componentes armónicas en la corriente debido a que las corrientes de falla son únicamente a frecuencia fundamental, sin embargo la operación del fusible por sobrecarga sí se puede ver afectada por la existencia de armónicas de corriente ya que éstas se presentan en estado estable [15].

Existen tres valores de interés en la especificación de los fusibles que deben tomarse en cuenta, desde el punto de vista operativo [19]:



- Valor nominal de corriente: se refiere al valor que el fusible puede conducir permanentemente sin que opere bajo las condiciones especificadas por el fabricante.
- Corriente mínima de fusión: es el valor mas bajo de corriente que puede provocar que el fusible opere. El valor de corriente que provoque la operación del fusible en un lapso de horas se considera como corriente mínima de fusión.
- Sobrecorriente: es cualquier valor de corriente por arriba del mínimo de fusión.

La operación por sobrecarga de los fusibles se ve afectada por el aumento de la resistencia a la corriente alterna que experimenta el elemento fusible con las componentes armónicas, ya que éstos se diseñan para abrirse con el calor generado por la corriente mínima de fusión, y esta corriente se considera de componente fundamental exclusivamente.

Un fusible se puede abrir anticipadamente debido a que una corriente con distorsión armónica genera un calor mayor que una corriente sin distorsión, incluso aunque ambas tengan el mismo valor eficaz, debido a que la resistencia a la corriente alterna del fusor es mayor para las componentes armónicas y el calor absorbido por el elemento fundible también es mayor, provocando que el dispositivo se abra incluso con corrientes de valores eficaces menores, dando la idea de que se ha alcanzado una condición de sobrecarga.

3.6.3 Interruptores

Los interruptores son dispositivos de protección que operan por sobrecarga o cortocircuito para proteger al sistema eléctrico y se diseñan para abrirse, interrumpiendo las corrientes de falla, de sobrecarga o corrientes normales del sistema eléctrico, y para cerrarse con carga, por lo tanto el interruptor debe tener la capacidad para poder soportar estas corrientes. El mecanismo de apertura y cierre del interruptor puede ser mecánico o electromecánico.

Los interruptores para sistemas eléctricos de alta y media tensión operan en forma automática mediante relevadores que se encargan de medir las condiciones de operación del sistema eléctrico, en caso de presentarse una sobrecarga o un cortocircuito el relevador se encarga de ordenar la apertura del interruptor enviando una señal que puede ser eléctrica, mecánica, hidráulica o neumática [19].

En los sistemas de baja tensión se utilizan ampliamente los interruptores termomagnéticos para proteger la red eléctrica. Este tipo de interruptor tiene un elemento térmico que se encarga de disparar el mecanismo de apertura bajo condiciones de sobrecarga, también tiene un elemento magnético que se encarga de disparar el mecanismo de apertura cuando se presenta un cortocircuito [30].

El elemento magnético consta de una bobina con un núcleo móvil, o electroimán, cuando se presenta un cortocircuito la bobina desarrolla un campo magnético con la fuerza suficiente para liberar la traba, o mecanismo de disparo, mover el núcleo y disparar el interruptor [30].

El elemento térmico tiene una banda bimetálica con coeficientes distintos de dilatación que se calienta al paso de la corriente deformándose; al cambiar de forma la banda bimetálica libera la traba disparando el interruptor por sobrecarga [30].

El elemento bimetálico de los interruptores termomagnéticos se ve afectado por las componentes armónicas de la corriente en forma similar al elemento fundible de los fusibles, porque



está diseñado para deformarse por calentamiento. La resistencia a la corriente alterna del elemento bimetálico es mayor para las componentes armónicas aumentando en función de la frecuencia de las mismas, esto significa que el elemento se deforma con mayor rapidez cuando circulan a través de él corrientes con distorsión provocando que dispare incluso con corrientes de valores eficaces menores a su valor nominal.

La mayoría de los interruptores termomagnéticos están diseñados para funcionar con temperaturas de operación máximas de 40 °C y la circulación de corrientes armónicas a través de los interruptores puede incrementar la temperatura de operación de los mismos. Cuando un interruptor termomagnético opera a una temperatura mayor a la de diseño se disminuye su valor de disparo por sobrecarga siendo posible su apertura prematura.

Para demostrar los efectos de las componentes armónicas sobre la temperatura de operación de los interruptores termomagnéticos, se tomaron valores de corriente y de temperatura en dos interruptores ubicados en el mismo tablero, en uno de ellos la corriente tiene una distorsión armónica elevada y en el otro la corriente tiene una distorsión relativamente baja.



En la figura 3.16 se muestra la forma de onda de una corriente con distorsión que circula a través de un interruptor termomagnético de un polo de 30 A, mientras que en la figura 3.17 se muestra la temperatura de operación del interruptor, que es superior a los 40°C aunque la corriente eficaz es de 8.4 A. Esta temperatura de operación elevada puede ocasionar que el interruptor se dispare por sobrecarga si la corriente se incrementa, sin que ésta llegue necesariamente a los 30 A.

En la figura 3.18 se muestra la forma de onda de una corriente con una distorsión muy baja que circula a través de un interruptor termomagnético de un polo de 30 A y la figura 3.19 muestra la temperatura de operación del interruptor.



La corriente del segundo interruptor tiene un valor eficaz mayor que la corriente del primer interruptor y sin embargo su temperatura de operación es menor, por lo tanto este interruptor está trabajando dentro de su rango correcto de temperatura de operación.

Comparando los espectros de las corrientes del interruptor #1, mostrado en la figura 3.20, y del interruptor #2, mostrado en la figura 3.21, y las figuras de mérito asociadas a cada corriente es evidente la influencia de las componentes armónicas de la corriente sobre la temperatura de operación de los interruptores termomagnéticos.



La operación de los interruptores por cortocircuito, ya sea en baja, media o alta tensión, no se ve afectada por las componentes armónicas de la corriente porque las corrientes de falla son a frecuencia fundamental.





3.7 Efectos sobre equipo electrónico

3.7.1 Cambios en los cruces por cero de la señal

Existen algunos equipos electrónicos que utilizan los cruces por cero de la señal del voltaje para realizar ciertos procesos como operación de relojes [7]. Los convertidores de corriente alterna a corriente directa utilizan la detección de los cruces por cero para su operación [20]. Si los cruces por cero se modifican por efectos de la distorsión armónica en la tensión el equipo puede operar en forma errónea.





La figura 3.22 muestra la forma de onda de una tensión medida entre dos conductores de fase. En un voltaje o corriente senoidales existen dos cruces por cero únicamente por cada ciclo, sin embargo, en la tensión de la figura 3.22 se observa que en un ciclo de la señal existen cuatro cruces por cero, los cuales han sido marcados en la figura.

Los cruces 1 y 2 son los que se podrían considerar normales en una señal periódica, los cruces 3 y 4 son debidos a la alta distorsión que afecta al voltaje. La tensión instantánea va en aumento después del segundo cruce por cero, empieza a disminuir cambiando de signo alcanzando un valor de -4 Volts, para después volver a aumentar cambiando nuevamente de signo.

Existe un medio ciclo negativo que dura un tiempo normal de 8.33 ms, pero en seguida aparece un medio ciclo positivo de 0.16 ms de duración, posteriormente se presenta un medio ciclo negativo de una duración de 0.08 ms para finalmente aparecer un medio ciclo positivo de 8.08 ms de duración.

La influencia de las componentes armónicas sobre la distorsión se muestra en el espectro de la figura 3.23, siendo notable la existencia de componentes de orden elevado, como la trigésima quinta, y que tienen una magnitud similar a otras de un orden inferior como la décima primera.



Las figuras de mérito confirman que el voltaje tiene una distorsión elevada, ligeramente mayor al 11%. El factor de cresta indica que los valores de pico alcanzan niveles que sobrepasan los valores que tendría un voltaje senoidal con el mismo valor eficaz.



Figura 3.23

3.7.2 Cambio de la tensión en el lado de corriente directa de un rectificador

La tensión en el lado de corriente directa de un rectificador depende de la forma de onda de la tensión en el lado de corriente alterna [14]. En un rectificador monofásico de onda completa la tensión en el lado de corriente directa se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$V_{\rm DC} = \frac{2}{T} \int_{0}^{1} \bar{v}(t) dt$$

si el voltaje está libre de distorsión y T = $\frac{2\pi}{\omega}$ la tensión en el lado de corriente directa es:

$$V_{DC} = \frac{\omega}{\pi} \int_{0}^{\frac{\omega}{\omega}} V_{m} \operatorname{sen}(\omega t) dt = -V_{m} \frac{\omega}{\pi} \frac{\cos(\omega t)}{\omega} \Big|_{0}^{\frac{\pi}{\omega}} = \frac{-V_{m}}{\pi} \Big[\cos\left(\omega \frac{\pi}{\omega}\right) - \cos(0) \Big] = \frac{2V_{m}}{\pi}$$

Suponiendo que la tensión tiene distorsión armónica y tomando en cuenta únicamente, por simplicidad, las componentes tercera y quinta, tanto en amplitud como en ángulo de fase, el voltaje es:

$$v(t) = V_1 \operatorname{sen}(\omega t) + V_3 \operatorname{sen}(3\omega t - \varphi_3) + V_5 \operatorname{sen}(5\omega t - \varphi_5)$$

entonces la tensión de corriente directa se obtiene como:



$$V_{DC} = \frac{\omega}{\pi} \int_{0}^{\infty} \left[V_1 \operatorname{sen}(\omega t) + V_3 \operatorname{sen}(3\omega t - \varphi_3) + V_5 \operatorname{sen}(5\omega t - \varphi_5) \right] dt$$

$$V_{DC} = \frac{\omega}{\pi} \left[-\frac{V_1 \cos(\omega t)}{\omega} \Big|_0^{\frac{\pi}{\omega}} - \frac{V_3 \cos(3\omega t - \phi_3)}{3\omega} \Big|_0^{\frac{\pi}{\omega}} - \frac{V_3 \cos(5\omega t - \phi_3)}{5\omega} \Big|_0^{\frac{\pi}{\omega}} \right]$$

$$V_{DC} = \frac{\omega}{\pi} \begin{bmatrix} -\frac{V_1 \left[\cos\left(\omega \frac{\pi}{\omega}\right) - \cos(0) \right]}{\omega} - \frac{V_3 \left[\cos\left(3\omega \frac{\pi}{\omega} - \varphi_3\right) - \cos(\varphi_3) \right]}{3\omega} \\ -\frac{V_5 \left[\cos\left(5\omega \frac{\pi}{\omega} - \varphi_5\right) - \cos(\varphi_5) \right]}{5\omega} \end{bmatrix}$$

$$V_{DC} = \frac{1}{\pi} \begin{bmatrix} -V_1 [\cos(\pi) - \cos(0)] - \frac{V_3}{3} [\cos(3\pi)\cos(\phi_3) + \sin(3\pi)\sin(\phi_3) - \cos(\phi_3)] \\ -\frac{V_5}{5} [\cos(5\pi)\cos(\phi_5) + \sin(5\pi)\sin(\phi_5) - \cos(\phi_5)] \end{bmatrix}$$

$$V_{DC} = \frac{1}{\pi} \begin{bmatrix} -V_1 [\cos(\pi) - \cos(0)] - \frac{V_3}{3} [\cos(3\pi)\cos(\varphi_3) + \sin(3\pi)\sin(\varphi_3) - \cos(\varphi_3)] \\ -\frac{V_5}{5} [\cos(5\pi)\cos(\varphi_5) + \sin(5\pi)\sin(\varphi_5) - \cos(\varphi_5)] \end{bmatrix}$$
$$V_{DC} = \frac{1}{\pi} \begin{bmatrix} 2V_1 + \frac{2V_3}{3}\cos(\varphi_3) + \frac{2V_5}{5}\cos(\varphi_5) \end{bmatrix}$$
$$V_{DC} = \frac{2}{\pi} \begin{bmatrix} V_1 + \frac{V_3}{3}\cos(\varphi_3) + \frac{V_5}{5}\cos(\varphi_5) \end{bmatrix}$$
(3.10)

La ecuación 3.10 muestra que el voltaje de corriente directa del rectificador cambia en función de la distorsión presente en el lado de corriente alterna. El voltaje de directa depende no únicamente de la amplitud de las componentes armónicas presentes en el voltaje de alterna, sino también de su ángulo de fase.

The second se		A
TE	33	0017
FALLA	DE	ORIGEN

3.7.3 Modificación del factor de cresta

Ya se ha visto que las componentes armónicas tienen la propiedad de modificar el factor de cresta de la corriente y el voltaje. Una corriente distorsionada con factor de cresta superior a $\sqrt{2}$ tiene un valor de pico superior al que tendría una corriente senoidal con el mismo valor eficaz; del mismo modo, cuando el factor de cresta de la corriente es menor a $\sqrt{2}$ el valor de pico es inferior al que tendría una corriente senoidal con el mismo valor de pico es inferior al que tendría una corriente senoidal con el voltaje.

Aunque el valor eficaz es una medida de la cantidad de potencia que una corriente alterna puede entregar, el factor de cresta puede ser una limitante para ciertos equipos.

Por este motivo, algunos fabricantes de UPS consideran el factor de cresta como parte de la especificación de la capacidad de salida del equipo; si el factor de cresta de la corriente de la carga es muy elevado para la UPS, el voltaje de salida puede tener una distorsión elevada o el equipo puede alarmarse y tranferir su operación a modo de bypass [31]. Por este motivo, el factor de cresta forma parte de las especificaciones de los valores de salida para este tipo de equipos [31, 32 y 33].

Esta restricción se debe a que algunos dispositivos electrónicos, además de la corriente máxima eficaz que pueden soportar, tienen una corriente máxima instantánea que pueden conducir y una corriente con un valor de cresta muy elevado puede alcanzar este límite.

Por ejemplo, en la hoja de especificaciones del tiristor 350PJT que aparece en la referencia [20], se indica que este dispositivo ha sido desarrollado para aplicaciones de control de potencia como UPS y variadores de velocidad; en la sección de especificaciones eléctricas su corriente nominal, $I_{T(RMS)}$, es de 550 Å, mientras que la máxima corriente de pico controlable, I_{TGO} , del tiristor es de 1200 Å. Este tiristor puede trabajar sin problemas con corrientes con un factor de cresta máximo de 2.18; corrientes con factores de cresta

El factor de cresta es un indicador de la existencia de distorsión armónica, sin embargo, no se debe considerar su valor como un indicador del grado de distorsión asumiendo que mientras más alejado se encuentre este factor del valor de $\sqrt{2}$, la distorsión es mayor.

En el caso en donde se analizó la suma de corrientes en el neutro, se vió que el factor de cresta de la corriente en el conductor neutro es menor al factor de cresta de la corriente de los conductores de fases, sin embargo, la distorsión de la corriente en el neutro es mucho mayor. En el caso en donde se analizó el problema de los cruces por cero del voltaje se pudo observar que aunque la distorsión es muy elevada, el factor de cresta no aleja mucho de $\sqrt{2}$. Por este motivo, no se recomienda tomar el factor de cresta como un indicador cualitativo de la existencia de distorsión armónica. Lo más adecuado es utilizar al factor de cresta como un indicador cualitativo de la existencia de distorsión armónica.

3.8 Efectos sobre equipo de medición

Los equipos de medición también son afectados por las componentes armónicas, porque en algunos casos su operación se basa en el valor promedio de la componente fundamental, o en las

		 Set 6 	••••••	New York, and the second s
1	÷.,	1777		به ه رمو ۲۰۰
1	2	1.		
1 1 1 1 1				
日台上	1	4	11	
4 4 22.4		- 1	فسل اسل	الالتقابات

mediciones del valor de pico de la forma de onda. En medidores de tipo electromecánico las armónicas pueden crear efectos similares a los que ocasionan en los motores de inducción y originar errores.

3.8.1 Equipos con disco de inducción

El medidor de energía a base de disco de inducción, o watthorímetro, fue inventado en 1888 por Schallenberger y es ampliamente utilizado en la actualidad por ser un medidor exacto y barato, que además tiene la virtud de poder trabajar por periodos de tiempo prolongados con poco mantenimiento [34].

Los watthorímetros de disco de inducción han sido diseñados para operar con voltajes y corrientes senoidales y, al igual que en un motor de inducción, la distorsión del voltaje y la corriente generan pares adicionales en el disco [6]. Si el medidor está operando en un sistema con problemas de resonancia por distorsión armónica los altos voltajes o corrientes también pueden producir errores de medición en el watthorímetro.

3.8.2 Equipos que miden en base al valor de pico y al valor promedio

Actualmente existen equipos de medición que han sido diseñados para trabajar bajo condiciones de voltajes y corrientes senoidales. Este tipo de diseño provoca que los instrumentos generen lecturas erróneas bajo condiciones de distorsión armónica.

Si un instrumento obtiene el valor eficaz de la variable eléctrica de interés en base al valor pico entonces, basado en la suposición de que la forma de onda es senoidal, la información presentada en pantalla se calcula en base a la siguiente relación:

$$V_{\rm rms} = \frac{V_{\rm pico}}{\sqrt{2}}$$

Sin embargo $\sqrt{2}$ es el factor de cresta únicamente para formas de onda senoidales, si la forma de onda tiene distorsión el factor de cresta es distinto y la lectura del instrumento es errónea.

Por otro lado el instrumento puede obtener el valor eficaz de la variable eléctrica en base al valor promedio de medio ciclo de la señal rectificada mediante la siguiente relación [20]:

$$V_{\rm rms} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} V_{\rm prom}$$

La ecuación 4.70 involucra a la relación entre el valor promedio de medio ciclo y el valor pico para una forma de onda senoidal y la relación entre el valor pico y el valor eficaz para una forma de onda senoidal. Por lo tanto hay dos errores también involucrados ya que $\frac{\pi}{2}$ no es la relación entre el valor pico y el valor promedio de una señal con distorsión, del mismo modo que $\sqrt{2}$ no es el factor de cresta para una forma de onda no senoidal.

		 real-, where all the real plants of the second seco
		 CON
$\mathbf{F}_{\mathbf{A}}$	<u>.</u>	 CHUGEN

Para evitar errores de medición bajo condiciones de distorsión armónica se deben utilizar medidores con capacidad para leer valor eficaz verdadero (TRUE RMS).

3.9 Efectos sobre líneas telefónicas

Los voltajes y corrientes con distorsión dan origen a campos eléctricos y magnéticos que pueden interferir en la operación correcta de las líneas telefónicas, si están cercanas a algún equipo de conversión estático de energía o si corren cerca y en paralelo a las líneas de potencia [12].

El nivel de interferencia depende del arreglo físico que guarden el sistema que da origen a la interferencia y el cable telefónico, de la magnitud de las componentes armónicas involucradas y de su orden [12]. Las siguientes figuras de mérito permiten calcular la interferencia telefónica dependiendo del contenido armónico en la red eléctrica.

3.9.1 Factor de peso de la interferencia telefónica (TIF)

El factor de peso del TIF es una combinación de la curva característica "C-message", que considera el efecto relativo de interferencia de distintas frecuencias en la banda de voz (incluyendo la respuesta del sistema telefónico y el oido) y un capacitor, el cual provee el factor de peso que es directamente proporcional a la frecuencia de consideración sobre el acoplamiento asumido [12].

El TIF es una cantidad adimensional que es indicativa de la forma de onda y no de la amplitud y se puede expresar como [12]:

TIF =
$$\frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (W_n V_n)^2}}{V_{rms}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (W_n I_n)^2}}{I_{rms}}$$

(3.11)

(3.12)

en donde:

 V_n es el voltaje eficaz en la enésima armónica, V_{rms} es el valor eficaz del voltaje considerando todas las componentes armónicas, I_n es la corriente eficaz en la enésima armónica,

 I_{ms} es el valor eficaz de la corriente considerando todas las componentes armónicas y W_n es el factor de peso del TIF a la frecuencia de la armónica n

El factor W_n del TIF, que refleja el peso de la curva de "C-message" y el acoplamiento (componente proporcional) normalizado a l KHz está dado por [12]:

$$W_n = 5P_n f$$

en donde:

P_n es el valor de la curva "C-message" a la frecuencia de la armónica n y f es la frecuencia de la enésima armónica.

Existen dos formas de calcular el factor de peso W_n del TIF, la primera es obteniendo los valores en dB de la curva "C-message" en la página 34 de la referencia [3] y calculando los niveles de

Γ	Ţ		 · • -	T
F	<u>ALI</u>	<u>i Di</u>	(Gan	

atenuación para las frecuencias de interés; la segunda forma es mediante la tabla 6.2 de la página 41 de la referencia [12] en la cual se expresan los valores de W_n en función de la frecuencia.

La tabla 3.1 contiene los valores presentados en la tabla 6.2 del Std 519-1992 del IEEE [12] con los valores del TIF por frecuencia.

f	Wn	f	Wn	f	W _n	f	W _n
60	0.5	1020	5100	1980	8330	3300	8090
180	30	1080	5400	2100	8330	3540	6730
300	225	1140	5630	2160	9080	3660	6130
360	400	1260	6050	2220	9330	3900	4400
420	650	1380	6370	2340	9840	4020	3700
540	1320	1440	6560	2460	10340	4260	2750
660	2260	1500	6680	2580	10600	4380	2190
720	2760	1620	6970	2820	10210	5000	840
780	3360	1740	7320	2940	9820		
900	4350	1800	7570	3000	9670		
1000	5000	1860	7820	3180	8740		

Tabla 3.1 Valores del TIF en 1960 por frecuencia

3.9.2 Interferencia telefónica

En la práctica la interferencia telefónica es expresada mediante el producto de la corriente y el TIF, denominado el producto IT, en donde I es la corriente eficaz en amperes y T es el TIF:

$$T = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (W_n I_n)^2}$$

en donde:

 W_n es el factor de peso del TIF a la frecuencia de la enésima armónica y I_n es la corriente eficaz en la enésima armónica.

3.10 Efectos sobre bancos de capacitores

La reactancia de un banco de capacitores disminuye con el incremento de la frecuencia. Conforme aumenta el orden de las componentes armónicas el banco presenta una menor oposición convirtiéndose en un carnino de baja impedancia y su corriente eficaz aumenta.

Otro efecto que se puede manifestar en un banco de capacitores es la elevación del voltaje en el punto en donde se conecta el banco al sistema eléctrico [13]. El sistema mostrado en la figura 3.24 consiste en la reactancia inductiva del transformador, X_T , la resistencia de los devanados del transformador, R_T , y de la reactancia del banco de capacitores, X_C .

	1	CON
[FAL		 GRIGEN

(3.13)



Figura 3.24

El sistema forma un circuito divisor de tensión, de donde el voltaje en el banco de capacitores se determina como:

$$V_{c} = \frac{-jX_{c}}{R_{T} + j(X_{T} - X_{c})} V_{F}$$

multiplicando por el conjugado del denominador, se tiene:

$$V_{c} = \frac{-jX_{c}(R_{T} - j(X_{T} - X_{c}))}{R_{T}^{2} - (X_{T} - X_{c})^{2}} V_{1}$$

haciendo las simplificaciones necesarias:

$$V_{c} = \frac{-jX_{c}R_{T} - X_{c}(X_{T} - X_{c})}{R_{T}^{2} - (X_{T} - X_{c})^{2}} V_{F}$$
$$V_{c} = \frac{X_{c}^{2} - X_{c}(X_{T} + jR_{T})}{R_{T}^{2} - (X_{T} - X_{c})^{2}} V_{F}$$
$$V_{c} = \frac{X_{c}^{2} - X_{c}X_{T} - jX_{c}R_{T}}{R_{T}^{2} - (X_{T} - X_{c})^{2}} V_{F}$$

expresando las reactancias en función del orden de las componentes armónicas y de las reactancias a frecuencia fundamental se tiene:

$$V_{Cn} = \frac{\left(\frac{X_{Cl}}{n}\right)^2 - \frac{X_{Cl}}{n} X_{Tl} n - j \frac{X_{Cl}}{n} R_T}{R_T^2 - \left(X_{Tl} n - \frac{X_{Cl}}{n}\right)^2} V_{Fn}$$

FALLA DE	<u>Oid</u>	(1 <u>21</u>)

Finalmente el voltaje de la carga para la enésima componente armónica es:

$$V_{Cn} = \frac{\left(\frac{X_{CI}}{n}\right)^{2} - X_{CI}X_{TI} - j\frac{X_{CI}}{n}R_{T}}{R_{T}^{2} - \left(X_{TI}n - \frac{X_{CI}}{n}\right)^{2}}V_{Pn}$$
(3.14)

En condiciones de resonancia, cuando $X_T = X_C$, el voltaje de la carga es [13]:

$$V_{Cn_{m}} = -j \frac{X_{C1}}{n_{res}R_{T}} V_{Fn_{m}}$$
(3.15)

Los problemas más comunes observados en los bancos de capacitores expuestos a distorsión armónica son [6 y 13]:

- Operación prematura de los dispositivos de protección, fusibles o interruptores.
- · Calentamiento y aumento en las pérdidas dielétricas.
- Amplificación de las componentes armónicas.
- Fallas en el aislamiento.
- Sobretensiones.
- Resonancia.







En la figura 3.25 se muestra la curva de vida de un capacitor en función de su temperatura de operación. En esta gráfica se observa que el capacitor alcanza el 100% de vida útil cuando su temperatura es de 70 °C, lo cual implica que está diseñado para esa temperatura de operación. Un aumento pequeño en la temperatura de operación del capacitor produce una disminución muy elevada en su vida útil; por ejemplo, un capacitor con una temperatura de operación de 72 °C tiene una vida útil del 87%, una elevación de 10 °C disminuye la vida útil del capacitor al 52%.

[TES	IS	CON	
	FALLA	DE	ORIGEN	

Una corriente con distorsión tiende a incrementar la temperatura de operación de los capacitores, provocando que se sobrecarguen y se eleve su temperatura. Por este motivo es sumamente arriesgado instalar un banco de capacitores sin haber realizado una medición previa del contenido armónico del sistema eléctrico.

El incremento de la temperatura que generan las componentes armónicas no solo afectan la vida útil del capacitor, también producen cambios en su valor de capacitancia. En la figura 3.26 se muestra la curva del comportamiento de los valores de la capacitancia en función de la temperatura. El 100% de la capacitancia se alcanza con una temperatura de 20 °C.

La disminución de la temperatura aumenta el valor de la capacitancia; por ejemplo a - 30 °C la capacitancia es el 101.25% de su valor a 20 °C (valor nominal). El aumento de la temperatura provoca la disminución del valor de la capacitancia; por ejemplo, a 100 °C la capacitancia es el 97.5% de su valor a 20 °C. Aunque los porcentajes de variación no son muy elevados sí deben de tomarse en consideración; por ejemplo si el banco de capacitores va a formar parte de un filtro pasivo de armónicas, en donde la sintonía del filtro depende del valor de la capacitancia.

Cuando se corrige el factor de potencia mediante el uso de un banco de capacitores instalado en el lado secundario de un transformador, se producen sobretensiones que se originan por circuito resonante, que origina el banco de capacitores con la reactancia de fuga del transformador.

El circuito formado, denominado circuito tanque, presenta una impedancia elevada en la componente armónica de resonancia y, cuando circula una corriente armónica cuyo orden coincide con el de resonancia del circuito, los voltajes desarrollados en el lado de baja tensión tienden a incrementarse debido a la caída de tensión que se produce en la impedancia equivalente.



Figura 3.27

Los bancos de capacitores son afectados por las sobretensiones debido a que son elementos pasivos y cualquier aumento en la tensión ocasiona que su potencia se incremente con el cuadrado del voltaje; por ejemplo un aumento del 10% en la tensión aplicada al banco de capacitores produce un aumento de la potencia del 21%.

En la figura 3.27 se muestra la curva de vida de un capacitor en función del voltaje aplicado. Esta curva, que es una exponencial decreciente, muestra que la vida del capacitor es el 490% de su vida nominal cuando su tensión de alimentación es del 90%. Para una tensióndel 95% de la nominal la vida del capacitor es del 220% de su vida nominal. Para una tensión del 104% el porcentaje de vida nominal es del 50%.

La tensión es una variable que debe de cuidarse en los capacitores porque, su vida útil se ve sumamente disminuida por aumentos no muy significativos de la tensión de operación; por este motivo hay que evitar que los bancos de capacitores formen circuitos resonantes con los transformadores especialmente en condiciones de distorsión armónica, en donde la frecuencia de resonancia puede coincidir con alguna de las armónicas presentes en el sistema y dar origen a corrientes muy elevadas que generen sobretensiones.

El Std. 18 - 1992 del IEEE considera que un voltaje eficaz del menor al 110% del valor nominal, incluyendo las armónicas que pueda contener, es un valor aceptable de tensión. Las armónicas también afectan el valor de pico del voltaje, por este motivo el Std. 18 - 1992 del IEEE considera aceptable en un capacitor una tensión cuyo valor de pico sea del 120% del valor nominal. El mismo Std. 18 - 1992 también considera que la corriente eficaz en un capacitor puede ser hasta del 180% de su valor nominal incluyendo el contenido armónico [35].

La norma IEC 831-1 en su sección de definiciones menciona los valores de potencia, voltaje y corriente nominal de un capacitor, así como los valores máximos permisibles de corrientes y de voltajes. En la sección tres, en donde se trata el tema de sobrecargas, se indica que la corriente máxima que puede circular por un capacitor es el 150% de la corriente nominal incluyendo el contenido armónico [36].

3.11 Resonancia

La resonancia ocurre cuando al excitar a un sistema con una función periódica de cierta frecuencia, la respuesta alcanza su máximo valor posible. En el caso de un sistema eléctrico la resonancia ocurre cuando una señal periódica de excitación, puede ser voltaje o corriente, provoca que las corrientes o los voltajes en otro punto del sistema lleguen a valores muy elevados, teóricamente a sus máximos posibles.

3.11.1 Resonancia en serie

Este tipo de resonancia se presenta cuando existe una fuente de armónicas de corriente en el lado primario de un transformador, que tiene un banco de capacitores conectado en el lado secundario. Cuando la carga del transformador se desconecta y el banco de capacitores permanece conectado se forma un circuito como el de la figura 3.28. La resonancia también se presenta si existe distorsión en el voltaje en el lado primario del transformador.

La impedancia equivalente del circuito es:

$$Z = R_T + j(X_T - X_C)$$

(3.16)

y la resonancia se presenta cuando las reactancias del transformador y del capacitor son iguales $(X_T = X_C)$, esto implica que:



Figura 3.28

y la componente armónica de resonancia se determina como [13]:

$$n = \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{T1}}}$$



 X_{C1} es la reactancia capacitiva a frecuencia fundamental y X_{T1} es la reactancia inductiva del transformador a frecuencia fundamental.



Figura 3.29

En la figura 3.29 se muestra la curva típica de impedancia de un circuito resonante serie en lunción de las componentes armónicas, donde se puede apreciar que la armónica de resonancia es la

78

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

novena. Por debajo de la frecuencia de resonancia predomina la parte capacitiva, y el comportamiento del circuito resonante es el de un capacitor, mientras que por arriba de la frecuencia de resonancia predomina la parte inductiva, y el comportamiento del circuito resonante es el de un inductor.

En la armónica de resonancia, las reactancias inductiva y capacitiva son iguales, por lo que la impedancia del circuito alcanza su valor mínimo, y únicamente queda limitada por la resistencia de los devanados del transformador. Este comportamiento da origen a corrientes sumamente elevadas en el transformador y el banco de capacitores, que a su vez dan origen a caídas de tensión sumamente elevadas.

La corriente en el circuito resonante serie se caracteriza por su elevado valor eficaz y su gran contenido armónico [7].

3.11.2 Resonancia en paralelo

Este tipo de resonancia se presenta cuando la fuente generadora de componentes armónicas de corriente, se encuentra en paralelo con un banco de capacitores y con la inductancia de dispersión de los devanados de un transformador de potencia, como se muestra en la figura 3.30.



Figura 3.30

Despreciando la resistencia de los devanados del transformador, R_T, la impedancia equivalente del circuito de la figura 3.30 es:

$$Z = \frac{jX_{T}(-jX_{c})}{jX_{T} - jX_{c}} = \frac{X_{T}X_{c}}{j(X_{T} - X_{c})} = \frac{jX_{T}X_{c}(X_{T} - X_{c})}{(X_{T} - X_{c})^{2}} = \frac{jX_{T}X_{c}}{(X_{T} - X_{c})^{2}}$$

y la condición de resonancia se alcanza cuando las reactancias inductiva y capacitiva son iguales $(X_T = X_C)$, por lo tanto la componente armónica de resonancia es:

100	<u></u>
	Y
n = 1	<u>^CI</u>
" — N	v
Y	~TI



La expresión anterior tiene poca utilidad práctica para analizar un caso de resonancia, tanto en serie como en paralelo, porque en un banco de capacitores no se suele especificar el valor de la

79

DE LA BIBLIOTEC

reactancia en su placa de datos y en un transformador la impedancia aparece como un porcentaje de su impedancia base.

Si la reactancia de dispersión a frecuencia fundamental, X_{T1} , está en ohms y referida al secundario del transformador, cuando ocurre un cortocircuito en el lado secundario la potencia de cortocircuito es:

mientras que en el banco de capacitores, conectado en el lado secundario del tranformador, la potencia del banco se relaciona con el voltaje y la reactancia de frecuencia fundamental como:

 $Q_{cop} = \frac{V_2^2}{X_{CI}}$ despejando las reactancias de las ecuaciones anteriores y sustituyéndolas en ecuación de la componente

Pero en el secundario de un transformador la potencia nominal es:

armónica de resonancia se tiene:

 $S_N = \sqrt{3}V_2I_2$

mientras que la potencia de cortocircuito en el secundario del transformador es:

 $S_{CC} = \sqrt{3}V_2 I_{CC}$

dividiendo la potencia nominal entre la potencia de cortocircuito y multiplicando numerador y denominador por la reactancia de dispersión del transformador y simplificando $\sqrt{3}$ se tiene:

$$\frac{S_{N}}{S_{CC}} = \frac{\sqrt{3}V_{2}I_{2}}{\sqrt{3}V_{2}I_{CC}} \times \frac{X_{TI}}{X_{TI}} = \frac{I_{2}X_{TI}}{V_{2}} \times \frac{V_{2}}{I_{CC}X_{TI}}$$

en el término $I_2 X_{T1}/V_2$, el cociente I_2/V_2 es igual a la impedancia base del transformador, por lo tanto $X_{T1}/X_{Base} = X_{pu}$, mientras que la corriente de cortocircuito provoca en la reactancia de dispersión del transformador una caída de tensión igual a V_2 , por lo tanto $V_2/(I_{CC}X_{T1}) = 1$, y esto implica que:

80

TESIS CON Falla de origen

$$= \sqrt{\frac{\frac{V_2^2}{Q_{cap}}}{V_2^2}} = \sqrt{\frac{S_{CC}}{Q_{cap}}}$$

(3.17)

 $S_{CC} = \frac{V_2^2}{X_{m}}$

FALLA DE ORIGEN

 $\frac{S_{N}}{S_{CC}} = X_{pu}$

despejando la potencia de cortocircuito y sustituyéndola en la ecuación 3.17, se tiene la expresión:

$$n = \sqrt{\frac{S_N \times p_u}{Q_{cap}}}$$
(3.18)

De la ecuación 3.18 se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- Si se utiliza un banco automático de capacitores, la entrada de los pasos provoca que la potencia del banco aumente y el orden de la armónica de resonancia disminuye.
- La desconexión de pasos en el banco de capacitores ocasiona que su potencia disminuya y, aumente el orden de la armónica de resonancia.
- La pérdida de capacitancia por daños en los capacitores provoca que la potencia del banco disminuya y, que aumente el orden de la armónica de resonancia.

La figura 3.31 muestra la gráfica del comportamiento de la impedancia de un circuito resonante paralelo en función de las componentes armónicas. En este caso la armónica de resonancia es la novena. Antes de la frecuencia de resonancia (540 Hz), sobretodo cerca de la componente fundamental, la impedancia del circuito resonante tiene un valor muy pequeño. Conforme el orden de las armónicas se acerca al de resonancia la impedancia aumenta rápidamente y en la armónica de resonancia la impedancia de la circuito vuelve a disminuir.



La corriente provocada por la fuente I_h genera tensiones muy elevadas en el circuito de la figura 3.30, en la componente armónica de resonancia, ya que el circuito equivalente tiene una impedancia muy elevada en dicha armónica.

La resonancia en paralelo se caracteriza por voltajes de gran valor eficaz que se desarrollan en los elementos que forman parte del circuito, así como por su elevada distorsión armónica [7].

Uno de los problemas principales en la resonancia en paralelo es que las corrientes en las ramas del circuito resonante, $I_C \in I_T$, pueden alcanzar valores elevados [9], incluso superiores a la corriente del dispositivo generador de armónicas de corriente I_h . Esto significa que se puede tener un fenómeno de amplificación armónica, que puede provocar problemas muy serios cuando se instala un banco de capacitores sin realizar un análisis previo de los niveles de distorsión existentes en el sistema eléctrico.

Para conocer las corrientes armónicas que circulan por cada rama del circuito tanque se utiliza el método del circuito divisor de corriente [15].

En la rama del banco de capacitores la corriente es:

$$I_{C} = \frac{R_{T} + jX_{T}}{R_{T} + j(X_{T} - X_{C})} I_{h}$$

multiplicando por el conjugado del denominador se tiene:

$$\overline{I_{c}} = \frac{(R_{T} + jX_{T})[R_{T} - j(X_{T} - X_{c})]}{R_{T}^{2} - (X_{T} - X_{c})^{2}} I_{h}$$

desarrollando el producto del numerador y simplificando, la corriente es:

$$I_{c} = \frac{R_{T}^{2} + X_{T}(X_{T} - X_{c}) + jR_{T}(2X_{T} - X_{c})}{R_{T}^{2} - (X_{T} - X_{c})^{2}} I_{h}$$

La corriente en el banco de capacitores, para la enésima componente armónica de la corriente, I_n , es:

82

$$I_{Cn} = \frac{R_{T}^{2} + nX_{TI} \left(nX_{TI} - \frac{X_{CI}}{n} \right) + jR_{T} \left(2nX_{TI} - \frac{X_{CI}}{n} \right)}{R_{T}^{2} - \left(nX_{TI} - \frac{X_{CI}}{n} \right)^{2}} I_{n}$$
(3.19)

y en condiciones de resonancia, cuando $X_T = X_C$, la corriente en el capacitor se expresa como:

$$c_{n_{\infty}} = \frac{R_{T} + jn_{res}X_{TI}}{R_{T}}I_{n_{\infty}}$$
(3.20)

Para el transformador, la corriente también se calcula mediante el uso de un divisor de corriente:

$$I_{T} = \frac{-jX_{C}}{R_{T} + j(X_{T} - X_{C})}I_{h}$$

multiplicando por el conjugado del denominador se tiene:

$$I_{T} = \frac{-jX_{c}[R_{T} - j(X_{T} - X_{c})]}{R_{T}^{2} - (X_{T} - X_{c})^{2}}I_{h}$$

desarrollando el producto del numerador y simplificando, la corriente es:

$$I_{T} = \frac{X_{c}(X_{T} - X_{c}) - jR_{T}X_{c}}{R_{T}^{2} - (X_{T} - X_{c})^{2}}I_{t}$$

La corriente en el transformador, para la enésima componente armónica de la corriente, In, es:

$$I_{T} = \frac{X_{CI}X_{TI} - \frac{X_{CI}^{2}}{n^{2}} - jR_{T}\frac{X_{CI}}{n}}{R_{T}^{2} - \left(nX_{TI} - \frac{X_{CI}}{n}\right)^{2}}I_{n}$$
(3.21)

y en condiciones de resonancia, cuando $X_T = X_C$, la corriente en el transformador se expresa como:

$$I_{n_{m}} = -j \frac{X_{C1}}{n_{res}R_T} I_{n_{m}}$$
 (3.22)

De la ecuación 3.20 se puede observar que, la corriente en el banco de capacitores en la armónica de resonancia siempre es mayor que la corriente proveniente de la fuente generadora de distorsión en la corriente.

De la ecuación 3.22 se puede observar que, si el producto de la armónica de resonancia por la resistencia de los devanados del transformador, es menor que la reactancia del banco de capacitores a frecuencia fundamental, la corriente en el transformador en la armónica de resonancia es mayor que la corriente proveniente de la fuente generadora de distorsión en la corriente.

Debido a que la resistencia de los devanados de un transformador tiene un valor muy pequeño, en la armónica de resonancia la corriente será mayor en la rama del transformador que en la fuente generadora de distorsión.

Por los motivos anteriores se dice que los bancos de capacitores tienden a amplificar las corrientes armónicas presentes en el sistema.



3.12 Efectos sobre el cálculo de la potencia eléctrica

El cálculo de la potencia instantánea del sistema no sufre alteración alguna debido a que ésta considera los productos de la tensión y la corriente como funciones del tiempo de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\mathbf{p}(\mathbf{t}) = \mathbf{v}(\mathbf{t}) \cdot \mathbf{i}(\mathbf{t}) \tag{3.23}$$

Sin embargo, las expresiones para el cálculo de la potencia activa y reactiva, así como el factor de potencia sí se ven alteradas, ya que las expresiones utilizadas en forma clásica son una consecuencia de considerar condiciones libres de distorsión armónica y por lo tanto dejan de ser aplicables.

3.12.1 Potencia activa

La potencia activa se define como el valor promedio del producto de las tensiones y corrientes instantáneas, lo cual significa que la potencia activa bajo condiciones de distorsión armónica de voltaje o corriente se puede calcular mediante la siguiente expresión [6 y 13], propuesta por Fryse en 1932 [6]:

$$P = \frac{1}{T} \int_{0}^{t} v(t) \cdot i(t) dt$$
(3.24)

Existe una segunda ecuación para el cálculo de la potencia activa bajo condiciones de distorsión armónica, propuesta por Budeanu [6], la cual considera las componentes armónicas para el calcular la potencia activa desde el dominio de la frecuencia [6 y 13]:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n l_n \cos(\theta_n)$$
(3.25)

(3.26)

en donde:

 V_n es el valor eficaz del voltaje de la enésima componente armónica, I_n es el valor eficaz de la corriente de la enésima componente armónica y 0_n es el ángulo entre las componentes enésimas de la corriente y el voltaje.

De las dos ecuaciones anteriores, la 3.24 es la que ha sido utilizada en los equipos digitales de medición para efectuar el cálculo de la potencia activa. Utilizando los valores instantáneos del voltaje y de la corriente la potencia activa se calcula como [37]:

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N} v_n i_n$$

en donde:

 v_n es el enésimo valor instantáneo del voltaje en un ciclo, i_n es el enésimo valor instantáneo de la corriente en un ciclo y N es el total de muestras del voltaje y de la corriente en un ciclo.

3.12.2 Potencia reactiva

El cálculo de la potencia reactiva bajo condiciones de distorsión, definido por Budeanu [6], se realiza en el dominio de la frecuencia y la expresión utilizada comúnmente es [6 y 13]:

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \operatorname{sen}(\theta_n)$$
(3.27)

3.12.3 Potencia aparente

La potencia aparente, bajo condiciones de distorsión armónica, se puede calcular mediante la expresión clásica debido a que involucra el producto de los valores eficaces del voltaje y la corriente [6 y13], que pueden ser calculados sin mayor problema para casos con y sin distorsión armónica:

$$S = V_{rms} I_{rms}$$
(3.28)

Si se hace uso de las expresiones para el cálculo de los valores eficaces del voltaje y de la corriente, la ecuación anterior se transforma en una expresión que permite el cálculo de la potencia aparente en el dominio del tiempo [15]:

$$\mathbf{S} = \sqrt{\frac{1}{T}} \int_{0}^{T} \mathbf{v}^{2}(t) dt \cdot \frac{1}{T} \int_{0}^{T} \mathbf{i}^{2}(t) dt \qquad (3.29)$$

La potencia aparente también puede calcularse en el dominio de la frecuencia en base a la distorsión armónica con respecto a la componente fundamental:

$$\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2 = (THD_V^2)(V_1^2)$$
$$\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 = (THD_1^2)(I_1^2)$$

El voltaje eficaz se puede escribir como:

$$V_{rms} = \sqrt{V_{1}^{2} + \sum_{n=2}^{\infty} V_{n}^{2}} = \sqrt{V_{1}^{2} + (THD_{v}^{2})(V_{1}^{2})} = \sqrt{V_{1}^{2}(THD_{v}^{2} + 1)}$$

finalmente el voltaje eficaz es:

$$V_{\rm rms} = V_1 \sqrt{T H D_V^2 + 1}$$

85

(3.30)


Efectos en los componentes del sistema eléctrico

de forma similar la corriente eficaz es:

$$I_{\rm rms} = I_1 \sqrt{T H D_1^2 + 1}$$
(3.31)

Sustituyendo las ecuaciones 3.30 y 3.31 en la 3.28, se obtiene una forma adicional de calcular la potencia aparente bajo condiciones de distorsión armónica [13]:

$$S = V_1 I_1 \sqrt{THD_V^2 + 1} \sqrt{THD_1^2 + 1} = S_1 \sqrt{THD_V^2 + 1} \sqrt{THD_1^2 + 1}$$
(3.32)

en donde:

 \mathbf{S}_{1} cs la potencia aparente para las componentes fundamentales del voltaje y la corriente.

3.12.4 Potencia de distorsión

Tomando en consideración que la potencia aparente tiene tres componentes, una que involuera a la potencia aparente a frecuencia fundamental y dos componentes de distorsión, de voltaje y corriente, la diferencia entre la potencia aparente calculada mediante la ecuación 3.32 y la potencia aparente calculada mediante la suma de los cuadrados de las potencias activa y reactiva recibe el nombre de potencia de distorsión D que se calcula como [13]:

$$D = \sqrt{S^2 - (P^2 + Q^2)}$$
(3.33)

3.12.5 Factor de potencia total, de desplazamiento y de distorsión

El factor de potencia, bajo condiciones de distorsión armónica, se calcula mediante la ecuación clásica que utiliza el cociente entre la potencia activa y la potencia aparente [13 y 15]:

$$\sqrt{\mathbf{f}\mathbf{p}} = \frac{\mathbf{P}}{\mathbf{S}} \tag{3.34}$$

Si se sustituye en la ccuación 3.34 la potencia aparente calculada en la ecuación 3.32, el factor de potencia es [13]:

$$fp = \frac{P}{S_1 \sqrt{THD_V^2 + 1} \sqrt{THD_1^2 + 1}} = \frac{P}{S_1} \frac{1}{\sqrt{THD_V^2 + 1} \sqrt{THD_1^2 + 1}}$$
(3.35)

El término que involuera al cociente de la potencia activa y la potencia aparente a frecuencia fundamental recibe el nombre de factor de potencia de desplazamiento, fp_{desp} [13]:

$$fp_{desp} = \frac{P}{S_1} = \frac{P}{V_1 I_1}$$
(3.36)

Por otra parte el término que involucra a las distorsiones del voltaje y la corriente recibe el nombre de factor de potencia de distorsión, fp_{dist} [13]:



Efectos en los componentes del sistema eléctrico

$$fp_{dist} = \frac{1}{\sqrt{THD_{v}^{2} + 1}\sqrt{THD_{1}^{2} + 1}} = \frac{V_{1}}{V_{rns}}\frac{I_{1}}{I_{rms}} = \frac{S_{1}}{S}$$
(3.37)

El factor de potencia total calculado mediante la ecuación 3.34 se compone de los factores de potencia de desplazamiento y de distorsión

$$fp = \frac{P}{S} = fp_{desp} \cdot fp_{dist}$$
(3.38)

La distorsión armónica de voltajes y de corrientes juega un papel muy importante en el factor de potencia; se puede tener un bajo factor de potencia no solo porque la potencia activa sea baja comparada con la potencia aparente a frecuencia fundamental (factor de potencia de desplazamiento), sino por una distorsión armónica elevada en la corriente o en el voltaje (factor de potencia de distorsión).

3.12.6 Consideraciones adicionales sobre el cálculo de la potencia bajo condiciones de distorsión armónica.

Debe aclararse que las ecuaciones 3.25, 3.27 y 3.33 propuestas por Budeanu han sido objeto de muchas controversias. La ecuación 3.25, para el cálculo de la potencia activa, no toma en consideración las interarmónicas [6], lo mismo sucede con la ecuación 3.27, para el cálculo de la potencia reactiva. Leszek S. Czarnecky ha argumentado que las ecuaciones 3.27 y 3.33 no entregan información válida para el cálculo de dispositivos de compensación de potencia reactiva, y que la ecuación 3.33 para el cálculo de la potencia de distorsión no tiene relación con la distorsión existente en las formas de onda de la corriente y el voltaje [6].

También existe una discrepancia en el concepto del factor de potencia de desplazamiento. Las referencias [11] y [15] definen al factor de potencia de desplazamiento como la relación de la potencia activa a la potencia aparente a frecuencia fundamental, es decir, es el factor de potencia tradicional para cargas lineales calculado como [15]:

$$fp_{desp} = \frac{V_1 I_1 \cos(\theta_v - \theta_i)}{V_1 I_1} = \cos(\theta_v - \theta_i)$$
(3.39)

Por otra parte, la referencia [13] define al factor de potencia de desplazamiento como la relación de la potencia activa, incluyendo el contenido armónico, a la potencia aparente a frecuencia fundamental, como se observa en la ecuación 3.36.

El instrumento de medición de la referencia [37] calcula la potencia activa considerando la generada por las componentes fundamentales y por las armónicas, mientras que el instrumento de la referencia [11] calcula la potencia activa considerando únicamente la generada por las componentes fundamentales. La potencia activa calculada por ambos instrumentos de medición no puede ser igual, debido a que los métodos de cálculo son distintos y, por lo tanto, se pueden encontrar discrepancias en los factores de potencia, de desplazamiento y totales, medidos por cada instrumento, aunque se trate del mismo circuito.

4.1 Introducción

No cualquier nivel de distorsión genera problemas, por lo regular los equipos tienen un cierto grado de inmunidad a la distorsión armónica del voltaje o la corriente, lo mismo que las fuentes de energía tienen un cierto grado de susceptibilidad a la distorsión armónica de la corriente. Los valores de distorsión armónica que pueden alcanzar las corrientes y los voltajes en algunos casos pueden resultar inadmisibles.

Varios organismos han generado normas para establecer los límites permitidos para la distorsión armónica de voltajes y de corrientes, con el propósito de mantener un voltaje lo más senoidal posible, de proteger al suministro eléctrico de una excesiva inyección de corrientes armónicas de parte de los usuarios y, para mantener los niveles de distorsión dentro de un rango que pueda ser aceptable para los equipos que forman parte del sistema eléctrico o que están conectados a él.

4.2 Norma IEEE Std 519 - 1992

Esta norma, que actualmente está en revisión, se preocupa por los niveles de distorsión permitidos en el punto de acoplamiento común (PCC) entre el consumidor de energía y la compañía suministradora. Esta norma tiene dos recomendaciones principales:

- Los límites de distorsión de corriente que aplican a los consumidores individuales de energía eléctrica (sección 10).
- Los límites de distorsión de voltaje en el punto de acoplamiento común de cada consumidor de energía eléctrica (sección 11).

Los límites de distorsión armónica establecidos no deben ser utilizados para equipos individuales o para circuitos derivados, ya que la norma establece que sus límites son para el beneficio tanto del usuario como de la compañía suministradora [12].

4.2.1 Límites de distorsión de corriente

El Std 519 - 1992 siguió estos lineamientos en el desarrollo de los límites de distorsión armónica de la corriente [12]:

- Limitar la inyección de armónicas de los usuarios individuales, de forma que no provoquen niveles inaceptables de distorsión de voltaje para la operación normal del sistema.
- Limitar la distorsión armónica global del voltaje proporcionado por el suministro público.

Los límites de distorsión de corriente desarrollados para este estándar, asumen que existe diversidad entre las corrientes armónicas que pueden ser inyectadas al sistema eléctrico por los distintos usuarios conectados. La diversidad puede darse en forma de componentes distintas, diferencias en los



(4.1)

ángulos de fase de las componentes armónicas de la corriente o diferencias en la inyección de corrientes armónicas contra los comportamientos a lo largo del tiempo [12].

Los límites de distorsión armónica para la corriente establecen los porcentajes máximos permitidos de distorsión de corriente, para un usuario o consumidor, en base a la siguiente figura de mérito llamada distorsión total de la demanda [12]:

 $TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{Demanda \max, de la corriente de carea} \times 100$

en donde:

 I_n es el valor eficaz de la enésima componente armónica de la corriente y los intervalos de la demanda son de 15 o 30 minutos.

Los límites de distorsión de corriente para sistemas generales de distribución son [12]:

	Distorsio	on armónica má	xima de la corr	iente en porcent	aje de l			
	Örde	n individual de	las armónicas	(armónicas impa	ures)			
I _{sc} / I _L	I_{SC} / I_L $n < 11$ $11 \le n \le 17$ $17 \le n \le 23$ $23 \le n \le 35$ $35 \le n$ 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		
Las arm	iónicas pares e	stán limitadas a	l 25% de los lí	mites de las imp	ares mostrado	s arriba		
La distors	ión de corrient	e que resulta en	una componer	te de corriente o	lirecta no está	permitida		
		Por ejemplo, en	convertidores	de media onda.				
 * Todo el eq 	uipo de genera	ción está limita	ido a estos valo	res de corriente	distorsión de o	corriente sin		
		impor	tar el valor de I	sc / IL				
en donde:	en donde: I _{sc} es la corriente máxima de cortocircuito en el PCC							
	I _L es la dei	nanda máxima	de la corriente	e de la carga (la	a componente	de frecuencia		
	fundamenta	il) en el PCC						

 Tabla 4.1 Límites de distorsión de corriente para sistemas generales de distribución

 (120 V hasta 69000 V) [12]

Esta tabla muestra los límites de las corrientes armónicas basándose en el tamaño de la carga con respecto al tamaño del sistema de potencia al cual está conectado. El cociente I_{SC} / I_L es la relación de la corriente de cortocircuito disponible en el punto de acoplamiento común (PCC) a la corriente máxima de componente fundamental de la carga [12].

El estándar recomienda que la corriente de carga I_L sea calculada como el promedio de la corriente de la demanda máxima para los 12 meses precedentes. Estos límites protegen a los otros usuarios del mismo alimentador así como a la compañía suministradora, de la cual se espera que entregue un voltaje de cierta calidad a sus usuarios [12].



Los límites de distorsión de corriente para sistemas generales de subtransmisión y para sistemas generales de transmisión, generación dispersa y cogeneración se muestran en las tablas 4.2 y 4.3 respectivamente.

	Distorsi	ón armónica má	xima de la corr	iente en porcent	aje de I _L	
	Orde	en individual de	las armónicas	(armónicas impa	ares)	
I _{SC} / I _L	n< 11	$11 \le n \le 17$	17 ≤ n ≤ 23	23 ≤ n ≤ 35	35 ≤ n	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 arm	nónicas pares e	están limitadas a	l 25% de los lí	mites de las imp	ares mostrado	s arriba
La distors	ión de corrient	te que resulta en	una componer	nte de corriente o	lirecta no está	permitida
		Por ejemplo, er	convertidores	de media onda.		
* Todo el ec	juipo de gener	ación está limita	ido a estos valc	ores de corriente	distorsión de	corriente sin
		impor	tar el valor de l	I _{SC} / I _L		
en donde:	I _{SC} es la co	rriente máxima	de cortocircuit	o en el PCC		
	l _L es la de	manda máxima	de la corriente	e de la carga (la	a componente	e de frecuencia
fundamental) en el PCC						

Tabla 4.2 Límites de distorsión de corriente para sistemas generales de subtransmisión (69001 V hasta 161000 V) [12]

	Distorsi	ón armónica má	xima de la corr	iente en porcent	aje de I _L	
	Ord	en individual de	las armónicas	(armónicas impa	nres)	
I _{sc} / I _L	n< 11	$11 \le n \le 17$	$17 \le n \le 23$	$23 \le n \le 35$	35 ≤ n	TDD
< 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75
Las ar	mónicas pares	están limitadas a	il 25% de los lí	mites de las imp	ares mostrado	s arriba
La distor	sión de corrien	te que resulta er Por ejemplo, er	n una componen n convertidores	nte de corriente o de media onda.	lirecta no está	permitida
* Todo el c	quipo de gener	ración está limita impor	ado a estos valo tar el valor de	ores de corriente I _{SC} / 1 _{1.}	distorsión de	corriente sin
en donde:	l _{sc} es la co	orriente máxima	de cortocircuit	o en el PCC		
	I _L es la de fundament	emanda máxima (al) en el PCC	de la corrient	e de la carga (la	a componente	de frecuencia

Tabla 4.3 Límites de distorsión de corriente para sistemas generales de transmisión (>120 kV) generación dispersa y cogeneración [12]

Los límites mostrados en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 deben ser utilizados como valores para el "peor easo" durante la operación normal (condiciones que duren más de una hora). Para periodos de menor duración, como arranques o condiciones usuales, los límites se pueden exceder hasta un 50% [12].

FALLA DE ORIGEN

4.2.2 Límites de distorsión de voltaje

Los límites de distorsión del voltaje en porcentaje están basados en la siguiente figura de mérito [12]:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100$$

(4.2)

en donde:

 V_n es el valor eficaz de la enésima componente armónica del voltaje y V_t es el valor eficaz del voltaje nominal a frecuencia fundamental.

Voltaje del bus en el PCC	Distorsión individual de voltaje	Distorsión total de voltaje THD
	(%)	(%)
69 kV y menos	3.0	5.0
arriba de 69 kV hasta 161 kV	1.5	2.5
arriba de 161 kV y más	1.0	1.5
Nota: Los sistemas de	alto voltaje pueden tener hasta un 2	2.0% de THD en donde la causa es
una terminal de	corriente directa de alto voltaje (HV	/DC)

Tabla 4.4 Límites de distorsión de voltaje

Los límites mostrados en la tabla 4.4 deberían ser utilizados como valores para el "peor caso" durante la operación normal (condiciones que duren más de una hora). Para periodos de menor duración, como arrangues o condiciones usuales, los límites se pueden exceder hasta un 50% [12].

4.3 Soluciones por medio de transformadores tipo K

Un método muy utilizado para la mitigación de componentes armónicas es el uso de los transformadores tipo K con conexión delta - estrella. Este dispositivo es sumamente eficaz para disminuir el contenido de tercera armónica en el alimentador y en el conductor neutro de un sistema de tres fases y cuatro hilos. Aunque un transformador normal con conexión delta - estrella disminuye el contenido de tercera armónica en forma similar a uno tipo K, no tiene las características especiales para soportar la presencia de voltajes y corrientes con distorsión armónica.

Los transformadores con factor K están diseñados especialmente para soportar los efectos provocados por las corrientes armónicas que circulan por sus devanados. Las principales características de estos transformadores son:

- · Sus devanados tienen conexión delta estrella.
- Operan con densidades de flujo menores a los transformadores convencionales de forma que soportan mejor los sobrevoltajes acoplados con las corrientes armónicas que circulan por los devanados [13].
- Tienen una coraza electromagnética entre las bobinas de los devanados primario y secundario para atenuar las armónicas de alta frecuencia [13].



- Tienen un neutro del doble de tamaño de los conductores de fase para manejar las corrientes elevadas que producen las armónicas triples [7, 10 y 13].
- Los devanados se diseñan a base de varios conductores paralelos de sección transversal pequeña para reducir el efecto piel provocado por las armónicas de orden elevado [7 y 13].
- Utilizan conductores aislados y transpuestos para reducir las pérdidas [7 y 13].

El factor K de una corriente con distorsión armónica se obtiene mediante la ecuación 3.8 y el resultado debe redondearse por seguridad al número entero superior más cercano; por ejemplo, si el factor K resultante de una cierta corriente con distorsión es de 7.85 entonces se debe redondear a 8 [7].

Los transformadores con factor K siempre vienen acompañados de una leyenda en su placa de datos que especifica el factor con el cual ha sido diseñado el transformador. Dicha leyenda dice: "Suitable for non-sinusoidal current load with K-factor not to exceed..." y en seguida va el número del factor K del transformador [7, 10 y 13]. Los transformadores típicos con factor K son a 600 V, ventilados, de tipo seco y sus temperaturas de operación pueden ser 80 °C, 115 °C y 150 °C [7].

Aunque no son comunes, también existen transformadores con factor K para transformar de media a baja tensión, como el que se encuentra instalado en la Fase II del Centro Financiero Bancomer, que es factor K, tipo seco, en conexión delta - estrella y relación de 23000-480/277 V.

Los factores K estandarizados para transformadores se muestran en la tabla 4.5 [7]. Los factores típicos son 4, 9, 13 y 20 y los factores de 30, 40 y 50, aunque no son comunes, son comercializados por algunos fabricantes [10].

-		
	K-4	
	K-9	
	K-13	
	K-20	
	K-30	
	K-40	
	K-50	

Tabla 4.5 Factores K estandarizados [7]

El factor K, calculado en la ecuación 3.8, se puede normalizar a la corriente eficaz que circula a través del transformador [12]:



Pero la corriente eficaz total y el valor eficaz de la componente fundamental se relacionan mediante la ecuación 3.31 y por lo tanto el factor K se convierte en [12]:



(4.3)



Los valores estimados del factor K para distintos tipos de carga se muestran en la tabla 4.6 [7], donde se puede observar que los dispositivos lineales se caracterizan por tener factor K unitario. El caso de los motores se refiere a operación bajo carga.

Dispositivo o carga	Factor K
Alumbrado incandescente (sin dimmers)	K-1
Calentadores de resistencia eléctrica (sin controles de estado sólido)	K-1
Motores (sin manejadores de estado sólido)	K-1
Transformadores de control y dispositivos electromagnéticos de control	K-1
Grupos motor-generador (sin manejadores de estado sólido)	K-1
Alumbrado eléctrico de descarga	K-4
UPS con filtro opcional de entrada	К-4
Soldadoras	K-4
Equipo de calentamiento por inducción	K-4
PLC's y controles de estado sólido (distintos a manejadores de velocidad variable)	K-4
Equipo de telecomunicaciones	K-13
UPS sin filtro de entrada	K-13
Circuitos multiconductores para contactos en áreas generales de cuidados de salud, salones	K-13
de clases en escuelas	
Circuitos multiconductores para contactos que alimentan áreas de inspección o de equipos	K-13
de pruebas o en líneas de producción o ensamblaje	
Cargas de mainframe de cómputo	K-20
Manejadores de estado sólido para motores (manejadores de velocidad variable)	K-20
Circuitos multiconductores para contactos en áreas críticas de cuidados de salud y en	K-20
cuartos de operación y recuperación de hospitales	
Circuitos multiconductores para contactos en laboratorios industriales, médicos y	K-30
educacionales and a second and a	
Circuitos multiconductores en espacios de oficinas comerciales	K-30
Mainframes pequeños (mini y micro)	K-30
Otras cargas identificadas como productoras de cantidades muy grandes de armónicas	K-40
(especialmente de orden muy elevado)	K-50

Tabla 4.6 Valores estimados del factor K de algunas cargas y dispositivos [7]

El estándar IEEE C57.110-1986 ofrece un método para calcular la disminución de la capacidad de un transformador convencional en base al factor K normalizado cuando se ve sometido a corrientes armónicas. La expresión utilizada para calcular el factor D de disminución de la capacidad es [12]:

$$D = \frac{1.15}{1 + 0.15K}$$

(4.4)



. .

El resultado generado por esta fórmula indica la capacidad en por unidad a la cual se debe de cargar un transformador convencional cuando circulan por el corrientes no senoidales.

Para mostrar la mitigación de la tercera armónica ofrecida por la transformación delta - estrella y para justificar el sobredimensionamiento del neutro los transformadores tipo K, se analizó el sistema de la figura 4.1, donde se muestra el transformador y unos dispositivos no lineales conectados en el lado en estrella.



Figura 4.1

Las corrientes en el lado secundario son:

$$\begin{split} i_{a}(t) &= \sqrt{2}I_{a1}\cos(\omega t) + \sqrt{2}I_{a3}\cos(3\omega t) + \sqrt{2}I_{a5}\cos(5\omega t) \\ &+ \sqrt{2}I_{a7}\cos(7\omega t) + \sqrt{2}I_{a9}\cos(9\omega t) + ... \\ i_{b}(t) &= \sqrt{2}I_{b1}\cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}I_{b3}\cos(3(\omega t - \frac{2\pi}{3})) + \sqrt{2}I_{b5}\cos(5(\omega t - \frac{2\pi}{3})) \\ &+ \sqrt{2}I_{b7}\cos(7(\omega t - \frac{2\pi}{3})) + \sqrt{2}I_{b9}\cos(9(\omega t - \frac{2\pi}{3})) + ... \\ i_{e}(t) &= \sqrt{2}I_{e1}\cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}I_{e3}\cos(3(\omega t + \frac{2\pi}{3})) + \sqrt{2}I_{e5}\cos(5(\omega t + \frac{2\pi}{3})) \\ &+ \sqrt{2}I_{e7}\cos(7(\omega t + \frac{2\pi}{3})) + \sqrt{2}I_{e9}\cos(9(\omega t + \frac{2\pi}{3})) + ... \\ \end{split}$$

Este sistema se simplifica del siguiente modo:

$$\begin{split} i_{a}(t) &= \sqrt{2} \Big(I_{a1} \cos(\omega t) + I_{a3} \cos(3\omega t) + I_{a5} \cos(5\omega t) + I_{a7} \cos(7\omega t) + I_{a9} \cos(9\omega t) + \dots \Big] \\ i_{b}(t) &= \sqrt{2} \begin{pmatrix} I_{b1} \cos(\omega t - 2\pi_{3}) + I_{b3} \cos(3\omega t) + I_{b5} \cos(5\omega t + 2\pi_{3}) \\ + I_{b7} \cos(7\omega t - 2\pi_{3}) + I_{b9} \cos(9\omega t) + \dots \end{pmatrix} \\ i_{e}(t) &= \sqrt{2} \begin{pmatrix} I_{c1} \cos(\omega t + 2\pi_{3}) + I_{c3} \cos(3\omega t) + I_{c5} \cos(5\omega t - 2\pi_{3}) \\ + I_{c7} \cos(7\omega t + 2\pi_{3}) + I_{c9} \cos(9\omega t) + \dots \end{pmatrix} \end{split}$$

Se consideró un transformador de relación 1:1 de transformación de voltajes de línea; por lo tanto la relación de transformación es a = $\sqrt{3}$.



Si el devanado por donde circula la corriente $i_a(t)$ está arrollado en la misma columna del transformador en donde se encuentra arrollado el devanado por donde circula $i_{AB}(t)$, haciendo el mismo planteamiento para las otras dos fases, $i_b(t)$ tiene correspondencia con $i_{BC}(t)$ e $i_c(t)$ la tiene con $i_{CA}(t)$ entonces las corrientes en los devanados del primario son:

$$\begin{split} i_{AB}(t) &= \sqrt{2} \left(\frac{I_{a1}}{\sqrt{3}} \cos(\omega t) + \frac{I_{a3}}{\sqrt{3}} \cos(3\omega t) + \frac{I_{a5}}{\sqrt{3}} \cos(5\omega t) + \frac{I_{a7}}{\sqrt{3}} \cos(7\omega t) + \frac{I_{a9}}{\sqrt{3}} \cos(9\omega t) + ... \right) \\ i_{BC}(t) &= \sqrt{2} \left(\frac{I_{b1}}{\sqrt{3}} \cos(\omega t - 2\pi\sqrt{3}) + \frac{I_{b3}}{\sqrt{3}} \cos(3\omega t) + \frac{I_{b5}}{\sqrt{3}} \cos(5\omega t + 2\pi\sqrt{3}) + \frac{I_{b7}}{\sqrt{3}} \cos(7\omega t - 2\pi\sqrt{3}) + \frac{I_{b9}}{\sqrt{3}} \cos(9\omega t) + ... \right) \\ i_{CA}(t) &= \sqrt{2} \left(\frac{I_{c1}}{\sqrt{3}} \cos(\omega t + 2\pi\sqrt{3}) + \frac{I_{c3}}{\sqrt{3}} \cos(3\omega t) + \frac{I_{c5}}{\sqrt{3}} \cos(5\omega t - 2\pi\sqrt{3}) + \frac{I_{c5}}{\sqrt{3}} \cos(5\omega t) + \frac{I_{c5}}{\sqrt{3}} \cos(5\omega t) + \frac{I_{c5}}{\sqrt{3}} \cos(5\omega t - 2\pi\sqrt{3}) + \frac{I_{c5}}{\sqrt{3}} \cos(7\omega t + 2\pi\sqrt{3}) + \frac{I_{c9}}{\sqrt{3}} \cos(9\omega t) + ... \right) \end{split}$$

Las corrientes del circuito que alimenta a la delta se calculan como:

v

$$i_{A} = i_{AB} - i_{CA}$$
$$i_{B} = i_{BC} - i_{AB}$$
$$i_{C} = i_{CA} - i_{BC}$$

Obteniendo las corrientes del circuito que alimenta a la delta mediante el sistema anterior se tiene:

$$\begin{split} i_{A}(t) &= \sqrt{2} \left(\frac{l_{al}}{\sqrt{3}} \cos(\omega t) - \frac{l_{cl}}{\sqrt{3}} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \right) + \sqrt{2} \left(\frac{l_{a3}}{\sqrt{3}} \cos(3\omega t) - \frac{l_{c3}}{\sqrt{3}} \cos(3\omega t) \right) \\ &+ \sqrt{2} \left(\frac{l_{a5}}{\sqrt{3}} \cos(5\omega t) - \frac{l_{c5}}{\sqrt{3}} \cos(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) \right) + \sqrt{2} \left(\frac{l_{a7}}{\sqrt{3}} \cos(7\omega t) - \frac{l_{c7}}{\sqrt{3}} \cos(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) \right) + \dots \\ &i_{B}(t) &= \sqrt{2} \left(\frac{l_{b1}}{\sqrt{3}} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \frac{l_{a1}}{\sqrt{3}} \cos(\omega t) \right) + \sqrt{2} \left(\frac{l_{b3}}{\sqrt{3}} \cos(3\omega t) - \frac{l_{a3}}{\sqrt{3}} \cos(3\omega t) \right) \\ &+ \sqrt{2} \left(\frac{l_{b5}}{\sqrt{3}} \cos(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \frac{l_{a5}}{\sqrt{3}} \cos(5\omega t) \right) + \sqrt{2} \left(\frac{l_{b7}}{\sqrt{3}} \cos(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \frac{l_{a7}}{\sqrt{3}} \cos(7\omega t) \right) + \dots \\ &i_{C}(t) &= \sqrt{2} \left(\frac{l_{c1}}{\sqrt{3}} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \frac{l_{b1}}{\sqrt{3}} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \right) + \sqrt{2} \left(\frac{l_{c3}}{\sqrt{3}} \cos(3\omega t) - \frac{l_{b3}}{\sqrt{3}} \cos(3\omega t) \right) + \dots \\ &i_{C}(t) &= \sqrt{2} \left(\frac{l_{c1}}{\sqrt{3}} \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \frac{l_{b1}}{\sqrt{3}} \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \right) + \sqrt{2} \left(\frac{l_{c7}}{\sqrt{3}} \cos(3\omega t) - \frac{l_{b3}}{\sqrt{3}} \cos(3\omega t) \right) + \dots \\ &i_{C}(t) &= \sqrt{2} \left(\frac{l_{c5}}{\sqrt{3}} \cos(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \frac{l_{b5}}{\sqrt{3}} \cos(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) \right) + \sqrt{2} \left(\frac{l_{c7}}{\sqrt{3}} \cos(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \frac{l_{b3}}{\sqrt{3}} \cos(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) \right) + \dots \\ & \sqrt{2} \left(\frac{l_{c5}}{\sqrt{3}} \cos(5\omega t - \frac{2\pi}{3}) - \frac{l_{b5}}{\sqrt{3}} \cos(5\omega t + \frac{2\pi}{3}) \right) + \sqrt{2} \left(\frac{l_{c7}}{\sqrt{3}} \cos(7\omega t + \frac{2\pi}{3}) - \frac{l_{b7}}{\sqrt{3}} \cos(7\omega t - \frac{2\pi}{3}) \right) + \dots \end{aligned}$$

Suponiendo que la carga está balanceada, las amplitudes de las componentes armónicas son iguales y se relacionan de la siguiente forma: $I_{a1} = I_{b1} = I_{c1} = I_1$; $I_{a3} = I_{b3} = I_{c3} = I_3$; y así succesivamente para cada componente armónica. Aplicando esta suposición al sistema anterior de



ecuaciones, y recordando que la diferencia de dos vectores de la misma magnitud con un ángulo de $2\pi\sqrt{3}$ entre ellos, es un vector con un ángulo de $\pi\sqrt{6}$ en adelanto con respecto al vector sustraendo y con una magnitud $\sqrt{3}$ mayor, el sistema anterior se simplifica y se obtiene el siguiente sistema de ecuaciones para las corrientes del circuito alimentador de la delta:

$$\begin{split} &i_{A}(t) = \sqrt{2}I_{1}\cos(\omega t - \frac{\pi}{6}) + \sqrt{2}I_{5}\cos(5\omega t + \frac{\pi}{6}) + \sqrt{2}I_{7}\cos(7\omega t - \frac{\pi}{6}) + \dots \\ &i_{B}(t) = \sqrt{2}I_{1}\cos(\omega t - \frac{5\pi}{6}) + \sqrt{2}I_{5}\cos(5\omega t + \frac{5\pi}{6}) + \sqrt{2}I_{7}\cos(7\omega t - \frac{5\pi}{6}) + \dots \\ &i_{C}(t) = \sqrt{2}I_{1}\cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) + \sqrt{2}I_{5}(5\omega t - \frac{\pi}{2}) + \sqrt{2}I_{7}\cos(7\omega t + \frac{\pi}{2}) + \dots \end{split}$$

Se observa la ausencia de componentes de tercera armónica de corriente en el circuito alimentador de la delta. Esto se cumple para todas las componentes armónicas impares múltiplos de tres ya que todas son de secuencia cero, y por lo tanto, se quedan circulando en la delta. Por supuesto que esta situación depende del balanceo de los dispositivos no lineales conectados en el secundario del transformador.

La corriente en el neutro del transformador es:

$$i_{\mu}(t) = 3\sqrt{2}I_{3}\cos(3\omega t) + 3\sqrt{2}I_{9}\cos(9\omega t) + ...$$

Para que el análisis anterior se cumpla debe los dispositivos no lineales en el secundario del transformador deben de constituir una carga balanceada, si esta condición no se cumple entonces se tendrá presencia de tercera armónica en el alimentador de la delta y el transformador perderá parte de su eficacia como dispositivo mitigador.

También hay que tomar en cuenta que la transformación delta - estrella únicamente impide el paso de las armónicas de secuencia cero al circuito que alimenta a la delta, si el desbalance de corriente en el secundario no es considerable; las componentes armónicas de secuencia positiva y negativa de la corriente pasan a través del transformador sin mayor dificultad, por este motivo es recomendable el uso de un transformador cuando la armónica predominante en la corriente sea la tercera o alguna triple.

Para comprobar la efectividad de la mitigación de la tercera armónica se tomaron mediciones de corriente en un transformador con conexión delta - estrella, clase AA (tipo seco) de 100 kVA, con relación de transformación de 208/220-127 V, de tres fases, 60 Hz, con una elevación de temperatura de 150 °C.

El transformador tiene dispositivos no lincales conectados en el lado en estrella. Las mediciones se realizaron en los puntos 1, 2 y 3 indicados en la figura 4.2.

La figura 4.3 muestra la forma de onda de la corriente en el punto de medición 1, mientras que en el espectro de la figura 4.4 se aprecian las armónicas presentes en la corriente del secundario del transformador. La THD₁ en el secundario del transformador es del 35% y la tercera armónica es aproximadamente el 30% de la componente fundamental.







La figura 4.5 muestra la forma de onda de la corriente en el punto 2 de medición, donde se aprecia que su forma es similar a la corriente de la figura 4.3. En el espectro de esta corriente, mostrado

[and a second s]
ĺ	FALLA DE ORIGEN	

en la figura 4.6, se observa que las componentes armónicas presentes en la delta prácticamente son las mismas que en la estrella. Los niveles de distorsión armónica de la corriente medida en el punto 2 son casi iguales a los que tiene la corriente medida en el punto 1.

La corriente que circula por el alimentador de la delta (punto 3) se muestra en la figura 4.7. El espectro de esta corriente, mostrado en la figura 4.8, permite observar la disminución notable del contenido de la tercera armónica sobre el alimentador, que ahora es aproximadamente el 6% de la componente fundamental.



4.4 Soluciones por medio de filtros

4.4.1 Tipos de filtros pasivos

Las componentes armónicas en un sistema eléctrico se pueden atenuar en forma eficaz mediante el uso de un filtro pasivo, que contiene elementos como capacitores, inductores y resistores para realizar el filtrado de las corrientes armónicas. Mediante el arreglo de capacitores e inductores, los filtros se sintonizan a una frecuencia armónica específica. Si la frecuencia de sintonía es de una componente armónica existente en el sistema eléctrico, el filtro absorbe esa componente armónica, recibiendo el nombre de filtro sintonizado; por otro lado, si el filtro está sintonizado a una componente armónica inexistente, el filtro se denomina como desintonizado.

Los filtros pasivos pueden ser de absorción o de rechazo por su comportamiento ante las componentes armónicas. Los filtros de absorción (o sintonizados) se utilizan cuando el nivel de distorsión de la corriente es elevado y se desea atrapar una o varias componentes armónicas, sintonizando los filtros a las frecuencias de las componentes que se desean mitigar y disminuyendo la distorsión armónica de la corriente del sistema eléctrico.

Los filtros de rechazo (o desintonizados) se utilizan cuando se desea proteger un banco de capacitores de las armónicas existentes en el sistema. Para no atraer a las componentes armónicas de la corriente que fluyen en otras partes del sistema eléctrico se inserta, en serie con el banco de capacitores,

un reactor formando un filtro sintonizado a la frecuencia de una componente armónica inexistente en el sistema, ofreciendo una impedancia alta a las demás componentes, protegiendo el banco y aportando la potencia reactiva que requiere el sistema eléctrico.

Por su conexión los filtros pasivos pueden ser serie o paralelo (en derivación). El filtro serie se conecta en serie con la línea de transporte de energía y presenta una impedancia de rechazo a la componente armónica de sintonía [15]. El filtro paralelo se conecta en derivación y presenta una baja impedancia ante la componente armónica de sintonía [15].

En la figura 4.9 se presentan diferentes configuraciones de filtros pasivos en derivación. La figura 4.9a muestra un filtro sintonizado serie, en la figura 4.9b se muestra un filtro paso banda doble, en las figuras 4.9c, d y e se muestran filtros amortiguados de primer, segundo y tercer orden respectivamente [13].



Figura 4.9

La gran variedad de filtros pasivos constituye por sí sola un tema muy amplio y por lo tanto únicamente se analizaron los filtros serie sintonizados en conexión en paralelo.

4.4.2 Filtro serie sintonizado en conexión en paralelo

El filtro sintonizado serie en conexión en paralelo es uno de los más utilizados, y se diseña para atrapar una componente armónica de la corriente ofreciéndole un camino de baja impedancia, evitando su propagación por el resto del sistema eléctrico. La figura 4.9a muestra que el arreglo de los elementos de este filtro es en serie y por lo tanto su impedancia es:

$$Z = R + j(X_L - X_C)$$
(4.4)

Para que el filtro constituya una impedancia baja se requiere que la reactancia inductiva sea igual a la reactancia capacitiva, es decir, $X_L = X_C$. Esta condición, conocida como resonancia, se presenta a una frecuencia específica en este filtro y su impedancia, en estas condiciones, es el valor de la resistencia [38].



Para sintonizar el filtro a una componente armónica específica, en términos del orden n de la componente armónica, se requiere que se satisfaga la condición de que [13]:

$$nX_{L1} = \frac{X_{C1}}{n}$$
(4.5)

de esta ecuación se despeja el orden de la armónica de sintonía obteniéndose:

$$n = n_{sint} = \sqrt{\frac{X_{CI}}{X_{LI}}}$$
(4.6)

Esta ecuación permite obtener el orden n_{sint} de la armónica de sintonía del filtro, en función de las reactancias capacitiva e inductiva a frecuencia fundamental, pero se necesita primero conocer los requerimientos de potencia reactiva de la instalación en donde se desea agregar.

La figura 4.10 muestra un triángulo de potencias donde se muestran las cantidades requeridas para calcular la potencia del banco de capacitores y realizar la compensación de potencia reactiva. El sistema eléctrico tiene un consumo actual de potencia activa P, su potencia reactiva es Q_1 y su potencia aparente es S_1 , de estas cantidades se puede obtener fácilmente el factor de potencia y el ángulo de desfasamiento.

Se requiere disminuir la potencia reactiva suministrada por el sistema a una cantidad Q_2 , para esto se necesita que el banco de capacitores aporte la potencia reactiva Q_C , con lo cual el ángulo de fase inicial ϕ_1 entre el voltaje y la corriente disminuye hasta ϕ_2 . En la figura 4.10 se observa que la potencia reactiva actual Q_1 , menos la potencia Q_C que aporta el banco de capacitores, es igual a la potencia Q_2 que suministra el sistema:

$$Q_1 - Q_C = Q_2$$

y la potencia del banco de capacitores es:

$$Q_{C} = Q_{1} - Q_{2}$$

En la figura 4.10se observa que las potencias real y reactivas están relacionadas por la tangente del ángulo; es decir:

$$\tan(\phi_1) = \frac{Q_1}{P}$$
$$\tan(\phi_2) = \frac{Q_2}{P}$$

Despejando las potencias reactivas de las ecuaciones anteriores y sustituyendo en la ecuación de la potencia del banco de capacitores se tiene:

$$Q_{c} = P(\tan(\phi_{1}) - \tan(\phi_{2}))$$
(4.7)





Figura 4.10

Conociendo la potencia del banco y el valor eficaz de su tensión a frecuencia fundamental, la reactancia es:

$$X_{cl} = \frac{V_{rms}^2}{Q_c}$$
(4.8)

La ecuación 4.8 puede aplicarse para configuraciones monofásicas y trifásicas; para el caso de una configuración monofásica se utiliza la tensión de fase a neutro y la potencia monofásica, mientras que para la configuración trifásica se utiliza la tensión entre fases y la potencia trifásica.

Existen límites que no se deben exceder en los bancos de capacitores, con el fin de que puedan operar en forma continua sin problemas. El Std. 18 - 1992 "IEEE Standard for Shunt Power Capacitors" establece los límites de voltaje, corriente y potencia para capacitores desde 216 V o mayores y de potencias de 2.5 kVAR o más que son diseñados para conexión en derivación [35].

Corriente eficaz Irms	180 % del valor nominal	a second second
Potencia reactiva Q _C	135 % del valor nominal	
Voltaje pico V _p	120 % del valor nominal	and the second
Voltaje eficaz V _{rms}	110 % del valor nominal	

 Tabla 4.7 Valores límites de voltaje, corriente y potencia para capacitores utilizados en corrección de factor de potencia y filtrado armónico

La norma IEC 831-1 "Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 660 V" también establece ciertos valores máximos o de sobrecarga que no deben exceder los capacitores cuyo voltaje nominal (V_N) sea menor o igual a 660 V [36].

	· ····
	* , * *
1 2 2	
1 1.1.	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1	
1 134 3 4 7	1
1 1 4	
A de la real com a l	الالاط المشاكرة فالمشارك المشاكر
Contraction of the second second	the same of a state of

	Factor de	Duración	
Tipo	voltaje × V _N	máxima	Observación
and the second second	(valor eficaz)		그는 아내는 동작할 것이 많이 깨끗 못소 한다
Frecuencia	1.00	Continuo	Valor promedio más alto posible durante cualquier periodo
de la red			de energización del capacitor. Para periodos de energización menores a 24 horas se aplican las excepciones de abajo como
1.1			se indica.
Frecuencia	1.10	8 h en	Regulación del voltaje del sistema y fluctuaciones.
de la red		cada 24 h	
Frecuencia	1.15	30 min en	Regulación del voltaje del sistema y fluctuaciones.
de la red		cada 24 h	
Frecuencia	1.20	5 min	Elevación de voltaje en condiciones de carga baja.
de la red			
Frecuencia	1.30	1 min	
de la red			
Frecuencia	La corriente efic	az del capac	titor Irms no debe exceder de 1.51 _{1N} (corriente que se presenta a
de la red y	voltaje nominal	y frecuencia	nominal). Sin tomar en cuenta la toleracia de la capacitancia,
armónicas		la co	rriente eficaz no puede exceder 1.3I _{IN} .

Tabla 4.8 Voltajes máximos permisibles (voltajes de larga duración) [36]

Una vez que se tiene la reactancia capacitiva del banco y se conoce el orden de la armónica de sintonía, la reactancia inductiva del reactor se obtiene de la ecuación 4.5 [13]:

$$X_{L1} = \frac{X_{C1}}{n_{sint}^2}$$
(4.9)

Para que el filtro sea altamente selectivo a las componentes armónicas que existen en el sistema eléctrico se requiere que el reactor tenga un factor de calidad elevado. Por lo regular los factores de calidad de los reactores están dentro del siguiente intervalo: $20 \le Q \le 100$ [13].

Si el factor de calidad del reactor es [13]:

$$Q = \frac{n_{sint} X_{L1}}{R}$$
(4.10)

la resistencia R del reactor se calcula como [13]:

$$R = \frac{n_{sini}X_{L1}}{Q}$$
(4.11)

La corriente que puede circular por el filtro para cualquier componente armónica es:

$$_{n} = \frac{V_{n}}{\sqrt{R^{2} + (nX_{LI} - \frac{X_{CI}}{n})^{2}}}$$
(4.12)



De la ccuación anterior se puede conocer la corriente de componente fundamental, la cual es de interés ya que la fuente de tensión provoca una corriente de la misma frecuencia en el filtro. Además, el banco de capacitores tiene el propósito de compensar la potencia reactiva requerida y eso lo realiza a frecuencia fundamental.

La otra corriente que interesa conocer es aquella cuya frecuencia corresponde a la de sintonía del filtro, que es precisamente la que se desea filtrar impidiendo su propagación hacia el resto del sistema eléctrico.

En la figura 4.11 se observa una red eléctrica con una fuente de tensión a frecuencia fundamental V_1 que motiva por el filtro una corriente I₁, también circula una corriente armónica correspondiente a la frecuencia de sintonía I_{nsint}, que es generada por los dispositivos no lineales y por la distorsión de voltaje en la fuente a la frecuencia de sintonía, V_{nsint} . El dispositivo no lineal genera diversas componentes armónicas, las cuales pueden circular en el filtro con magnitudes pequeñas, y por este motivo no son consideradas.



Figura 4.11

No toda la corriente generada por el dispositivo no lineal circula por el filtro, una parte fluye hacia al sistema y esto depende de la impedancia del sistema, Z_s . Si la impedancia del filtro en la componente de sintonía es mayor que la ofrecida por el sistema, la mayor parte de la corriente fluye hacia el sistema y el filtro no es de utilidad.

En la armónica de sintonía, la impedancia del filtro tiene su magnitud mínima y la corriente está limitada únicamente por el valor de la resistencia del inductor. Bajo estas condiciones el voltaje para la componente armónica de sintonía es:

$$V_{nsint} = I_{max} R \tag{4.13}$$

Para cualquier otra componente armónica el voltaje y la corriente en el filtro se relacionan mediante la siguiente expresión:

$$\mathbf{V}_{\mathbf{n}} = \mathbf{I}_{\mathbf{n}} \mathbf{Z}_{\mathbf{n}} \tag{4.14}$$

Si la corriente en el filtro alcanza valores muy elevados, las tensiones que aparecen en el reactor y los capacitores también son muy elevadas. Esto implica una reducción en la vida útil de estos elementos, por los daños que le ocasionan las sobretensiones al aislamiento.



Una forma de limitar la corriente circulante por el filtro es añadiendo un resistor en serie con el reactor y el banco de capacitores, sin embargo, se tiene el inconveniente de reducir el factor de calidad Q del filtro, el cual se hace menos selectivo y permite el paso de una mayor gama de corrientes a distintas frecuencias a la de sintonía.

Al ser el filtro un circuito resonante tiene un cierto ancho de banda, fuera de este rango de frecuencias la impedancia del filtro puede ser lo suficientemente elevada como para limitar por sí sola a la corriente. Una segunda opción puede ser sintonizar al filtro a una frecuencia distinta, de modo que la impedancia del filtro limite la corriente sin disminuir su factor de calidad.

Para limitar la cantidad de corriente del filtro en base a su propia impedancia, se requiere conocer el orden de la componente armónica que provoca que la impedancia del filtro limite la corriente a un cierto valor deseado. Para lograr esto se parte de la consideración de que la corriente I_n es una fracción de la corriente máxima que puede circular por el filtro:

$$l_n = a l_{max}$$
(4.15)

en donde:

Si se despeja la corriente máxima y se sustituye en la ccuación 4.13, el voltaje de sintonía V_{nsint} es:

$$V_{nsint} = \frac{l_n}{a} R$$
 (4.16)

considerando que $V_{nsint} = V_n$, se tiene la siguiente relación de impedancias para el filtro:

$$\frac{R}{a} = Z_n \tag{4.17}$$

La impedancia del filtro para cualquier componente armónica es:

$$Z_{n} = \sqrt{R^{2} + \left(nX_{Li} - \frac{X_{Ci}}{n}\right)^{2}}$$
(4.18)

y sustituyendo la ecuación 4.18 en la 4.17 y elevando al cuadrado se tiene:

a es un número tal que 0 < a < 1.

$$\frac{R^2}{a^2} = R^2 + \left(nX_{L1} - \frac{X_{Cl}}{n}\right)^2$$
(4.19)

agrupando las resistencias en el lado izquierdo de la igualdad:

$$\frac{R^2}{a^2} - R^2 = \left(nX_{L1} - \frac{X_{C1}}{n}\right)^2$$
(4.20)

obteniendo la raiz cuadrada en ambos lados de la igualdad y considerando únicamente las raices positivas:



$$\frac{R}{a}\sqrt{1-a^2} = nX_{L1} - \frac{X_{C1}}{n}$$
(4.21)

y finalmente se tiene:

$$nX_{L1} - \frac{X_{C1}}{n} - \frac{R}{a}\sqrt{1 - a^2} = 0$$
(4.22)

La ccuación anterior presenta dos casos: cuando $nX_{Li} > \frac{X_{Ci}}{n}$ y cuando $nX_{Li} < \frac{X_{Ci}}{n}$. Se analizarán ambos casos para conocer el orden de la componente armónica.

Cuando $nX_{L1} > \frac{X_{C1}}{n}$ la ecuación 4.22 no se altera, entonces, tomando a "n" como común denominador se tiene:

$$\frac{X_{LI}n^2 - X_{CI} - \frac{R}{a}\sqrt{1 - a^2}n}{n} = 0$$
(4.23)

simplificando la ecuación anterior y reordenando los términos:

$$X_{L1}n^2 - \frac{R}{a}\sqrt{1 - a^2}n - X_{C1} = 0$$
(4.24)

normalizando los coeficientes de la ecuación 4.24 se obtiene:

$$n^{2} - \frac{R}{a} \frac{\sqrt{1 - a^{2}}}{X_{L1}} n - \frac{X_{C1}}{X_{L1}} = 0$$
(4.25)

obteniendo las raices de la ecuación anterior se tiene:

$$n = \frac{\frac{R\sqrt{1-a^2}}{aX_{L1}} \pm \sqrt{\frac{R^2(1-a^2)}{a^2X_{L1}^2} + 4\frac{X_{C1}}{X_{L1}}}}{2}$$
(4.26)

Como el miembro derecho siempre es mayor al izquierdo, se toma la parte positiva para no obtener valores negativos de la componente armónica "n":

$$H_{Y} = \frac{\frac{R\sqrt{1-a^{2}}}{aX_{L1}} + \sqrt{\frac{R^{2}(1-a^{2})}{a^{2}X_{L1}^{2}} + 4\frac{X_{C1}}{X_{L1}}}}{2}$$
(4.27)

Cuando $nX_{1,1} < \frac{X_{C1}}{n}$ la ecuación 4.22 se convierte en:



$$-nX_{L1} + \frac{X_{C1}}{n} - \frac{R}{a}\sqrt{1 - a^2} = 0$$
(4.28)

siguiendo un procedimiento similar al anterior se obtiene la ecuación:

$$n = \frac{-\frac{R\sqrt{1-a^2}}{aX_{L1}} \pm \sqrt{\frac{R^2(1-a^2)}{a^2X_{L1}^2} + 4\frac{X_{C1}}{X_{L1}}}}{2}$$
(4.29)

y un razonamiento similar lleva a obtener el valor de la otra componente armónica:

$$n_{X} = \frac{-\frac{R\sqrt{1-a^{2}}}{aX_{L1}} + \sqrt{\frac{R^{2}(1-a^{2})}{a^{2}X_{L1}^{2}} + 4\frac{X_{C1}}{X_{L1}}}{2}$$
(4.30)

La corriente por el filtro está limitada al valor asignado a la corriente l_n cuando el filtro se sintoniza a los valores de n_x o n_y .



Figura 4.12

Figura 4.13

Una vez que conocen los valores de "n" en donde la impedancia limita el valor de la corriente a un cierto valor requerido, se puede calcular el valor necesario del reactor para sintonizar el filtro a esta componente. En la figura 4.12 se muestra que, cuando el orden de armónica de sintonía n_{sint} coincide exactamente con el orden de la corriente armónica que se desea filtrar n_F, la corriente en el filtro alcanza su máximo valor posible l_{max}. El ancho de banda del filtro está delimitado por n_x y n_y y exactamente a esos valores se observa que la corriente en el filtro es igual a I_n.

Al mover la frecuencia de sintonía n_{sint} del filtro a n_x , como se muestra en la figura 4.13, se observa que ahora la corriente máxima se ubica en el orden n_x , y que la corriente I_n coincide con el



orden n_F de la componente que se desea filtrar, pero que también se requiere limitar en magnitud. Al limitar la corriente que pasa por el filtro se limitan las sobretensiones que pueden aparecer en los capacitores o en el reactor motivadas por la circulación de corrientes armónicas cercanas a la frecuencia de sintonía.

El orden de sintonía se puede obtener de n_x o de n_y . Por lo regular, los filtros se sintonizan a una componente por debajo de la que se desea filtrar, debido a que la pérdida de capacitancia del banco hace que la frecuencia del sintonía del filtro se acerque a la frecuencia de la armónica que se desea filtrar. Si la sintonía fuera por encima de la frecuencia de filtrado la pérdida de capacitancia provoca que la frecuencia de sintonía se aleja de la frecuencia de filtrado.

La selección del valor de "a" implica un compromiso entre el valor seleccionado y el orden de sintonía que se obtiene a partir de la ecuación 4.30. Por una parte, un valor muy pequeño de "a" puede provocar que la frecuencia de sintonía esté mucho más cerca de otra componente armónica presente en el sistema, que de la que se pretende filtrar, de forma que el filtro no estaría realizando la función para la cual se concibió originalmente.

Por otra parte, valores de "a" cercanos a la unidad tampoco lograrán el control de corriente que se busca al desplazar la frecuencia de sintonía. En la curva de respuesta en frecuencia del filtro, se puede ver que las corrientes de frecuencias cercanas a la de sintonía tienen valores también muy elevados, lo cual es provocado porque el factor de calidad del filtro es alto.

Una forma de obtener el valor de "a" es sugiriendo el valor que se desca tenga la corriente en la componente armónica n_x . Este valor de corriente debe ser bajo, ya que se parte de la suposición que la corriente armónica de orden n_x tiene un valor pequeño. De esta forma a partir de la ecuación 4.15 se obtiene el valor de "a":

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{l}_{\mathbf{n}}}{\mathbf{l}_{\max}} \tag{4.31}$$

Considerando ahora n_x como el orden de sintonia, es decir $n_{sint} = n_x$, y conociendo el valor de X_{c1} , se puede calcular el valor de X_{L1} que hace que el filtro se sintonice a este orden:

$$X_{L1} = \frac{X_{C1}}{n_X^2}$$
(4.32)

la inductancia puede calcularse a partir de la reactancia obtenida:

$$L = \frac{X_{11}}{120\pi}$$
(4.33)

(4.34)

y la capacitancia se calcula como:

$$=\frac{1}{120\pi X_{CI}}$$

La resistencia del inductor se calcula mediante la ecuación 4.10:

C

$$R = \frac{n_X X_{L1}}{Q}$$
(4.35)

Dado que el filtro está sintonizado en la armónica de orden n_x , la impedancia que ofrece el filtro en la armónica de orden n_F , que es la que se desea filtrar es:

$$Z_{n_{\rm f}} = \sqrt{R^2 + \left(n_{\rm F} X_{\rm L1} - \frac{X_{\rm C1}}{n_{\rm F}}\right)^2}$$
(4.36)

La tensión a la que se ve sometido el banco de capacitores principalmente es la motivada por la componente de frecuencia fundamental. La tensión en el banco de capacitores se puede calcular como:

 $V_{c} = I_{1}X_{c1}$ (4.37)

La corriente l₁ motivada por la fuente de voltaje de frecuencia fundamental puede calcularse fácilmente como:

$$I_{1} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}\sqrt{R^{2} + (X_{L1} - X_{C1})^{2}}}$$
(4.38)

Si el resultado obtenido para V_c es mayor al voltaje de los capacitores, se tiene que modificar la capacidad del banco y su tensión de operación, de forma que los capacitores no se vean sometidos a sobretensiones, o bien, si la tensión de los capacitores (diseño del filtro) es mayor a la tensión de operación del sistema en donde se instalarán, la capacidad del banco también se ve afectada.

Si el banco entrega una potencia reactiva (llamada nominal) $Q_{C oper}$ cuando se alimenta con una tensión (llamada de operación) V_{oper} , su reactancia es X_{C1} y los tres parámetros se relacionan mediante:

$$\frac{Q_{C \text{ oper}}}{V_{oper}^2} = \frac{1}{X_{CI}}$$
(4.39)

Si los capacitores del banco tienen una tensión nominal V_{nom} (también llamada de diseño), la potencia nominal del banco $Q_{C nom}$ se relaciona con la tensión y la reactancia como:

$$\frac{Q_{C nom}}{V_{nom}^{2}} = \frac{1}{X_{C1}}$$
(4.40)

Igualando las ecuaciones 4.39 y 4.40 se tiene:

$$\frac{Q_{C oper}}{V_{oper}^2} = \frac{Q_{C nom}}{V_{nom}^2}$$
(4.41)

despejando QC nom se obtiene:



$$Q_{C \text{ nom}} = \frac{V_{\text{nom}}^2}{V_{\text{oper}}^2} Q_{C \text{ oper}}$$
(4.42)

en donde:

V_{oper} es el voltaje al cual opera el bancos de capacitores,

Vnom es el voltaje nominal de los capacitores del banco (tensión de diseño),

Q_{C oper} es la potencia reactiva de operación del banco de capacitores y

Q_{C nom} es la potencia reactiva nominal (potencia de diseño) del banco de capacitores

Aunque los valores de diseño son $Q_{C nom}$ y V_{nom} el banco de capacitores entrega una potencia reactiva $Q_{C oper}$ cuando se alimenta con un voltaje V_{oper} .

La potencia del reactor se calcula como:

$$Q_{L} = I_{1}^{2} Z_{L1} + I_{n}^{2} Z_{Ln}$$
(4.43)

El reactor, a diferencia del banco de capacitores, no está diseñado para ser sometido a tensión de componente fundamental, por este motivo, la tensión desarrollada por la componente armónica que se requiere filtrar también debe ser considerada:

$$V_{L} = Z_{L1}I_{1} + Z_{Ln}I_{n}$$
(4.44)

Finalmente las especifaciones del filtro sintonizado son:

a) Banco de capacitores.

•	Potencia	nominal	0
-	1 Oteneia	nonnai.	

- Potencia de operación: Q_{C oper}
- Voltaje nominal: V_{nom}
- Voltaje de operación: V_{oper}
- Reactancia: X_{C1}

b) Inductor.

- Potencia: Q_L
- Voltaje de operación: V_L
- Inductancia:
- Resistencia:
- Factor de calidad:
- Reactancia: X_{L1}
- c) Filtro.
 - Potencia:

 $Q_L - Q_{Cnom}$

L

R

Q



4.4.3 Filtros activos

Los filtros activos constituyen otro medio para la atenuación o mitigación de las corrientes armónicas y proporcionan soluciones sobre algunas de las desventajas inherentes a los filtros pasivos como [13]:

- Las características del filtrado con dependencia de la impedancia de la fuente.
- Alteración de la impedancia por debajo de la armónica de sintonía de orden más bajo.
- De uso inadecuado para filtrar armónicas no características, distintas a la de sintonía, como en el caso de ciclo convertidores, o entornos donde el espectro armónico es inestable.

El filtro activo genera un espectro armónico que es opuesto en ángulo de fase (180° de desfasamiento) a las corrientes armónicas existentes en el sistema eléctrico. La corriente del filtro activo es inyectada al sistema de forma que en el punto de unión, la suma fasorial de las componentes armónicas del sistema y las del filtro activo es nula quedando únicamente en la corriente de componente fundamental [13].

Por ejemplo, un rectificador de seis pulsos con transformador delta - estrella a la entrada tiene una corriente dada por la ecuación:

$$i_{A}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} l \left(\cos(\omega t) + \frac{1}{5} \cos(5\omega t) - \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} (\cos(13\omega t)) + \ldots \right)$$

entonces el filtro activo genera un espectro armónico de la siguiente forma:

$$i_{Fil}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \left[\left(-\frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) + \frac{1}{11} \cos(11\omega t) - \frac{1}{13} (\cos(13\omega t)) - \ldots \right) \right]$$

al sumarse ambas corrientes en el punto de unión entre el filtro y el sistema eléctrico la corriente resultante es:

$$i_{\text{Total}}(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I \cos(\omega t)$$

que corresponde únicamente a la componente fundamental de la corriente del rectificador de seis pulsos, desapareciendo las componentes armónicas de la corriente.

Aunque el filtro activo es una solución muy versátil al problema de las componentes armónicas, su principal inconveniente es su costo, el cual puede ser hasta 10 veces mayor al de un filtro pasivo.

4.5 Otras normas sobre los límites de distorsión armónica

Otros organismos, además del IEEE, se han dado la tarea de elaborar normas en donde se especifican los valores límites recomendados para la distorsión en la corriente y el voltaje.

[-	CON CON	ſ
		CORIGEN	

4.5.1 Normas del IEC

La norma IEC 61000-2-4 establece los siguientes límites de distorsión de voltaje en base a una clasificación de instalaciones [13]:

- THD_V \leq 8% para clase 2 y THD_V \leq 10% para clase 3.
- Clase 2 aplica al punto de acoplamiento común (PCC) y al punto de acoplamiento dentro de la planta (IPC, In-plant Point of Coupling).
- Clase 3 aplica únicamente al punto de acoplamiento dentro de la planta (IPC) en entornos industriales.

Los valores límites de distorsión del voltaje para redes públicas en baja tensión se muestran en la tabla 4.9 [13]. La norma IEC 61000-3-2 establece los límites para las emisiones de corrientes armónicas, en base a cuatro clasificaciones de equipos de aplicaciones distintas y con diferentes niveles de tensión [13]. En la tabla 4.10 se muestran los valores para un equipo clase D (corriente con forma de onda especial y cuya potencia sea menor o igual a 600 W) [13].

Armónica	is impares	Armóni	cas pares	Armónic	as triples
n	% V _n	n	% V _n	n	%V _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6	0.5	15	0.3
13	3	8	0.5	≥ 21	0.2
17	2	10	0.5		A LAND TO A
19	1.5	≥ 12	0.2		
23	1.5		A	-	
25	1.5				
≥ 29	x				

 $THD_V \le 8\%$ para todas las armónicas hasta la 40.

x = 0.2 + 12.5/n. Para $n = 29, 31, 35, 37, V_n = 0.63, 0.60, 0.56, 0.54\%$

Tabla 4.9 Límites de distorsión armónica del voltaje en redes públicas de baja tensión [13]

n	3	5	7	9	11	13	15 39
Max I _n , A	2.3	1.14	0.40	0.33	0.21	0.15	0.15×15/n

Corriente de entrada del equipo ≤ 16 A por fase

Tabla 4.10 Límites de corrientes de corrientes armónicas permisibles para equipos clase D [13]

4.5.2 Norma CFE-L0000-45

La Comisión Federal de Electricicad, en su norma CFE L000045 "Perturbaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente del suministro de energía eléctrica", establece los valores máximos de distorsión armónica total y de las componentes armónicas para voltajes y corrientes [39].

TESIS CON	
FALLS TO ORIGEN	

Tensión en kV	Clasificación de tensión	Distorsión armónica total	Distorsión armónica individual
Menor de 1	Baja tensión	8.0%	5.0%
1 a 69	Distribución	5.0%	3.0%
70 a 138	Subtransmisión	2.5%	1.5%
Mayor de 138	Transmisión	1.5%	1.0%

 Tabla 4.11 Límites máximos de distorsión armónica total e individual de la tensión en el punto de acoplamiento común [39]

Impedancia	Distors	Distorsión armónica máxima para tensiones hasta de 69 kV					
relativa	_	Para armónicas impares (%)					
I _{SC} / I _L	h11	11h17	17h23	23h35	35h	demanda	
(I _{sc} / I _L)<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5	
20<(I _{SC} / I _L)<50	7	3.5	2.5	1	0.5	8	
50<(I _{SC} / I _L)<100	10	4.5	4	1.5	0.7	12	
100<(Isc / IL)<1000	12	5.5	5	2	1	15	
$(I_{SC} / I_L) > 1000$	15	7	6	2.5	1.4	20	
 Notas 1. En el caso de armónicas pares los límites se reducen al 25% de los correspondientes a armónicas impares. 2. Los límites mostrados en la tabla deben ser utilizados como el caso más desfavorable de operación normal. Para arranque de hornos eléctricos de arco, que toman un tiempo máximo de un minuto, se permite exceder los límites de la tabla en el 50%. 3. En ningún caso se permiten corrientes de carga con componentes de corriente directa 							

Tabla 4.12 Distorsión armónica máxima permitida en corriente para tensiones hasta de 69 kV [39]

	Distorsión armónica máxima para tensiones mayores a 69 kV y hasta						
Impedancia			161 kV			Distorsión	
relativa		Para a	irmónicas impa	ares (%)		total de la	
I _{SC} / I _L	h11	11h17	17h23	23h35	35h	demanda	
$(l_{SC} / l_L) < 20$	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5	
20<(1 _{SC} / 1 _L)<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0	
50<(I _{sc} / I ₁)<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0	
100<(I _{SC} / I _L)<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5	
$(l_{sc} / l_L) > 1000$	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0	
Notas 1. En el	Notas 1. En el caso de armónicas pares los límites se reducen al 25% de los correspondientes a						
armór	icas impares.						
2. Los li	2. Los límites mostrados en la tabla deben ser utilizados como el caso más desfavorable de						
operad	operación normal. Para arranque de hornos eléctricos de arco, que toman un tiempo						
máxin	máximo de un minuto, se permite exceder los límites de la tabla en el 50%.						
3. En nir	ngún caso se p	ermiten corrie	ntes de carga c	on component	es de corriente	directa.	

Tabla 4.13 Distorsión armónica máxima permitida en corriente para tensiones mayores de 69 kV y hasta 161 kV [39]

	TESIS	CON	
<u>)</u> /,]	an an sing. Selation di	CEN	January 1

· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·			/	<u>ecnicas para e</u>	<u>i controt ae t</u>	<u>as armonicas</u>	
Impedancia	Distorsi	Distorsión armónica máxima para tensiones mayores a 161 kV					
relativa		Para armónicas impares (%)					
I _{SC} / I _L	h11	11h17	17h23	23h35	35h	demanda	
(I _{SC} / I _L)<50	2	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5	
(I _{SC} / I _L)>50	3	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75	
Notas 1. En el caso de armónicas pares los límites se reducen al 25% de los correspondientes a armónicas impares. 2. Los límites mostrados en la tabla deben ser utilizados como el caso más desfavorable de operación normal. Para arranque de hornos eléctricos de arco, que toman un tiempo máximo de un minuto, se permite exceder los límites de la tabla en el 50%. 3. En pincín gers en permite parestrue de normanentes de aprimetro directo.						dientes a nvorable de iempo e directa.	

Tabla 4.14 Distorsión armónica máxima permitida en corriente para tensiones mayores de 69 kV y hasta 161 kV [39]

El contenido armónico de la tensión en el punto de acoplamiento común debe estar limitado, de forma que los valores máximos de la distorsión armónica total y de las componentes armónicas individuales, para las tensiones entre fases y a tierra no excedan los límites de distorsión establecidos en la tabla 4.11 [39].

Para limitar la distorsión en la tensión a estos valores, la norma recomienda a los consumidores limitar el contenido armónico en la corriente que le demandan al suministro eléctrico, de acuerdo a la impedancia relativa del sistema [39].

Los valores dados en las tablas 4.11, 4.12, 4.13 y 4.14 se consideran como el peor caso de operación en forma continua. Se permite que las distorsiones sean hasta un 50% mayores a lo que marcan las tablas para condiciones de operación excepcionales, por ejemplo el arranque de un horno de arco, que tiene una duración de un minuto. El tiempo total en que la distorsión puede ser entre 100 y 150% de lo indicado en las tablas es de un máximo de una hora en un periodo de 24 horas [39].

5. Simulación de un caso de distorsión armónica

5.1 Introducción

Las simulaciones por computadora, constituyen un medio muy valioso para evaluar la operación de un dispositivo diseñado para mitigar las componentes armónicas en un sistema eléctrico, antes de que sea puesto en operación.

El uso de simuladores, como una parte del diseño de los filtros pasivos sintonizados, permite la evaluación en forma anticipada de la operación del filtro o la verificación de que el filtro realmente cumpla la función para la cual fue diseñado. Las simulaciones, incluso permiten observar el comportamiento que puede tener el sistema eléctrico cuando el filtro es incorporado, permitendo observar ciertos fenómenos como resonancias, comportamiento sistema durante transitorios y variaciones de la corriente del sistema eléctrico (cambio en el espectro), entre otros.

5.2 Planteamiento del problema

El sistema eléctrico a simular consiste en una planta, cuya tensión de alimentación es 23 kV, la potencia de cortocircuito del alimentador es de 250 MVA. La planta tiene un transformador reductor de 750 kVA, en conexión delta - estrella, con relación de transformación de 23 kV/480 V.



Existe un tablero principal de distribución que se ha denominado BUSP. De este tablero se deriva un circuito que alimenta al tablero identificado como BUS1, las cargas conectadas en dicho

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Simulación de un caso de distorsión armónica

tablero son cuatro rectificadores, a base de diodos, de 56 kVA cada uno. También existen otras cargas asociadas, las cuales son a base de dispositivos lineales, cuyo consumo total es de 270 kVA con un factor de potencia de 0.82 inductivo en conjunto. Del tablero principal se deriva otro cicuito que alimenta al tablero BUS2; de dicho tablero se alimentan cargas a base de dispositivos lineales, cuyo consumo total es de 150 kVA con factor de potencia unitario. Finalmente se tiene un tercer circuito que se deriva del tablero BUSP, dicho circuito alimenta al tablero BUS3. El rectificador de 56 kVA concardo a BUS3 será añadido a futuro. En la figura 5.1 se muestra el diagrama unifilar para la planta.

El diagrama eléctrico para cada uno de los rectificadores se muestra en la figura 5.2.





El rectificador de seis pulsos que se utilizó se muestra en la figura 5.2. Los diodos fueron numerados del 1 al 6, para identificarlos con facilidad; las resistencias de 0.01 Ω son para observar la corriente a la entrada del rectificador.

Se usó una configuración a base de diodos que ofrece un voltaje de salida fijo, sin embargo, los rectificadores a base de tiristores son más utilizados ya que permiten controlar el nivel de tensión en el lado de corriente directa, mediante el retardo del pulso aplicado en su compuerta, de acuerdo a las necesidades de la carga.

Una de las principales ventajas de los rectificadores controlados es su gran eficiencia, superior al 95%. Los rectificadores controlados se utilizan enormemente a nivel industrial, especialmente como manejadores (drives) de velocidad variable [20]. Cuando un rectificador a base de tiristores disminuye su voltaje en el lado de directa, la distorsión en la corriente en el lado de CA aumenta debido a que el intervalo de conducción de la corriente es menor.

5.3 Cálculos previos a la simulación

Se establecieron ciertos parámetros dentro del sistema eléctrico a simular, como la potencia de cortocircuito del alimentador y un conjunto de cargas agrupadas en el modelo de la planta industrial. En



Simulación de un caso de distorsión armónica

esta sección se presenta la memoria de cálculo que permitió incorporar dichos parámetros como elementos programables en el ATP.

5.3.1 Reactancia de Thevenin del alimentador

La potencia que el alimentador entrega al transformador principal de la planta es:

$$S = \sqrt{3}VI \tag{5.1}$$

and the state of the second second

y por otra parte la potencia de cortocircuito que es capaz de entregar el alimentador se calcula como:

Si se divide el miembro izquierdo de la ecuación 5.1 entre el izquierdo de la 5.2, de la misma forma se realiza la división de los miembros derechos de ambas ecuaciones y se tiene que la potencia de cortocircuito en por unidad es:

$$S_{CCpu} = \frac{S_{CC}}{S} = \frac{\sqrt{3}VI_{CC}}{\sqrt{3}VI} = \frac{I_{CC}}{1}$$
(5.3)

de donde se observa que la potencia de cortocircuito en por unidad es igual a la corriente de cortocircuito, también en por unidad:

$$S_{CCpu} = \frac{I_{CC}}{I} = I_{CCpu}$$
(5.4)

La reactancia de Thevenin en por unidad del sistema es: Vra-

$$X_{\text{Thpu}} = \frac{V_{\text{Thpu}}}{l_{\text{CCpu}}}$$
(5.5)

si se considera que el voltaje de Thevenin en por unidad es igual a uno entonces se tiene que la reactancia de Thevenin puede calcularse como:

$$X_{\text{Thpu}} = \frac{1}{I_{\text{CCpu}}} = \frac{1}{S_{\text{CCpu}}}$$
(5.6)

Para determinar el valor de la reactancia de Thevenin se calcula una reactancia base como:

$$X_{\text{Thbase}} = \frac{V^2}{S}$$
(5.7)

de esta forma la reactancia de Thevenin en por unidad se determina como:

$$X_{Thpu} = \frac{X_{Th}}{X_{Thbase}}$$
(5.8)

y finalmente la reactancia de Thevenin del alimentador es:

$$X_{\rm Th} = X_{\rm Thpu} \times X_{\rm Thhase}$$
(5.9)

Para incorporar dicha reactancia como un elemento programable en el ATP se requiere el valor de su inductancia:

$$L = \frac{X_{Th}}{120\pi}$$
(5.10)

Los datos utilizados para realizar el cálculo de la reactancia de Thevenin del alimentador, así como el procedimiento de cálculo, se presentan a continuación:

 $S_{CC} = 250 \text{ MVA}$ S = 750 kVAV = 23 kV

Potencia de cortocircuito en por unidad:

$$S_{CCpu} = \frac{250 \times 10^6}{750 \times 10^3} = 333.3333 \, pu$$

Reactancia de Thevenin en por unidad:

$$X_{Thpu} = \frac{1}{333.3333} = 0.003 \, pu$$

Reactancia base de Thevenin:

$$X_{\text{Thbase}} = \frac{\left(23 \times 10^3\right)^2}{750 \times 10^3} = 705.3333\Omega$$

Reactancia de Thevenin del alimentador:

$$X_{\rm Tb} = 705.3333 \times 0.003 = 2.116 \ \Omega$$

Inductancia del alimentador:

$$L = \frac{2.116}{120\pi} = 5.6128 \,\text{mH}$$

5.3.2 Cargas R-L agrupadas en el tablero BUS1

La magnitud de la impedancia equivalente de la carga, considerando que se encuentra conectada entre los conductores de fase y el neutro, es:

	<u>אור</u>	<u>, 15</u>	CON	
FAL	<u>i</u> l'	<u>DI</u>	ORIC	EN

Simulación de un caso de distorsión armónica

$$|\mathbf{Z}| = \frac{\mathbf{V}}{\sqrt{3}\mathbf{I}} \tag{5.11}$$

de donde se conoce el valor de la tensión aplicada V, la corriente se calcula como:

$$l = \frac{S}{\sqrt{3}V}$$
(5.12)

Para conocer completamente la impedancia se requiere su ángulo de fase, el cual es el ángulo entre el voltaje y la corriente:

$$0_{\rm Z} = 0 = \cos^{-1}({\rm fp}) \tag{5.13}$$

con lo cual la impedancia en forma polar es:

$$\mathbf{Z} = |\mathbf{Z}| \frac{\mathbf{0}_{\mathbf{Z}}}{\mathbf{0}_{\mathbf{Z}}}$$
(5.14)

y en forma binómica la impedancia es:

$$Z = |Z|\cos(\theta_z) + j|Z|\sin(\theta_z)$$
(5.15)

La resistencia de la impedancia es la parte real:

$$R = |Z|\cos(\theta_z) \tag{5.16}$$

mientras que la reactancia de la impedancia corresponde a la parte imaginaria:

$$X_{1} = |Z| \operatorname{sen}(\theta_{Z})$$
(5.17)

y la inductancia correspondiente es:

$$L = \frac{X_L}{120\pi}$$
(5.18)

Los datos utilizados para realizar el cálculo de la resistencia y la inductancia de las cargas agrupadas, así como el procedimiento de cálculo, se presentan a continuación:

S = 270 kVAV = 480 V fp = 0.82

Corriente de las cargas agrupadas:

$$1 = \frac{270 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 480} = 324.7595 A$$



Simulación de un caso de distorsión armónica

Ángulo de la impedancia:

$$0_{\chi} = \cos^{-1}(0.82) = 76.3543^{\circ}$$

Magnitud de la impedancia:

$$|Z| = \frac{480}{\sqrt{3}(324.7595)} = 0.8533 \Omega$$

Componente resistiva de la impedancia:

$$R = 0.8533\cos(76.3543) = 0.2013\Omega$$

Componente reactiva de la impedancia:

$$X_{1} = 0.8533 \operatorname{sen}(76.3543) = 0.8292 \Omega$$

Inductancia equivalente de las cargas agrupadas;

$$L = \frac{0.8292}{120\pi} = 2.1995 \,\mathrm{mH}$$

5.3.3 Cargas R agrupadas en el tablero BUS2

Debido a que el factor de potencia es unitario, la potencia aparente es igual a la potencia activa, de forma que la corriente es:

din hariya da kara da k

이야구는 방법 전 위험을 가지?

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}v}$$
(5.19)

y la resistencia, considerando que la carga se encuentra conectada en estrella, se calcula como:

$$R = \frac{V}{\sqrt{3}I}$$
(5.20)

Los datos utilizados para realizar el cálculo de la resistencia de las cargas agrupadas en el tablero BUS2, así como el procedimiento de cálculo se presentan a continuación:

S = 150 kVAV = 480 V

Corriente de las cargas agrupadas:

$$=\frac{150\times10^{3}}{\sqrt{3}(480)}=180.4219$$
 A



Resistencia por fase:

$$R = \frac{480}{\sqrt{3}(180.4219)} = 1.5360 \ \Omega$$

5.3.4 Parámetros eléctricos del transformador

Para determinar los parámetros del circuito equivalente del transformador, se requieren los resultados de las pruebas de circuito abierto (pérdidas magnéticas) y cortocircuito (pérdidas eléctricas). A continuación se presentan los datos principales y los resultados de las pruebas a un transformador.

	1	Lado del transformador				
Característica	Al	Alta tensión		Baja tensión		
Capacidad en kVA		750.0		750.0		
Tensión en kV		23.0		0.480		
Conexión		Delta		Estrella		
BIL en kV		150.0		30.0		
Material del devanado		Cobre	obre			
Material del núcle	o: Acero ARMCO o	rientado M-4 de 0.01	1" de espeso	or (0.27 mm)		
Tipo de enfriamiento OA		Elevación de t	Elevación de temperatura			
Número de fases	de fases 3		Frecuencia			
Altitud de operación	2300 MSNM	Tipo de r	úcleo	Rectangular		

Tabla 5.1 Características principales del transformador

Prueba realizada en el transformador	Resultado de la medición	
Pérdidas de excitación a voltaje nominal, 60 Hz	1445 W	
Corriente de excitación a voltaje nominal, 60 Hz	0.824%	
Pérdidas de carga a corriente nominal, 60 Hz a 85 °C	8763 W	
Impedancia a corriente nominal, 60 Hz	6.669%	
Pérdidas totales a 85 °C	10208 W	

Tabla 5.2 Resultados de las pruebas de pérdidas magnéticas y eléctricas

a) Determinación de los parámetros en base a la prueba de pérdidas magnéticas

La corriente de nominal del transformador en el lado primario se calcula como:

$$I_1 = \frac{S}{\sqrt{3}V_1}$$
(5.21)

y la corriente de excitación se obtiene como una fracción de la corriente nominal de acuerdo al dato de la tabla 5.2:

 $I_0 =$

(5.22)



en donde: "a" es el valor en por unidad de la corriente de excitación a voltaje nominal indicado en la tabla 5.2.

La componente de pérdidas en el fierro de la corriente de excitación se determina como

$$I_{Fe} = \frac{P_{mag}}{\sqrt{3}V_1}$$
(5.23)

La corriente de excitación y sus componentes son corrientes de línea, para obtener su magnitud en la delta entonces se utiliza la siguiente expresión:

$$I_{Fe-D} = \frac{I_{Fe}}{\sqrt{3}}$$
(5.24)

En un devanado la tensión, la corriente de pérdidas en el hierro y la resistencia que representa a dichas pérdidas se relacionan mediante:

$$V_1 = R_{Fe} I_{Fe-D}$$
(5.25)

finalmente la resistencia que representa a las pérdidas en el núcleo es:

$$\mathbf{R}_{\mathbf{Fe}} = \frac{V_1}{\mathbf{I}_{\mathbf{Fe}-\mathbf{D}}}$$
(5.26)

Los datos utilizados para realizar el cálculo de la resistencia de pérdidas en el núcleo, así como el procedimiento de cálculo, se presentan a continuación:

S = 750 kVA $V_1 = 23 \text{ kV}$ a = 0.00824 $P_{mag} = 1445 \text{ W}$

Corriente nominal del transformador en el lado primario:

$$I_1 = \frac{750 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 23 \times 10^3} = 18.8266 \text{ A}$$

Corriente de excitación del transformador en el lado primario:

$$l_0 = 0.00824 \times 18.8266 = 0.1551 A$$

Corriente de pérdidas en el fierro:

$$I_{Fe} = \frac{1445}{\sqrt{3} \times 23 \times 10^3} = 0.03627 \text{ A}$$

Corriente de pérdidas en el fierro en los devanados de la delta:


$$I_{\rm Fe-D} = \frac{0.03627}{\sqrt{3}} = 0.02094 \text{ A}$$

Resistencia de pérdidas en el núcleo:

$$R_{Fe} = \frac{23 \times 10^3}{0.02094} = 1.098376 \text{ M}\Omega$$

b) Determinación de los parámetros en base a la prueba de pérdidas eléctricas

Las pérdidas eléctricas se relacionan con la corriente y con el voltaje reducido (de prueba) en el lado primario como:

$$P_{elce} = \sqrt{3} V_{red} I_1$$
(5.27)

de forma que el voltaje reducido en el primario es:

$$V_{\text{red}1} = \frac{P_{\text{clec}}}{\sqrt{3}I_1}$$
(5.28)

La resistencia equivalente de pérdidas eléctricas se calcula, en conexión estrella, referida al lado primario como:

$$R_{eq1} = \frac{V_{red1}}{\sqrt{3}I_1}$$
(5.29)

de donde se pueden calcular las resistencias de los devanados primario y secundario como [5]:

$$R_{i} = \frac{R_{eql}}{2}$$
(5.30)

$$R_{2} = \frac{R_{eql}}{2\left(\frac{N_{1}}{N_{2}}\right)^{2}}$$
(5.31)

la resistencia del primario se consideró en estrella; la resistencia para la conexión en delta es:

Ζ

$$R_{i-D} = 3R_i \tag{5.32}$$

La impedancia en ohms del transformador se obtiene de la impedancia en por unidad y de una impedancia base. La impedancia base del transformador se calcula como:

$$b_{1} = \frac{\mathbf{v}_{1}^{2}}{\mathbf{s}}$$
(5.33)
$$\boxed{\text{TESIS CON}}$$
FALLA DE ORIGEN

y la impedancia en ohms del transformador, referida al lado primario, es:

$$Z_1 = Z_{nv} Z_{b1} \tag{5.34}$$

La impedancia, la resistencia equivalente y la reactancia de dispersión equivalente, referidas al lado primario, se relacionan mediante la expresión:

$$Z_1 = \sqrt{R_{eq1}^2 + X_{eq1}^2}$$
(5.35)

de donde la reactancia equivalente se puede calcular como:

$$X_{eq1} = \sqrt{Z_1^2 - R_{eq1}^2}$$
(5.36)

De la reactancia equivalente se obtienen las reactancias de dispersión en los devanados primario y secundario como [5]:

$$X_{d1} = \frac{X_{eq1}}{2}$$
(5.37)

$$X_{d2} = \frac{X_{eq1}}{2\left(\frac{N_{1}}{N_{2}}\right)^{2}}$$
(5.38)

pero la reactancia del lado primario se consideró en conexión estrella, de forma que la reactancia para la conexión en delta es:

$$X_{dI-D} = 3X_{dI}$$
(5.39)

Finalmente las inductancias de dispersión en los devanados se calculan como:

$$L_{l} = \frac{X_{dl-D}}{120\pi}$$
(5.40)

$$L_2 = \frac{X_{d2}}{120\pi}$$
(5.41)

Los datos utilizados para realizar el cálculo de la resistencia de pérdidas eléctricas en los conductores y la reactancia de magnetización, así como el procedimiento de cálculo se presentan a continuación:

S = 750 kVA $V_1 = 23 \text{ kV}$ $N_1 = 23000$ $N_2 = 277$

TESIS	CON
FALLA DE	ORIGEN

 $P_{elec} = 8760 W$ $Z_{pu} = 0.06669$

Corriente nominal del transformador en el lado primario:

$$I_1 = \frac{750 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 23 \times 10^3} = 18.8266 \text{ A}$$

Voltaje reducido en el primario:

$$V_{red1} = \frac{8763}{\sqrt{3} \times 18.8266} = 268.7325 \text{ V}$$

Resistencia equivalente de pérdidas eléctricas, referida al lado primario:

$$R_{eq1} = \frac{268.7325}{\sqrt{3} \times 18.8266} = 8.2411 \ \Omega$$

Resistencia de pérdidas eléctricas del lado primario:

$$R_1 = \frac{8.2411}{2} = 4.1205 \,\Omega$$

Resistencia de pérdidas del lado secundario:

$$R_2 = \frac{8.2411}{2(23000/277)^2} = 0.59766 \text{ m}\Omega$$

Resistencia de pérdidas del lado primario considerando conexión en delta:

$$R_{I=D} = 3 \times 4.1205 = 12.3615 \Omega$$

Impedancia base del transformador, referida al lado primario:

$$Z_{b1} = \frac{23000^2}{750 \times 10^3} = 705.3333 \ \Omega$$

Impedancia en ohms del transformador, referida al lado primario:

 $Z_1 = 0.06669 \times 705.3333 = 47.0386 \Omega$

Reactancia de dispersión equivalente, referida al lado primario:

$$X_{eq1} = \sqrt{47.0386^2 - 8.2411^2} = 46.311 \Omega$$

Reactancia de dispersión del lado primario:



$$X_{d1} = \frac{46.311}{2} = 23.1555 \ \Omega$$

Reactancia de dispersión del lado secundario:

$$X_{d2} = \frac{46.311}{2(23000/277)^2} = 3.3585 \text{ m}\Omega$$

Reactancia de dispersión del lado primario considerando conexión delta:

$$X_{dI-D} = 3 \times 23.1555 = 69.4665 \Omega$$

Inductancia de dispersión del lado primario:

$$L_1 = \frac{69.4665}{120\pi} = 184.2656 \text{ mH}$$

Inductancia de dispersión del lado secundario:

$$L_2 = \frac{3.3585 \times 10^{-3}}{120\pi} = 8.9086 \ \mu H$$

c) Curva de saturación en vacío del transformador

Los datos de la curva de saturación en vacío del transformador se muestran a continuación.

Corriente [A]	Voltaje [kV]	Corriente [A]	Voltaje [kV]
0.010	21.00	9.000	32.20
0.070	22.00	10.000	32.40
0.1551	23.00	11.000	32.60
1.000	27.00	12.000	32.80
2.000	29.00	13.000	33.00
3.000	30.40	14.000	33.20
4.000	31.20	15.000	33.40
5.000	31.40	16.000	33.60
6.000	31.60	17.000	33.80
7.000	31.80	18.000	34.00
8.000	32.00	18.800	34.15

Tabla 5.3 Datos de la curva de saturación en vacío

La curva de saturación correspondiente a los datos mostrados en la tabla 5.3 se muestra en la figura 5.3, donde se aprecia la característica no lineal del material ferromagnético del núcleo del transformador.

TESIS CON	
FALLA DE ORIGEN	







El simulador ATP requiere del uso de una rutina de nombre SATURA que convierte los valores de la curva de saturación de voltaje contra corriente en valores de instantáneos de flujo magnético contra corriente. La rutina SATURA requiere de introducir valores en por unidad del voltaje y de la corriente. Las bases de potencia y de voltaje que requiere la rutina son:

 $P_{hase} = 0.750 \text{ MVA}$

 $V_{base} = 23 \text{ kV}$

00000000000

La corriente base se calcula como:

$$I_{base} = \frac{P_{base}}{V_{base}}$$

de forma que el valor de la corriente base es:

$$_{\text{base}} = \frac{750 \times 10^3}{23 \times 10^3} = 32.6086 \text{ A}$$

El código utilizado para la rutina SATURA se muestra a continuación, en donde se pueden apreciar los valores en por unidad utilizados para la corriente y el voltaje.



I

```
Simulación de un caso de distorsión armónica
c
               I COMPONENTES ARMONICAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS I
č
BEGIN NEW DATA CASE
C
SATURATION
с
    Pbase (MVA): 0.750
000000000000
    Vbase [KV]:
                 23.0
    Ibase = Pbase/ Vbase
   Ibase = 32.6086 A
   Irms(pu) = Irms(amps)/ Ibase(amps)
Vrms(pu) = Vrms(kV )/ Vbase(kV )
                  2
                            3
                                                         6
  С
  FREC VRASE
                PBASE
                       IPUNCH K-ESIMO
č
  -----
               -----
                 0.750
   60.0
           23.0
                              0
c
  Irms [p.u.]
                 Vrms [p.u.]
 **************
C
                    0.91304348
     0.00030667
                    0.95652174
     0.00214667
     0.00475640
                    1.00000000
     0.03066667
                    1.17391304
     0.06133333
                    1.26086957
     0.09200000
                    1.32173913
     0.12266667
                    1.35652174
                    1.36521739
     0.15333333
     0.18400000
                    1.37391304
                    1.38260870
     0.21466667
     0.24533333
                    1.39130435
                    1.40000000
     0.27600000
     0.30666667
                    1.40869565
     0.33733333
                    1.41739130
     0.36800000
                    1.42608696
     0.39866667
                    1.43478261
     0.42933333
                    1.44347826
     0.46000000
                    1.45217391
     0.49066667
                    1.46086957
     0.52133333
                    1.46956522
     0.55200000
                    1.47826087
     0.57653333
                    1.48478261
           9999
```

BEGIN NEW DATA CASE

5.4 Simulaciones del sistema eléctrico

Se plantearon casos distintos para evaluar las figuras de mérito, verificar la corrección del factor de potencia, etc. cada uno contiene una explicación acerca de su objetivo y los resultados obtenidos.

5.4.1 Primer caso. Evaluación de las figuras de mérito en el punto de acoplamiento común y cálculo de los requerimientos de potencia reactiva en el tablero 1

La primera tarjeta de datos contiene el paso de tiempo, el tiempo máximo y dos columnas en donde se indica si los inductores y capacitores utilizados en el código son especificados mediante valores de inductancia y capacitancia o reactancias inductiva y capacitiva.

El tiempo máximo se seleccionó de 50 ms para tener un intervalo de tiempo lo suficientemente amplio para que cualquier respuesta transitoria se amortigüe y contar con muestras en el dominio del tiempo, del voltaje y la corriente, para analizar en estado estable.



Antes de esta simulación se utilizó un paso de tiempo de 50 ns el cual generó una inestabilidad numérica en el momento en que el ATP simulaba los rectificadores. El paso de tiempo se seleccionó como de una milésima parte del tiempo final por las siguientes razones: el ATP no presentó la inestabilidad numérica y los resultados tienen una precisión suficiente para obtener los análisis de espectro y especificar los filtros.

Aunque en el capítulo cuatro se vió cómo calcular las reactancias del banco de capacitores y del inductor que forman parte del filtro, se prefirió especificar estos elementos mediante sus valores de capacitancia y de inductancia, no sólo porque en el capítulo cuatro también se vió cómo llevarlo a cabo, sino porque la inductancia es un valor que se suele especificar en las hojas técnicas de los reactores.

La segunda tarjeta de datos se utiliza para especificar los pasos de impresión de los resultados numéricos en la salida generada por el ATP y los pasos de impresión de los puntos de solución para el programa de graficación. Con esta tarjeta también se especificó el uso de una tercera tarjeta de datos (cuyo uso se explica más adelante) y la forma en que se graban los puntos para el archivo de graficación.

Se seleccionó un paso de impresión de datos que imprime en el archivo de salia, uno de cada mil resultados numéricos para no hacerlo muy extenso. La salida de puntos de graficación se seleccionó para cada punto calculado con el propósito de obtener gráficas precisas de las tensiones y las corrientes. Se especificó el uso de una tercera tarjeta de datos y se seleccionó que los puntos de solución para la graficación se guarden en un archivo, independientemente de que esté presente alguna tarjeta de procesamiento que permita cambiar la forma en que se deben tratar estos datos.

La tercera tarjeta de datos se utiliza para cambiar el paso de salida de los datos numéricos hacia el archivo de salida. Esta tarjeta permite especificar hasta cinco cambios en el paso de salida en los datos numéricos del archivo de salida. Los pasos de impresión se modifican indicando a partir de qué resultado se desea hacer el cambio y cuál es el paso requerido.

Los cambios en el paso de impresión de los datos numéricos hacia el archivo de salida tuvieron como objetivo generar una lista numérica de las variables de salida especificadas en el ATP lo suficientemente exacta para realizar cálculos u obtener gráficas con un programa de hoja de cálculo.

En el paso 250, que corresponde a 12.5 ms, ya no se tienen efectos transitorios, especialmente porque las fuentes de tensión fueron especificadas con un tiempo de inicio negativo para evitar los efectos transitorios de la corriente de irrupción del transformador. El paso 585 corresponde a 29.25 ms. El intervalo que va desde 12.5 ms hasta 29.25 ms corresponde a un ciclo completo de 16.6 ms; en total se tienen 334 de datos numéricos cuya impresión se hace especificando un paso de tres.

La evaluación de las figuras de mérito, para los niveles de distorsión armónica en el punto de acoplamiento común, se llevó a cabo con el código que se muestra a continuación. Este código también permitió evaluar los requerimientos de potencia reactiva.

FACULTAD DE INGENIERIA MAESTRIA EN INGENIERIA ELECTRICA SANDOVAL RODRIGUEZ GONZALO 128

```
0000
              DIRECTOR DE TESIS DR. RAFAEL GUERRERO CEPEDA
              COMPONENTES ARMONICAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS
č
BEGIN NEW DATA CASE
с
ċ
  PRIMERA TARJETA DE DATOS
С
ē
                        3
                                        5
  c
ē
  T-STEP T-MAX XL=OPT XC=OPT
(SEG ) [SEG] MH=0 UF=0
c
            -----
ē
  ******
0.000050 0.050
                0.0
                        0.0
c
č
  SEGUNDA TARJETA DE DATOS
                        3
ċ
               2
                                        5
ē
  PUNCH
c
  PRINT PLOT NETWORK PR.SS
0-EACH 0-EACH 0- NO 0- NO
K-K-TH K-K-TH 1-YES 1-YES
                           PR.MAX I PUN
                                              DUMP
                                                      MULT. DIAGNOS
                            0= NO
                                  0= NO
                                              IN TO
                                                      ENERG.
c
                                        O= NO
                                                            PRINT
                            1=YES 1=YES
                                                     STUDIES
ċ
                                               DISK
                                                             0=NO
                                        1=YES
  c
                                          -----
                                                             ----
   1000
            1
                                      - 1
c
ĉ.
 TERCERA TARJETA DE DATOS
c
       1
                        ٦
 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
С
c
 PRINT PRINT PRINT PRINT
K-TH STEP K-TH STEP
c
c
                585
    250
            3
                         50
с
ċ
 DEFINICION DE CONEXIONES DEL CIRCUITO ELECTRICO
с
č
с
  IMPEDANCIA DE THEVENIN DEL ALIMENTADOR ELECTRICO
С
          c
               2
                        э
                                4
                                        5
                                                6
                                                        7
č
 34567890123456789012345678901234567890123
                                   456789012345678901234567890123
                           IND CAP
č
  NOMBR. NODO REFERENCIAS RES
                    (OHM)
ē
  NOD-I NOD-F BRANCH
с
                          [OHM] [OHM]
        ----///////
                          •----
C
 V23A VHA
V23B VHB
                          5,6128
                                                                1
           V23A VHA
  V23C VHC
           V23A VHA
c
C
 _____
ċ
 CAPACITORES EN LOS VERTICES DE LA DELTA
c
 ċ
       1
               2
                        2
                                4
                                        5
                                                6
                                                        7
                                                                a
 с
 NOMBR. NODO REFERENCIAS RES
                     RES IND
(OHM) [MH]
                                CAP
C
 NOD-I NOD-F BRANCH
c
                                IUFI
c
                          [OHM] [OHM]
С
                /////++
 VHA
                                0.003
  VHB
           VHA
  VHC
           VHA
ċ
 LOS VERTICES DE LA DELTA DEL TRANSFORMADOR SE CONECTAN EN VHA. VIB Y VHC
 LAS CAPACITANCIAS DE 0.003 UF SON REQUISITO DEL ATP PARA LA CONEXION EN DELTA
c
C
C
C
 RESISTORES DE 1 TERA OHM (1.0E12) PARA GRAFICAR LOS VOLTAJES
c
 С
               2
                        3
                                A
                                        5
                                                6
                                                        7
                                                                8
с
 IND
                              CAP
 NOMBR, NODO REFERENCIAS RES
NOD-1 NOD-F BRANCH (OHM)
с
ċ
                     (OHM)
                           [MH]
                                [UF]
с
                          [OHM] [OHM]
 +++++++-----
C
С
 Voltajes en el bus de 23 kV
                     1.0E12
                                                                2
 V23A V23B
 Voltajes de linea en el lado de alta del transformador
с
 VHA
      VHB
                     1.0E12
C Voltajes de linea en el lado de baja del transformador
```

JEN

```
WYA
        vvn
                           1.0E12
                                                                                   2
C Voltajes al neutro en el lado de baja del transformador
VXA 1.0E12
                                                                                   2
с
c
  ____
  TABLERO BUSP
с
  -----------
ĉ
                                                                         7
         1
                    2
                               ٦
                                                              6
                                                                                   •
  3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
000
  NOMBR. NODO REFERENCIAS RES
                                   IND
                                         CAP
  NOD-I NOD-F
                BRANCH
                           [OIM]
                                   [MH1
                                         (UF)
ċ
                                  [OHM] [OHM]
č
  ++++++
  VXA
        BUSPA
                             0.01
                                                                                   'n
  VXB
        BUSPB VXA
                     BUSPA
        BUSPC VXA
                     BUSPA
  VXC
  BUSPA BUSPB
                           1.0E12
С
č
č
  TABLERO BUS1
č
č
č
                                                                         7
                                                    5
                                                              6
č
  345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
č
  NOMBR, NODO REFERENCIAS RES
NOD-I NOD-F BRANCH (OHM
                                   IND
                                         CAP
č
                                   (MH)
                                         IUFI
                           [ OHM ]
ē
                                  соны гоны
č
                     111111
                             .........
  BUSPA BUSIA
                             0.01
                                                                                   1
  BUSPB BUSIB BUSPA BUSIA
BUSPC BUSIC BUSPA BUSIA
  BUSIA BUSIB
                           1.0E12
                                                                                   2
C
С
ĉ
 PRIMER RECTIFICADOR - RI
с
      -----
C
C
  RESISTENCIAS EN SERIE PARA GRAFICAR LA CORRIENTE DE LINEA DEL RECTIFICADOR
С
с
  345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
С
¢
  NOMBR. NODO REFERENCIAS RES
                                  IND
                                         CAP
č
  NOD-I NOD-F BRANCH
                                         IUFI
                           [OHM]
                                   [MH]
c
                                  IOHMI IOHMI
č
  ++++++
                                  ----
  BUSIA VARI
                             0.01
  BUSIB VBRI
              BUSIA VARI
  BUSIC VCRI BUSIA VARI
e
ē
 SNUBBERS DEL RECTIFICADOR
c
è
                    2
         1
                              3
č
  3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
                                 IND
 NOMBR. NODO REFERENCIAS RES
c
                                        CAP
 NOD-I NOD-F BRANCH
С
                           [OHM]
                                  [MH]
                                         IUFI
c
                                 (OHM) [OHM]
c ++++++----+++++++//////
                                  ----
                                         ....
C diodos D1, D2 Y D3
  POSPR1VAR1
                             33.0
                                           1.0
  POSPRIVBR1
              POSPRIVAR1
  POSPRIVCRI POSPRIVARI
 diodos D4, D5 Y D6
 VAR1 NEGRI POSPRIVAR1
VBR1 NEGRI POSPRIVAR1
  VCR1 NEGRI POSPRIVARI
c
с
 LADO DE DIRECTA DEL RECTIFICADOR
č
с
                    2
č
 NOMBR. NODO REFERENCIAS RES
С
                                 IND
                                        CAP
С
 NOD-I NOD-F
                BRANCH
                           (OHM)
                                  [MH1
                                         (UF)
с
                                 [OHM]
                                        [ OHM ]
ċ
                                        . . . .
 ++++++----++++++//////
                             *******
  POSPR1POSR1
                             0.01
                                    0.5
                                                                                   1
  POSR1 NEGR1
                                         400.0
                                                                                   з
 POSR1 NEGR1
                             10.5
                                                                                   ī
с
```

Simulación de un caso de distorsión armónica

<u>PEN</u>

```
c
   SEGUNDO RECTIFICADOR - R2
 ē
 С
 C
   RESISTENCIAS EN SERIE PARA GRAFICAR LA CORRIENTE DE LINEA DEL RECTIFICADOR
 С
 С
 000
                               7
   3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
   NOMBR, NODO REFERENCIAS RES
                                  IND
                                        CAP
 ē
   NOD-I NOD-F
                BRANCH
                           (OHM)
                                   [MH]
                                         IDEI
                                  (OHM) [OHM]
 с
   c
   BUSIA VAR2 BUSIA VAR1
BUSIB VBR2 BUSIA VAR2
                                                                                  1
   BUSIC VCR2 BUSIA VAR2
 с
č
  SNUBBERS DEL RECTIFICADOR
¢
č
ĉ
  NOMBR. NODO REFERENCIAS RES
                                  IND
                                        CAP
с
                           (OHM)
č
  NOD-1 NOD-F
               BRANCH
                                  [MH]
                                         UF
с
                                  (OHM) [OHM]
          ____*
C
   *****
  diodos D1, D2 Y D3
POSPR2VAR2 POSPRIVAR1
c
   POSPR2VBR2
             POSPR2VAR2
   POSPR2VCR2 POSPR2VAR2
  diodos D4, D5 Y D6
c
  VAR2 NEGR2 POSPR2VAR2
VBR2 NEGR2 POSPR2VAR2
VCR2 NEGR2 POSPR2VAR2
  LADO DE DIRECTA DEL RECTIFICADOR
С
c
  3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
ċ
  NOMBR. NODO REFERENCIAS RES
                                        CAP
C
                                  IND
                                        TUFI
c
  NOD-I NOD-F
                BRANCH
                           (OHM)
                                  TMH1
Ċ
                                 [OHM] [OHM]
ē
  ******
                                        ...
  POSPRZPOSRZ POSPR1POSR1
  POSR2 NEGR2
                                        400.0
  POSR2 NEGR2
                             10.5
c
č
  TERCER RECTIFICADOR - R3
c
с
c
  RESISTENCIAS EN SERIE PARA GRAFICAR LA CORRIENTE DE LINEA DEL RECTIFICADOR
C
C
  3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
  NOMBR. NODO REFERENCIAS RES
                                 IND
                                       CAP
c
  NOD-L NOD-F
               BRANCH
                           (OHM)
с
                                  LWH)
                                        (UE)
                                 TORMI TORMI
C
  ******=====*******///////
C
  BUSIA VAR3 BUSIA VAR1
  BUSIN VBR3 BUSIA VAR3
  BUSIC VCR3 BUSIA VAR3
с
C SNUBBERS DEL RECTIFICADOR
с
ē
                                                                       7
                              3
ē
  3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
  NOMBR. NODO REFERENCIAS RES
                                        CAP
C
                                  IND
 NOD-I NOD-F BRANCH
                          (OHM)
                                  [MH]
                                        IUFI
С
C
                                 [OHM] [OHM]
  ...........
С
                  ..//////
C diodos D1, D2 Y D3
POSPR3VAR3 POSPRIVARI
  POSPR3VBR3 POSPR3VAR3
  POSPRIVCR3 POSPRIVAR3
C diodos D4, D5 Y D6
  VAR3 NEGR3 POSPR3VAR3
  VBR3 NEGR3 FOSPR3VAR3
  VCR3 NEGR3 POSPR3VAR3
с
C LADO DE DIRECTA DEL RECTIFICADOR
```

с Ġ. 7 c 2 ٦ 5 1 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890 ċ NOMBR. NODO REFERENCIAS RES NOD-I NOD-F BRANCH [OHM] c IND CAP č [OHM] [MH] (DF) TOHMI TOHMI ++++++ ē ... POSPRJPOSRJ POSPRIPOSRI POSR3 NEGR3 400.0 POSR3 NEGR3 10.5 с č -----с CUARTO RECTIFICADOR - R4 č c c RESISTENCIAS EN SERIE PARA GRAFICAR LA CORRIENTE DE LINEA DEL RECTIFICADOR c ĉ ē 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890 c NOMBR, NODO REFERENCIAS RES IND CAP č NOD-I NOD-F BRANCH (OHM) [MH] (UF) (OHM) (OHM) ē ++++++-----******//////++ BUSIA VAR4 BUSIA VAR1 BUSIB VBR4 BUSIA VAR4 BUSIC VCR4 BUSIA VAR4 c ĉ SNUBBERS DEL RECTIFICADOR č ē 7 3 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890 č NOMBR. NODO REFERENCIAS RES IND CAP c NOD-1 NOD-F BRANCH [OHM] (DF1 (MH1 [OHM] [OHM] ċ ++++++ diodos D1, D2 Y D3 r POSPR4VAR4 POSPR1VAR1 POSPR4VBR4 POSPR4VAR4 POSPR4VCR4 POSPR4VAR4 C diodos D4, D5 Y D6 VAR4 NEGR4 POSPR4VAR4 VBR4 NEGR4 POSPR4VAR4 VCR4 NEGR4 POSPR4VAR4 с LADO DE DIRECTA DEL RECTIFICADOR с č ¢ 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890 NOMBR. NODO REFERENCIAS RES NOD-I NOD-F BRANCH (OHM) č IND СЛР c (OHM) (MH) [UF] c TOHMI TOHMI ******----******//////** C POSPR4POSR4 POSPR1POSR1 POSR4 NEGR4 400.0 10.0 POSB4 NEGR4 c ċ ¢ CARGAS R-L AGRUPADAS EN EL TABLERO BUSI ĉ C 7 з ċ 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890 NOMBR. NODO REFERENCIAS RES NOD-I NOD-F BRANCH [OHM] IND CAP [OHM] [MH] (UF) c (OHM) (OHM) c ******======*******//////* c BUSIA 0.20132.1995 BUSIB BUS1A BUS1C BUS1A C с C TABLERO BUS2 c ---------С C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890 c c OFS IND NOMBR, NODO REFERENCIAS RES CAP IUFI C^{*} NOD-I NOD-F BRANCH c [OHM] [OHM] 132

```
c
  ******
  BUSDA BUSCA
                          0.01
                                                                        1
  BUSPB BUS2B BUSPA BUS2A
BUSPC BUS2C BUSPA BUS2A
                        1 0612
  BUS2A BUS2B
                                                                        2
с
с
ċ
  CARGAS R AGRUPADAS EN EL TABLERO BUSZ
C
  ċ
С
                           2
  ē
ē
  NOMBR. NODO REFERENCIAS RES
                             IND CAP
ē
  NOD-I NOD-F BRANCH
                      (OHM)
                              [MH]
                                    (UF)
                             [OHM] [OHM]
ĉ
  ******
  BUS2A
                        1.5360
                                                                        1
  BUS2H
             BUS2A
  BUS2C
             BUSZA
с
ē
č
  TABLERO BUS3 - LA CARGA SERA AGREGADA POSTERIORMENTE RECTIFICADOR RS
ē
с
č
č
  č
  NOMBR. NODO REFERENCIAS RES
                             IND
                                  CAP
  NOD-I NOD-F BRANCH
                       (OHM)
с
                              TMRT
                                   IUFI
c
                             (OHM) (OHM)
č
  ē
  BUSPA BUS3A
                         0.01
                                                                        1
 BUSPB BUS3B BUSPA BUS3A
BUSPC BUS3C BUSPA BUS3A
ċ
c
c
  BUS3A BUS3B
                        1.0E12
                                                                        2
c
  LA CARGA SERA AGREGADA POSTERIORMENTE
c
C
C
c
 TRANSFORMACION MEDIANTE UNIDAD TRIFASICA CON NUCLEO TIPO COLUMNAS
c
c
с
  DEFINICION DE UNIDAD TRIFASICA Y RELUCTANCIA DEL AIRE
c
С
  3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
      SOLICITUD DEL
c
                       NOMBRE
C
       DISPOSITIVO
                      DISP. RELUCT
С
      .....
  TRANSFORMER THREE PHASE TRANS 1.00E6
С
ĉ
 DEFINICION DE LA FASE "A" DEL TRANSFORMADOR
c
C
                          ٦
                                            5
 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
č
C
 SOLICITUD
            BUSB
                        TEXC FLUJO BUSTOP RMAG
                                                                   TOUTMG
c
 DISPOSITIVO REFER
                       REAC.LINEAL
                      **/////*****
c
  *************
                                       TRANSFORMER
                       0.014178.777TR-A 1.09E6
c
ċ
 CURVA DE SATURACION EN VACIO DEL TRANSFORMADOR
с
                                                               7
с
                                   4
                                            5
                                                      6
                                                                        я
с
 3456789012345678901.34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
 CORRIENTE EXC. FLUJO MAGNETICO
c
  ************
   0.0141422893
                 78,7776778138
   0.2133677665
                 82.5289957228
   0.4060157910
                 86.2803136317
   2.2000525660
                101.2855852676
                108.7882219483
   4.6442545218
   6.8144834518
                114.0400666757
   9.7609869344
                117.0411211755
  15.8993579643
                117.7913845847
  17.9129285452
                118.5416479939
  20.6359176475
                119.2919122659
  22.9423768902
                120.0421756752
  25.2204914940
                120.7924390844
                121.5427024936
  27.4020919377
  29.5673723667
                122.2929659029
```

133

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

H.

```
31.6212375020
              123.0432301749
              123.7934935841
  33.6575642499
  35.6574818295
              124.5437569934
   37.6280128557
              125.2940204026
              126.0442846746
  39 5730639857
              126.7945480839
  41.5013821701
  43 4002248025
              127 5448114931
              128,1075092657
  45.2606966467
         9999
С
C DEFINICION DE LOS PARAMETROS DE LOS DEVANADOS DE ALTA Y DE BAJA
ē
ē
                                                      7
                       ٦
                                       5
                                               6
 ċ
 1 Y 2: NUMERO DEL DEVANADO
С
                    Z DISPERSION VOLTS
ē
    NODOS
с
 BUS 1 BUS 2
                       ħ.
                          L
                             N
                     //////++++++-------
ē
 ++++++-------
 VHA VHB
                    12.361184.2623.000
1
2
 VYA
                     0.5E-30.00890.2770
c
 DEFINICION DE LA FASE "B" DEL TRANSFORMADOR
ē
c
C
                       2
                               4
 с
С
 SOLICITUD
           BUS3
                     IEXC FLUJO BUSTOP RMAG
                                                          TOUTMG
с
 DISPOSITIVO REFER.
                    REAC.LINEAL
···/////++++++
                                 TRANSFORMER TR-A
                              TR-B
c
C DEFINICION DE LOS PARAMETROS DE LOS DEVANADOS DE ALTA Y DE BAJA
č
¢
č
 1 Y 2: NUMERO DEL DEVANADO
ċ
č
   NODOS
                    Z DISPERSION VOLTS
C BUS 1 BUS 2
                       R
                          L
                                N
č
 ++++++----
                 · · · · //////++
1 VHB
     VHC
2 VXB
C DEFINICION DE LA FASE "C" DEL TRANSFORMADOR
c
С
                       з
                                                       7
                               4
                                       5
ē
 BUS3
                     IEXC FLUJO BUSTOP RMAG
с
 SOLICITUD
                                                          LOUTMG
ĉ
 DISPOSITIVO REFER.
                    REAC, LINEAL
с
                  ···//////+++++-
                                   **************
 TRANSFORMER TR-A
                              TR-C
с
č
 DEFINICION DE LOS PARAMETROS DE LOS DEVANADOS DE ALTA Y DE BAJA
C
č
               2
                               ...
                                       5
                                               6
 C
с
 1 Y 2: NUMERO DEL DEVANADO
                    2 DISPERSION VOLTS
c
   NODOS
C BUS 1 BUS 2
                       R
                          L
                                N
                 .....
C ++++++----++++++
1 VHC
     VHA
2 VXC
С
BLANK CARD ENDING BRANCHES
с
C -----
C DIODOS DEL PRIMER RECTIFICADOR - R1
с
с
c
С
 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
C NOMBR. NODO
                                                              PO
                                    SIN
                                               SAME
C NOD-I NOD-F
             Vin
                     Ihold
                            TDEION
                                   DEFINIR
                                          CLOSED
                                                  GRID
                                                              DO
C ++++++-----
                     11111
                                           *****
                                                              +-
11VAR1 POSPR1
11VBR1 POSPR1
11VCR1 POSPR1
11NEGR1 VAR1
                                                              13
                                                              13
                                                              13
                                                              13
11NEGR1 VBR1
                                                              13
IINEGRI VCRI
                                                              13
С
                                                      TESIS CON
                                        134
                                                              ORIGEN
```

ē DIODOS DEL SEGUNDO RECTIFICADOR - R2 č č č ē č NOMBR. NODO SIN SAME PO Ihold NOD-I NOD-F Vin LDEION DEFINIR CLOSED GRID DO C ++++++-----+ C 11111111 ***** 11VAR2 13 POSPR2 110892 POSPR2 13 11VCB2 POSP82 13 11NEGR2 VAR2 11NEGR2 VBR2 11NEGR2 VCR2 13 13 13 ċ С DIODOS DEL TERCER RECTIFICADOR - R3 c с С ē 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890 С NOMBR. NODO SIN SAME PO Vig NOD-1 NOD-F Ihold tDEION DEFINIR CLOSED GRID c DO **************** ċ ••////////// ++++++++++ ^+-11VARJ POSPR3 iз 11VBR3 POSPR3 13 11VCR3 POSPB3 13 11NEGR3 VAR3 13 11NEGR3 VBR3 13 11NEGR3 VCR3 1 7 С C DIODOS DEL CUARTO RECTIFICADOR - R4 С č с ٦ Ċ 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890 C NOMBR. NODO SIN SAME PO Vig Ihold tDEION C NOD-I NOD-F DEFINIR CLOSED GRID DO C ++++++-----1111111111 ******** ^+-11VAR4 POSPR4 13 11VBR4 POSPR4 13 POSPR4 11VCR4 13 11NEGR4 VAR4 11NEGR4 VBR4 13 13 11NEGR4 VCR4 13 BLANK CARD ENDING SWITCHES C С ē FUENTE TRIFASICA DE VOLTAJES C c COLUMNAS 1 Y 2: TIPO DE FUENTE, 11-13 RAMPAS, 14 COSENO COLUMNAS 9 Y 10: 0-FUENTE DE VOLTAJE, -1-FUENTE DE CORRIENTE с c 2 з A 5 6 7 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890 c с NOMBRE AMPLITUD FRECUENCIA ANGULO DE AMPL-A1 TIEMPO TI T.INICIO T.FINAL c NODO FUENTE EN HZ FASE GRAD EN SEG EN SEG EN SEG ----c 14V23A 0 18779.421 60.0 0.0 -1.0 0 18779.421 60.0 -120.0 -1.0 14V23B 14V23C 60.0 120.0 -1.0 C EL TIEMPO DE INICIO SE DEFINIO DESDE -1.0 S PARA EVITAR EL TRANSITORIO с GENERADO POR LA CORRIENTE DE IRRUPCION (INRUSH) DEL TRANSFORMADOR c BLANK CARD ENDING SISTEM SOURCES c с с TARJETA DE CONDICIONES INICIALES c с COLUMNA 2: 2 - TARJETA DE VOLTAJES DE NODO c 3 - TARJETA DE CORRIENTE BRANCH LINEAL 4 - TARJETA DE CORRIENTE BRANCH NO LINEAL Y VARIABLE EN EL TIEMPO č č TESIS CON FALLA DE ORIGEN 135

```
с
 CONDICIONES INICIALES DEL PRIMER RECTIFICADOR - RI
č
ē
                        ٦
                                                        7
                                        5
                                                6
č
 č
 NOMBRE
        Re(E(0))
                     Im(E(O))
                               FRECUENCIA (HZ)
č
  NODO
         0101
ē
 *****
         -----
                             220581
              324.1
2NEGR1
              -324.1
с
CCCC
               2
                       ٦
                                        5
                                                6
                                                        7
                                                                я
 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
                            e(0)
  1ER.
       200.
               i(0)
  NODO
       NODO
               k, m
                            CAD
С
                            111111111
 *****
3POSR1 NEGR1
                                648.3
C
č
 CONDICIONES INICIALES DEL SEGUNDO RECTIFICADOR - R2
с
ē
               2
                                                                a
 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
c
 NOMBRE Re(E(0))
                     Im(E(0))
                               FRECUENCIA [HZ]
c
 NODO
         e(0)
ē
 +++++
                           2POSR2
              324.1
2NEGR2
              -324.1
с
č
               2
                                                        7
       1
č
 č
  1ER.
       200.
               1(0)
                            e(0)
č
 NODO
       NODO
               k, m
                            CAP
ē
                            +++++
3POSR2 NEGR2
                                648.3
C
č
 CONDICIONES INICIALES DEL TERCER RECTIFICADOR - R3
                                                        7
CCCC
 NOMBRE Re(E(0))
                     Im(E(0))
                               FRECUENCIA [H2]
С
 NODO
         e (0)
С
 *****
                            2POSR3
              324.1
2NEGR3
              -324.1
C
                                                        -
с
                                                6
                                                                •
¢
 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234
                                            56789012345678901234567890
č
  IER.
       2DO.
               i(0)
                            e(0)
ċ
  NODO
       NODO
               k, m
                            CAP
c
                            ,,,,,,,,,,,,
3POSR3 NEGR3
                                648.3
с
ē
 CONDICIONES INICIALES DEL CUARTO RECTIFICADOR - R4
ċ
č
                                        5
č
 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
č
 NOMBRE Be(E(0))
                     Im(E(0))
                               FRECUENCIA (HZ)
ē
  NODO
         e(0)
c
 .....
                              ** - - * -
              324.1
220584
2NEGR4
              -324.1
С
               2
                       3
                                                        7
                                                                я
C
C
 i(0)
                            e(0)
C
  1ER.
       200.
                            CAP
с
  NODO NODO
               k,m
č
 *****
                            3POSR4 NEGR4
                                648.3
C
с
 SALIDA DE VOLTAJES DE NODO O BUSES
с
с
 С
С
                        ٦
 с
С
 BUS-1 BUS-2 BUS-3 BUS-4 BUS-5 BUS-6 BUS-7 BUS-8 BUS-9 BUS10 BUS11 BUS12 BUS13
                                                        /////+++++
¢
 * * * * *
                111111
 V23A VHA
          VXA
                BUSPA BUSIA BUSZA
c
BLANK CARD ENDING NODE VOLTAGE OUTPUT
                                                                      [1,1],1
                                                           11
                                                               ÷.
```

```
С
ĉ
c
  TABLETA PARA ACTIVAR LA GRAFICACIÓN DE LA SERIE DE FOURIER
с
c
ē
                                                           6
                                                                               R
  345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
ċ
ē
   SPECIAL
                        NUMERO DE
ċ
   REQUEST
                        ARMONICAS
č
     WORD
c
  *****
                                     (pag 14B-18)
  FOURIER ON
                              31
С
C PLOT CARDS
ē
  COLUMNA
            1-2:1
ċ
  COLUMNA
              3: 4 - VOLTAJE DE NODO
č
                 8 - VOLTAJE BRANCH
ċ
                 9 - CORRIENTE BRANCH
č
  COLUMNA
              4: UNIDADES DE HPI, HMIN, HMAX
č
                 1 - GRADOS
č
                 2 - CICLOS
                 3 - SEGUNDOS
ĉ
                 4 - MILISEGUNDOS
ĉ
                 5 - MICROSEGUNDOS
                 6 - FRECUENCIA EN H2
                 7 - LOGARITHO BASE 10 DE LA FRECUENCIA EN 6
č
č
            5-7: ESCALA HORIZONTAL HPI
  COLUMNA
  COLUMNA 8-11: TIEMPO INICIAL HMIN
COLUMNA 12-15; TIEMPO FINAL HMAX
c
С
  COLUMNA 25-30: PRIMERA VARIABLE
COLUMNA 31-36: SEGUNDA VARIABLE
С
ċ
c
ċ
  VOLTAJE VAB PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR
c
č
                   2
  345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
с
č
   HPIHMINHMAX
                         BUS1 BUS2
                        C +-***////++++
 1841.020.036.6
                        VHA VHB
С
ĉ
  CORRIENTE FASE "A" ALIMENTADOR LADO PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR
č
č
                   2
                             3
                                                 5
                                                           6
                                                                     7
                                       ۵
¢
  č
   HPIUMINHMAX
                        BUS1 BUS2
                         c.
    ....////....
 1941.020.036.6
                        V23A VHA
c
C VOLTAJE VAB EN EL TABLERO 1
C
                   2
С
                                                                               R
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
ċ
   HPIHMINHMAX
                         BUS1 BUS2
                        -----
C +-***////++++
 1841.020.036.6
                        BUSIA BUSIB
C CORRIENTE FASE "A" EN EL TABLERO 1
с
č
                                                                     7
                             ٦
c
 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
с
  RPIHMINHMAX
                         BUS1 BUS2
  +-***////++++
                         ē
 1941.020.036.6
                        BUSPA BUSIA
с
C SPECIAL REQUEST WORD
с
 ......
  FOURIER OFF
c
BLANK CARD ENDING CASE
BLANK
BLANK
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE
```

137

TESIS COT FALLA DE ORIGEN

a) Evaluación de los límites de distorsión de corriente en el punto de acoplamiento común

En la figura 5.4 se muestra la forma de onda de la corriente tomada entre los nodos V23A y VIIA, que corresponde a la conexión del primario del transformador con la empresa suministradora.



Figura 5.4

Para evaluar si la distorsión armónica máxima de la corriente se mantiene dentro de los límites recomendados en las normas Std IEEE 519 - 1992 y CFE L000045, se requiere la componente fundamental de la demanda máxima de corriente. En el sistema simulado el valor eficaz de la corriente se mantiene constante a lo largo del tiempo, por este motivo la demanda también se mantiene constante y se puede utilizar la componente fundamental de la corriente de carga para efectos de evaluar la distorsión máxima de la corriente.

El uso de la componente fundamental de la corriente de carga en lugar de la fundamental de la demanda máxima permite utilizar como figura de mérito a la distorsión armónica total de la corriente con respecto al valor eficaz de su componente fundamental (THD₁) en lugar de la distorsión armónica total de la demanda (TDD).

El análisis de espectro de la corriente de la figura 5.4, en donde el primario del transformador se conecta con la acometida, se muestra a continuación

C CORRIENT	E FASE "A	" ALIMENTAD	OR LADO	PRIMARIO	DEL	TRANSFORMAD	OR				
č 1		2 3		4	5	6		7	8		
C 34567890	123456789	01234567890	1234567	890123456	7890	123456789012	34567890	0123456	7890		
C HPIHMI	THMAX	BUS1	BUS2								
C +-***///	/++++										
1941.020.	036.6	V23A	VHA								
Begin the	Fourier s	eries compu	tation	using 33	1	equidistant	points.	The	first t	wo points,	followed
by the las	t two, a	re :									
1.58493738	17443850E	+01 1.572	6769447.	126660E+0		1.6206287384	033200E	101	6198041	912893260E1	01
Coefficien	is of the	resultant	Fourier	series	1011	ow. "Compi	ex ampl:	icude"	is the	square ro	or or the
sum of the	squares	of the									
cosine and	the sine	coefficien	ts . "I	raction		undamental.	applies	s to th	is ampli	cude.	
narmonic		Cosine		anaffici.	ne		complex		fundam	ontol	
number	-1 10767	Dellicienc	0 000	00000005	+00	1 10767009	2875-01		0 0068	45561	
0	-1.10/0/	0092036-01	0.000	10000000		1.10/0/003	2036-01		0.0000	13301	
							p	·			<u> </u>
							1	C (1)	···· / /	100 T T	1
						120	1	1 d.	1 A A A A A A A A A A A A A A A A A A A	10 C 40	1
						128	1				

FALLA

₽-÷

	1 1.334834	81411E+0	1 -9.145575	57450E+00	1,618085135855+01	1.000000000
	2 2.502012	04089E-0	2 -9.368992	43845E-02	9.69732352583E-02	0.005993086
	3 -2.593838	55207E-0	2 -6.669349	82331E-02	7,15599227919E-02	0.004422507
	4 -8.346980	04885E-0	2 -8.931345	30274E-02	1.22246065316E-01	0.007554984
	5 1.879868	08442E+0	0 2.327375	79562E+00	2,99175234752E+00	0.184894619
	6 2.721656	02918E-0	2 1.363053	86111E-01	1.38996041082E-01	0.008590156
	7 8.428271	61710E-0	1 -1.5585650	00841E+00	1.77185849039E+00	0.109503416
	8 5.671642	91733E-0	2 -6.858123	52907E-02	8.89951637572E-02	0.005500030
	9 3.570223	69152E-0	2 -4.273650	82294E-02	5.56871516276E-02	0.003441546
1	0 3.188921	61285E-0	2 -4.121088	46739E-02	5.21081483157E-02	0.003220359
1	1 -1.006393	73798E-0	1 1.168226	59417E-01	1.54194089743E-01	0.009529418
1	2 6.401764	27731E-0	3 -2.337974	15437E-02	2.42403568561E-02	0.001498089
1	3 -3.132799	50528E-0	2 2.647168	80153E-01	2.66564194730E-01	0.016474052
1	4 4.874912	04866E-0	3 2.1575525	53294E-02	2.21194046195E-02	0.001367011
1	5 5.449490	74695E-0	3 1.5109410	00483E-02	1.60621051363E-02	0.000992661
1	6 8.493314	60628E-0	3 2.5027250	02369E-02	2.64291439025E-02	0.001633359
1	7 -1.553980	07155E-0	2 -1.164653	76902E-01	1.17497529434E-01	0.007261517
11	8 2.252019	85088E-0	3 -1.457985	41098E-03	2,68278118142E-03	0.000165800
1 :	9 -3.303465	29304E-0	2 -1.1934980	04608E-01	1.23837248654E-01	0.007653321
21	0 -7.968993	15634E-0	3 -2.0958535	50372E-02	2.24224227690E-02	0.001385738
2	1 -7.608571	78510E-0	3 -1.6503648	82019E-02	1.81730781262E-02	0.001123122
23	2 -2.027122	31610E-0	2 -2.1697972	29004E-02	2.96938464404E-02	0.001835123
23	3 7.024105	65712E-0	2 3.592093	912518-02	7.88930915598E-02	0.004875707
2 -	1 3.678003	25246E-0	3 -9.8958692	23852E-03	1.05572693397E-02	0.000652455
25	6.253045	25500E-0	2 5.028021	13434E-02	8.02381296550E-02	0.004958832
20	6 1.736016	42545E-0	2 2.816243	13133E-03	1.75871126115E-02	0.001086909
2.	7 1.404185	33169E-0	2 -1.448778	71118E-04	1.40426006912E-02	0.000867853
21	3 2.762723	35657E-0	2 -5.2958940	60035E-03	2.81302423401E-02	0.001738490
2 5	9 -5.139780	75606E-0	2 1.7001843	33699E-02	5.41368386592E-02	0.003345735
30	5,240489	36868E-0	3 5.5200460	08206E-03	7.61141495199E-03	0.000470396
Derived a	from table:	1) RMS	value = 1.176	077297E+01	2) THD = 2.16722953E+01	*

Distorsión armónica total de la corriente con respecto al valor eficaz de su componente fundamental:

$THD_1 = 21.67\%$

Valor eficaz de la componente fundamental de la corriente de carga:

$$I_{L} = 16.18 / \sqrt{2} = 11.44 \text{ A}$$

Corriente de cortocircuito en el punto de acoplamiento común:

$$I_{SC} = \frac{V_{LN}}{X_{Th}} = \frac{23000}{2.116} = 6275.54 \text{ A}$$

Relación de la corriente de cortocircuito con el valor eficaz de la componente fundamental de la corriente de carga:

$$\frac{l_{SC}}{l_1} = \frac{6275.54}{11..44} = 548.51 \text{ A}$$

Intervalo de los estándares Std. IEEE 519-1992 y CFE L000045 en el cual se ubica la relación I_{sc}/I_{L} del sistema;

$$100 < \frac{1_{sc}}{1_{L}} < 1000$$

Los valores máximos permitidos para la distorsión de corriente por el estándar 519 y los valores actuales del sistema se muestran en la siguiente tabla.:



Parámetro evaluado	Valor máximo Std IEEE 519-1992 Valor máximo CFE L000045	Valor alcanzado en el PCC
THD	15%	21.67%
$\frac{I_s}{I_1} \times 100$	12%	18.48%
$\frac{I_7}{I_1} \times 100$	12%	10.95%

Tabla 5.4 Valores máximos y valores actuales de la distorsión de corriente en el PCC

La distorsión armónica de la corriente en el punto de acoplamiento común es superior a lo que recomiendan las normas Std. IEEE 519-1992 y CFE L000045, también el porcentaje del valor eficaz de la quinta armónica de corriente con respecto a la componente fundamental es superior al valor permitido. La séptima armónica tiene un porcentaje, con respecto a la componente fundamental, menor al valor máximo recomendado.

La corriente en el alimentador, cuya distorsión armónica es mayor a la recomendada, requiere de filtrado por parte del usuario para disminuir la distorsión a niveles aceptables. Se hizo el cálculo para filtros de quinta y séptima armónica de corriente ya que son las componentes que alcanzaron las mayores magnitudes.

b) Evaluación de los límites de distorsión de voltaje en el punto de acoplamiento común

La evaluación de los límites de distorsión armónica del voltaje para el punto de acoplamiento común se hizo con la tensión entre los puntos VHA y VHB, que es la tensión entre líneas en el punto en donde el primario del transformador se conecta con el suministro eléctrico.



Figura 5.5



En la figura 5.5 se muestra la forma de onda de la tensión entre líneas para el punto de acoplamiento común. La forma de onda casi no tiene distorsión debido a la elevada potencia de cortocircuito del suministro y que no se considera la distorsión que otros usuarios podrían aportarle al suministro eléctrico.

El análisis de espectro, generado por el ATP, para la tensión entre líneas en el punto de acoplamiento común, se muestra a continuación:

C VOLTAJE	VAB PRIM	IARIO	DEL TR	ANSFO	RMADOR						
č i		2		3	٨		5 6	7	•		
C 34567890	12345676	190123	456789	01234	567890123	456789	012345678901:	2345678901	234567890		
C HPIHMI	NHMAX		BUS1	BUS	2						
C +-***///	/++++				••						
1841.020.	036.6		VHA	VHB							
Begin the	Fourier	serie	s comp	utati	on using	331	equidistant	points.	The first	two points,	followed
by the las	t two,	are :					•	-		•	
-7.3638085	93750000	0E+03	-7.8	95421	386718750	0E+03	-4.73748486	32812500E+	03 -5.3105	5322265625008	:+03
Coefficien	ts of t	he res	sultan	t Fou	rier seri	ies fol	low. "Compl	lex amplit	ude" is th	ne square ro	ot of the
sum of the	squares	oft	he								
cosine and	the sin	e coe	tricie	nts.	"Fracts	onor	tundamental"	applies	to this amp	litude.	
Harmonic			Cosine			Sine		Complex	Frac	tion of	
number		coerr	1Clent	~	coerr	1clent	ar	npiitude	Lund	amental	
U I	4,4533	20300	515+01	ų.	10000000000	142104	4.4535253	56516+01	0.00	1366385	
2	-0.3893	20407	775101		19204168:	105407	3.23934838	344/5104	1.00	128224	
÷	-1 5797	26070	035+01		666903073	045+02	1 67799400	0205102	0.00	176647	
3	-9 1207	22231	326100	-1	189542356	375+02	1 10203670	32305102	0.00	1657796	
5	-6.3494	73607	32E+01	- 8	360322290	43E+01	1 0498133	3526E+02	0.00	3220930	
6	-1.1010	53976	302+01	-7.	565495346	005+01	7.64519716	6681E+01	0.00	2345621	
7	3.8509	63929	17E+01	-6.	691675642	75E+01	7.7206506	2617E+01	0.00	2368771	
8	-4.0275	57650	52E+00	-5.	631935987	05E+01	5.64631872	2714E+01	0.00	1732346	
9	-4.4848	76504	13E+00	-4.	970977477	06E+01	4.99116802	2462E+01	0.00	1531339	
10	-4.4534	10951	37E+00	-4.	445286007	36E+01	4.46753806	6679E+01	0.00	1370684	
11	-6.9635	97666	41E+00	-4.	793830440	70E+01	4.84414360	0014E+01	0.00	1486231	
12	-3.9897	79540	57E+00	-3.	819982142	12E+01	3.84076124	4928E+01	0.00	1178383	
13	-1.6878	55892	77E+01	-2.	959684188	02E+01	3.40713780	0285E+01	0.00	L045343	
14	-6.1719	26854	42E+00	-3.	145973658	67E+01	3.20594402	2197E+01	0.00	0983615	
15	-5.7996	90598	68E+00	-2.	957760548	19E+01	3.01408552	2013E+01	0.00	0924751	
16	-6.0700	04903	72E+00	-2.	774370267	73E+01	2.8399964	7496E+01	0.00	871339	
17	2.1070	47112	73E+00	~2.	277253819	69E+01	2,28773178	1280E+01	0.00	0701899	
18	-4.6316	67648	63E+00	-2.	345521426	60E+01	2.39081455	5047E+01	0.000	0733525	
19	-2 21228	22575	63E+00	-2.	891928117	826+01	2.8945546	2776+01	0.00	0888078	
20	-3.3477	12611	495+00		16044007	202+01	2.32590290	9036+01	0.00	670612	
22	-3.0037	368111	825+00	-2.	113050323	065401	2 13510291	19705+01	0.000	1655000	
23	-1 0997	77273	015-01	-1	625819283	765+01	1 06285465	54755401	0.000	6033030	
24	-5.0069	57803	34E+00	-1.	898971457	715+01	1 96387086	1721E+01	0.00	1602535	
25	-6.4918	43336	52E+00	-1.	039858234	85E+01	1.22586516	3316+01	0.00	376107	
26	-4.9576	32717	25E+00	-1.	183465076	57E+01	1.56411312	091E+01	0.00	479885	
27	-5.0194	77307	95E+00	-1.	464252112	28E+01	1.54789721	001E+01	0.00	474910	
28	-4.7682	82029	19E+00	-1.	302547603	85E+01	1.38708161	094E+01	0.00	425570	
29	-2.4763	309712	27E+00	-2.	079150542	26E+01	2,0938455	3589E+01	0.00	0642412	
30	-3.6540	36193	54E+00	-1.	390844127	29E+01	1.43804283	3367E+01	0.00	0441206	
Derived fr	om table	: 1)	RMS V	alue	2.30490	106E+0	4 2) THD •	1.292101	87E+00 %		

Distorsión armónica total del voltaje con respecto al valor eficaz de su componente fundamental:

$THD_{v} = 1.28\%$

La tabla 5.5 muestra el valor máximo permitido de distorsión armónica de voltaje para el punto de acoplamiento común, y el valor actual de distorsión. Aunque se está considerando un usuario único y por lo tanto se considera que no existen otras contribuciones a la distorsión, el valor de la distorsión de voltaje está por debajo del máximo indicado por las normas Std. IEEE 519 - 1992 y CFE L000045.

	CONT	`
FALLA DE	OEIGEN	

Parámetro evaluado	Valor máximo Std IEEE 519 - 1992	Valor alcanzado en el PCC
And the second second	Valor máximo CFE L000045	and the second of the second second
THD _v	5.0%	1.28%

Tabla 5.5 Valores máximos y valores actuales de la distorsión de voltaje en el PCC

c) Cálculo de los requerimientos de potencia reactiva en el tablero 1

La carga en el tablero 2 tiene factor de potencia unitario, de forma que el cálculo de los requerimientos de potencia reactiva se hizo en el tablero 1, el cual tiene los dispositivos no lineales y una carga con factor de potencia de 0.82 inductivo. En la figura 5.6 se muestra la forma de onda del voltaje entre líneas BUS1A - BUS1B, así como la corriente BUSPA - BUS1A para el tablero 1.

Para obtener el factor de potencia del tablero en forma aproximada, se requiere conocer el ángulo de desfasamiento entre el voltaje y la corriente. Si se considera que un ciclo del voltaje y la corriente son 360°, el ángulo de desfasamiento entre ambos se puede calcular como

$$\phi = \frac{t_d}{T} \times 360^{\circ} \tag{5.43}$$

en donde:

 t_d es el tiempo que existe entre el cruce por cero del voltaje y el de la corriente y T es el período del voltaje y la corriente.

Tiempo entre cruces por cero (obtenido de la figura 5.6)

$$t_d = \frac{3.7 \text{ ms}}{16.6 \text{ ms}} \times 360^\circ = 80.24^\circ$$

El valor eficaz del voltaje entre líneas se obtiene del análisis de espectro que entrega el ATP para el voltaje BUS1A - BUS1B



C VOLTAJE	VAB EN EL	TABLERO 1					
ē 1	2		4	5 6	7	8	
C 34567890	1234567890	1234567890	12345678901234	5678901234567890	2345678901234567	890	
с нрінмі	NHMAX	BUS1	BUS2				
C +-***///	/++++						
1841.020.		BUSIA	BUSIB				
Begin the	Fourier se	ries comp	station using	331 equidistan	t points. The	first two points.	followed
by the las	t two. ar	e :	could being	son equilibrium	e permeat the	intot the pointor	
-4.4784432	9833984405	+02 -4 58	52136230468750	FA02 -4 01211243	67578120E+02 -4	12187591552734406	+02
Coefficien	ts of the	resultant	Fourier serie	s follow "Com	lex amplitude"	is the square roo	t of the
sum of the	squares o	f the	fourier serie.	a torrow. comp	ies amplicade	la che square roo	e or ene
cosine and	the sine	coefficier	te "Fractio	o of fundamental'	applies to thi	s amplitude	
Harmonic	the sinc	Coning		fine	Complex Co cm	S mapricade:	
number		officient	conffi	sine .	malituda	fundamental	
number	3 01 3002	306138400	0.0000000000	21enc 2 0120022	06138400	0 004653945	
ů,	-4 320082	126115+02	-4 93153650100		42505402	1 000000000	
-	-1.320987	00000000000	-4.82152650192		142506702	0.007447701	
2	-7 220297	000295100			04035.00	0.007447791	
	-7.320287	500306-01	-2.3062246337	2.419813	104925700	0.003/3/195	
4	-1.499887	50470E-01	~1.33749499894	1.3458/8	08302+00	0.002078765	
Ş	-1.549295	83309E+01	-1.31465557034	16+01 2.031904	33752+01	0.031383604	
6	-1.470950	50126E+00	-1.32914403765	5E+00 1.9825032	7868E+00	0.003062058	
7	1.370849	33813E+01	-6.68300232666	6E+00 1.525074	8795E+01	0.023555407	
8	3.580144	60599E-01	~1.25990299049	9E+00 1.309782	B629E+00	0.002023013	
9	9.443455	84491E-02	-9.67292183001	LE-01 9,7189096	7714E-01	0.001501126	
10	-4.524558	66864E-02	-8.37430014887	7E-01 8.3865141	3252E-01	0.001295332	
11	B.425620	89579E-01	-3.32604419686	3E+00 3.4311049	0577E+00	0.005299483	
12	2.918387	75125E-01	-1.18651151750	DE+00 1.2218753	8310E+00	0.001887237	
13	-2.975628	55233E+00	2.28354838126	5E+00 3.7508610	3328E+00	0.005793359	
14	-4.169229	40403E-01	-4.3161814061	3E-01 6.0009912	3096E-01	0.000926878	
15	-3.099999	44582E-01	-5.63353635422	2E-01 6.4301421	7716E-01	0.000993162	
16	-2.698032	23736E-01	-6.26932152232	2E-01 6.0252304	2132E-01	0.001054185	
17	1.320105	72172E+00	1.05560577198	9E+00 2.2772685	1678E+00	0.003517335	
18	-6.792910	33174E-02	1.92844482740	DE-01 2.0445869	4119E-01	0.000315795	
19	7.253660	61124E-01	-2.79281225311	LE+00 2.8854733	06712+00	0.004456732	
20	2.204316	04267E-01	-6.97189606332	2E-01 7.3120683	7589E-01	0.001129379	
21	2.267570	77104E-01	-4.81632563347	7E-01 5.3234265	1018E-01	0.000822225	
22	2.977218	05063E-01	-4.18542818865	E-01 5.1363057	19416-01	0.000793324	
23	-2.590920	78722E+00	-8.28918107014	E-01 2.7202896	4520E+00	0.004201599	
24	-5.289353	52808E-01	-8.50901333072	2E-01 1.0019010	36072+00	0.001547477	
25	3.484970	659805-01	1 81026717804	E+00 1 8435066	37765+00	0 002847372	
26	-1.829412	044276-01	2 59828666551	F-01 3 1777101	85645-01	0 000490810	
27	-3.098188	750098-01	9 03510451977	F-02 3 7272441	28985-01	0 000498461	
28	-1.563824	982516-01	1 75683125381	F-01 3 9733241	19716-01	0 000613696	
29	1.818728	820285+00	-1 62119509000	2 4164006	32396+00	0 003763121	
30	6.682265	365948-01	-1 17725828545	F-01 6 7851755	69718-01	0 001047998	
Derived fro	m table:	11 RMS VA	lue = 4.5822705	38+02 21 THD	= 4.21699784E+00	1	

Valor eficaz del voltaje entre líneas en el tablero 1:

$$V_{ab} = 458.22 V$$

El valor eficaz de la corriente se obtiene también del análisis de espectro que el ATP efectúa para la corriente BUSPA - BUS1A.

C CORRIENTE FASE "A" EN EL TABLERO 1 C	
C 1 2 3 4 5 6 7	8
C 3456789012345	90
C HPIHMINHMAX BUS1 BUS2	
C +-***////++++******	
1941.020.036.6 BUSPA BUSIA	
Begin the Fourier series computation using 331 equidistant points. The fi	irst two points, followed
by the last two, are :	
3.8951593017578120E+02 3.8557446289062500E+02 4.0409921264648440E+02 4.04	D80126953125000E+02
Coefficients of the resultant Fourier series follow. "Complex amplitude" i	is the square root of the
sum of the squares of the	
cosine and the sine coefficients. "Fraction of fundamental" applies to this	amplitude.
Harmonic Cosine Sine Complex	Fraction of
number coefficient coefficient amplitude	fundamental
0 -2.38803663571E+00 0.000000000000000 2.38803663571E+00	0.004020089
1 3.77677641937E+02 -4.58504353728E+02 5.94025793722E+02	1.000000000
2 1.50804324221E+00 -4.72392774864E+00 4.95879902746E+00 (0,008347784
3 5.41455601676E-01 -3.72294880488E+00 3.76211668777E+00	0.006333255

143

FALLA DE OI

JEN

4	-6.49224813625E-01	-5.50429617563E+00	5.54245155573E+00	0.009330321
5	2.74517962061E+01	1.47909484016E+02	1.50435423278E+02	0.253247291
e	1.79013759518E+00	8.20854447414E+00	8.40147576284E+00	0.014143284
1	-9.99656922063E+00	-7.98712393137E+01	8.04943865477E+01	0.135506551
ε	-3.62920985485E-02	-3.05873353128E+00	3.05894882791E+00	0.005149522
9	2.59617796628E-01	-1.70720555285E+00	1.72683299714E+00	0.002907000
10	4.25240779351E-01	-1.35513164245E+00	1,42028570675E+00	0.002390950
11	-8.14266229009E+00	3.19794073917E+00	8,74812975108E+00	0.014726852
12	-1.15477893774E+00	-1.12600894172E+00	1.61288887772E+00	0.002715183
13	5.71751222558E+00	1.09846795815E+01	1,23835831470E+01	0.020846878
14	4.27207929103E-01	1.03726690727£+00	1,12179733089E+00	0.001888466
15	1.68228501447E-01	7.34167276963E-01	7.53194808309E-01	0.001267950
16	1.97011865494E-01	9.35566093604E-01	9.560845102012-01	0.001609500
17	1.05857884259E+00	-5.60844608981E+00	5.707473758886+00	0.009608124
18	7.48805922001E-01	-2.56794121328E-01	7.91614508187E-01	0.001332626
19	-4,80553574855E+00	-3.25120131876E+00	5.80202411626E+00	0.009767293
20	-8.49404666219E-01	-7.53648121591E-01	1.13554998929E+00	0.001911617
21	-5.79536273775E-01	-6.68454520399E-01	8.846998013252-01	0.001489329
22	-8.99902775779E-01	-7.76598479650E-01	1.18866740699E+00	0.002001037
23	2.36791700283E+00	2,88293187210E+00	3.73072742390E+00	0.006280413
24	-3.59656444870E-01	2.78409193809E-01	4.54823523505E-01	0.000765663
25	3.76712903653E+00	-2.46936185268E-01	3.775213723416+00	0.006355303
26	9.63553005993E-01	-1.59660986067E-01	9.76691366722E-01	0.001644190
27	7.19951301133E-01	-5.01578206461E-02	7.21696392519E-01	0.001214924
28	1.10298140366E+00	-2.68503200946E-01	1.13519247079E+00	0.001911015
29	-2.81925918652E+00	-2.36023096523E-01	2.82912164158E+00	0.004762624
30	5.30822959344E-02	-4.91524272335E-01	4.94382281677E-01	0.000832257
Derived f	rom table: 1) RMS va	lue = 4.37314291E+02	2) THD = 2.89674624E+01	8

Valor eficaz de la corriente de la fase A en el tablero 1:

$$I_{a} = 437.31 A$$

Factor de potencia actual de la componente fundamental:

$$fp_1 = cos(\phi_1) = cos(80.24^\circ) = 0.1695$$

Factor de potencia deseado de la componente fundamental: fn - 000

$$fp_{2} = 0.99$$

Ángulo de desfasamiento para el factor de potencia deseado de la componente fundamental:

$$\phi_2 = \cos^{-1}(fp_2)\cos^{-1}(0.99) = 8.1^{\circ}$$

Potencia activa del tablero 1:

$$P = \sqrt{3}V_{LL}I_{L}\cos(\phi_{1}) = \sqrt{3} \times 458.22 \times 437.31 \times 0.1695 = 58.829 \text{ kW}$$

Potencia reactiva del banco de capacitores:

$$Q_{C} = P(tan(\phi_{1}) - tan(\phi_{2})) = 58.829 \times (tan(80.24^{\circ}) - tan(8.1^{\circ})) = 333.634 \text{ kVAR}$$

Reactancia equivalente del banco:

TES		CON
FALLA	DE	ORIGEN

$$X_{\rm C} = \frac{458.22^2}{333.634 \times 10^3} = 0.6293 \ \Omega$$

Corriente de 5ª armónica que se desea filtrar:

 $I_5 = 150.4354/\sqrt{2} = 106.3738 \text{ A}$

Potencia reactiva provocada por la 5ª armónica en el banco de capacitores:

 $Q_{C5} = l_5^2 X_{C1} n_{sint} = 106.3738^2 \times 0.6293 \times 5 = 35.604 \text{ kVAR}$

Corriente de 7ª armónica que se desea filtrar:

$$I_7 = 80.4943 / \sqrt{2} = 56.918 \text{ A}$$

Potencia reactiva provocada por la 7ª armónica en el banco de capacitores:

$$Q_{C7} = l_7^2 X_{C1} n_{sint} = 56.918^2 \times 0.6293 \times 7 = 14.270 \text{ kVAR}$$

Potencia reactiva total provocada por la 5ª y 7ª armónicas:

$$Q_T = Q_{C5} + Q_{C7} = 35.604 + 14.270 = 49.874 \text{ kVAR}$$

Potencia reactiva para el filtro de 5ª armónica:

$$Q_{F5} = \frac{Q_{C5}}{Q_{T}}Q_{C} = \frac{35.604}{49.874} \times 333.634 = 238.164 \text{ kVAR}$$

Potencia reactiva para el filtro de 5ª armónica operando a 480 V:

$$Q_5 = Q_{F5} \left(\frac{480}{458.22}\right)^2 = 238.164 \times 10^3 \left(\frac{480}{458.22}\right)^2 = 261.343 \text{ kVAR}$$

Potencia reactiva para el filtro de 7ª armónica:

$$Q_{F7} = \frac{Q_{C7}}{Q_T}Q_C = \frac{14.270}{49.874} \times 333.634 = 95.459 \text{ kVAR}$$

Potencia reactiva para el filtro de 7ª armónica operando a 480 V:

$$Q_7 = Q_{F7} \left(\frac{480}{458.22}\right)^2 = 95.459 \times 10^3 \left(\frac{480}{458.22}\right)^2 = 104.750 \text{ kVAR}$$

Reactancia capacitiva a frecuencia fundamental por fase (en estrella) del banco de capacitores del filtro de 5ª armónica:

Te	TIS CON
FALLA	DE ORIGEN

$$X_{C1} = \frac{V_{LL}^2}{Q_5} = \frac{480^2}{261.343 \times 10^3} = 0.8815 \ \Omega$$

Capacitancia por fase (en estrella) del banco de capacitores del filtro de 5ª armónica:

$$C = \frac{1}{120\pi X_{C1}} = \frac{1}{120\pi \times 0.8815} = 3.0088 \text{ mF} = 3008.8 \text{ }\mu\text{F}$$

Reactancia capacitiva a frecuencia fundamental por fase (en estrella) del banco de capacitores del filtro de 7a armónica:

$$X_{C1} = \frac{V_{LL}^2}{Q_7} = \frac{480^2}{104.750 \times 10^3} = 2.1995 \ \Omega$$

Capacitancia por fase (en estrella) del banco de capacitores del filtro de 7a armónica:

$$C = \frac{1}{120\pi X_{C1}} = \frac{1}{120\pi \times 2.1995} = 1.2059 \text{ mF} = 1205.9 \text{ }\mu\text{F}$$

5.4.2 Segundo caso. Verificación de la corrección del factor de potencia con la capacidad calculada para el banco de capacitores y amplificación de corrientes armónicas

Se realizó una simulación con los valores de las capacitancias equivalentes de los bancos de capacitores de los filtros de 5^a y 7^a armónica, con el propósito de verificar la corrección del factor de potencia en el tablero 1. Se agregó una sección para los bancos de capacitores correspondientes a los filtros de las componentes armónicas 5^a y 7^a entre las secciones de las cargas R-L agrupadas en el tablero BUS1 y el tablero BUS2.

```
BANCO DE CAPACITORES FILTRO DE 54 ARMONICA EN EL TABLERO BUSI
С
C
с
                            з
C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
С
 NOMBR. NODO REFERENCIAS RES
                              IND
                                     CAP
с
 NOD-I NOD-F
              BRANCH
                        (OHM)
                               (MH)
                                     [UF]
                               (OHM) (OHM)
С
 *****
                 ......
 BUS1A
                                    3008.8
  BUS1B
             BUS1A
             BUS18
 BIIS1C
\mathbf{C}
c
С
 BANCO DE CAPACITORES FILTRO DE 7A ARMONICA EN EL TABLERO BUSI
c
c
с
                                                         6
                                                                  7
c
 с
 NOMBR. NODO REFERENCIAS RES
                               IND
                                     CAP
                         (OHM) [MH1
с
 NOD-I NOD-F
                                     TUFI
              BRANCH
c
                               TORM1 TORM1
                                     1205.9
 BUS1A
  BUS1B
             BUS1A
  BUS1C
             BUS1B
```



En la figura 5.7 se muestran las formas de onda del voltaje entre líneas en el tablero 1 y de la corriente en la fase A del mismo tablero. Se observa que ambas formas de onda están prácticamente en fase. Un factor de potencia de 0.99 inductivo equivale a un desfasamiento de 8.1° entre el voltaje y la corriente, lo cual equivale a una diferencia de 0.37 ms.

Ángulo de desfasamiento real entre el voltaje y la corriente:



Factor de potencia real en el tablero 1:

fp = cos(7.99) = 0.99

Se verificó el problema de la amplificación de las corrientes armónicas al realizar la simulación con el banco de capacitores. La 5^a armónica cuya magnitud sin los bancos de capacitores era de 106.37 A aumentó hasta 143.04 A en el tablero 1; de la misma forma la 7^a armónica cuya magnitud sin los bancos de capacitores fue de 56.91 A, aumentó hasta 108.58 A. Las amplitudes de las componentes armónicas sin los bancos de capacitores se presentaron en el primer caso, en donde se obtuvieron los requerimientos de potencia reactiva del tablero 1. Las amplitudes de las corrientes armónicas en la fase A del tablero 1, con los bancos de capacitores se muestran a continuación.

С									
С	CORRIENTE FASE	"A" EN E	EL TABLERO 1						
С									
с	1	2	3	4	5 6	7	8		
С	345678901234567	89012345	567890123456	789012345678	9012345678901	2345678901	234567890		
С	HPIHMINHMAX		BUS1 BUS2						
С	+-***////**+*								
1	1941.020.036.6	E	BUSPA BUSIA						
B€	gin the Fourier	series	computation	using 331	equidistant	points.	The first two	o points,	followed
by	y the last two,	are :							
- 1	1.00349998474121	10E+02	-1.05260566	11142580E+02	-1.02595230	10253910E+	02 -9.9121627	807617180E	+01
Co	pefficients of	the resu	iltant Fourie	er series fo	1low, "Comp	lex amplit	ude" is the	square roo	ot of the
5 L	um of the square	s of the	e						
						1	0900777	A	

147

TESIS CON Falla de origen

cosine and	the sine	coefficients.	"Fraction of	fundamental" applies	to this amplitude.
Harmonic		Cosine	Sine	Complex	Fraction of
number	c	pefficient	coefficient	amplitude	fundamental
0	1.086789	995212E+00 0	.0000000000E+00	1.08678995212E+00	0.002653951
ī	-2.17634	590642E+02 -3	.46878216644E+02	4.09498854975E+02	1.000000000
2	-2.923100	069796E+00 -3	.95001295202E+00	4.91397191806E+00	0.011999965
3	9.91655	377070E+00 1	.87398015505E+01	2.12018442792E+01	0.051775100
4	-2.639599	79868E+00 -5	.70736008902E+00	6.28819896973E+00	0.015355840
5	2.399499	973392E+01 2	.00864229263E+02	2.02292358963E+02	0.493999816
6	-2.469889	959816E+00 1	.33022874631E+01	1.35296417683E+01	0.033039511
7	3.473465	42254E+01 -1	.49586582194E+02	1.53566408360E+02	0.375010593
8	-6.804733	194006E-01 -8	.01379715480E+00	8,04263569225E+00	0.019640191
9	4.769010	06340E+01 4	.97257324023E+01	6.88984336645E+01	0.168250614
10	3.170439	943462E+00 2	.49559255408E+00	4.03480710872E+00	0.009853036
11	1.127003	344664E+01 -1	.03249359947E+01	1.52845667314E+01	0.037325054
12	3.409040)66246E+00 6	.15143612968E-01	3.46409582762E+00	0.008459354
13	-1.538279	984926E+01 -8	.01717940209E+00	1.73466323830E+01	0.042360637
14	-7.429603	335492E-01 -5	.48182798379E-01	9.23306255017E-01	0.002254722
15	2.442112	271521E-01 -4	.04713879855E+00	4.05450016647E+00	0.009901127
16	-1.868476	12529E-01 -1	.04511845412E+00	1.06168954417E+00	0.002592656
17	9.840202	40549E-01 3	.55919423470E+00	3.69271708017E+00	0.009017649
18	-3.247210	10109E-01 -7	.57530827459E-03	3.24809359012E-01	0.000793187
19	3.988600	983401E+00 6	.46881570812E-01	4.04071681508E+00	0.009867468
20	6.902381	81777E-01 -8	.74842712094E-02	6.95760192374E-01	0.001699053
21	1.531894	18243E+00 6	.727797811226-01	1.67312056351E+00	0.004085776
22	8.953879	02038E-01 6	.37019306435E-02	8.97651063100E-01	0.002192072
23	-1.517833	371246+00 -7	.32608697750E-01	1.68538827778E+00	0.004115734
24	4.244238	95276E-01 -2	.588411502472-01	4.97126124784E-01	0.001213987
25	~1.872505	89965E+00 7	.56100309414E-01	2.01939744036E+00	0.004931387
26	-1.663560	60049E-01 2	.04027502198E-01	2.63251895279E-01	0.000642864
27	-8.442563	44179E-01 3	.00540832543E-01	8,96154878753E-01	0,002188419
28	-3.449560	05995E-01 4	.08673956685E-01	5.34798138502E-01	0.001305982
29	0.587756	93286E-01 -7	.03838081635E-01	1.11035297835E+00	0.002711492
30	-1.850520	74500E-02 2	.76577128072E-01	2.77195509479E-01	0.000676914
Derived fro	om table;	 RMS value 	= 3.45202451E+02	2) THD = 6.490316.	28E+01 %

5.4.3 Tercer caso. Cálculo de los filtros para 5^a y 7^a armónica sintonizados a 300 y 420 Hz respectivamente y simulación del sistema eléctrico con los filtros

a) Obtención de parámetros del filtro de 5ª armónica sintonizado a 300 Hz

Reactancia capacitiva a frecuencia fundamental por fase (en estrella) del banco de capacitores:

$$X_{C1} = \frac{V_{LL}^2}{Q_5} = \frac{480^2}{261.343 \times 10^3} = 0.8815 \ \Omega$$

Capacitancia por fase (en estrella) del banco de capacitores:

$$C = \frac{1}{120\pi X_{C1}} = \frac{1}{120\pi \times 0.8815} = 3.0088 \text{ mF} = 3008.8 \text{ }\mu\text{F}$$

Orden de sintonía del filtro:

Reactancia inductiva a frecuencia fundamental por fase (en estrella):

$$X_{LI} = \frac{X_{CI}}{n_{sint}^2} = \frac{0.8815}{5^2} = 0.03526 \ \Omega$$

Inductancia del reactor en serie:



$$L = \frac{X_{L1}}{120\pi} = \frac{0.03526}{120\pi} = 0.09354 \text{ mH}$$

Factor de calidad del reactor (valor supuesto):

Q = 30

Resistencia del reactor:

$$R = \frac{n_{sint} X_{L1}}{Q} = \frac{5 \times 0.03526}{30} = 5.8773 \text{ m}\Omega = 0.005877 \Omega$$

b) Obtención de parámetros del filtro de 7ª armónica sintonizado a 420 Hz

Reactancia capacitiva a frecuencia fundamental por fase (en estrella) del banco de capacitores:

$$X_{C1} = \frac{V_{L1}^2}{Q_7} = \frac{480^2}{104.750 \times 10^3} = 2.1995 \,\Omega$$

Capacitancia por fase (en estrella) del banco de capacitores:

$$C = \frac{1}{120\pi X_{C1}} = \frac{1}{120\pi \times 2.1995} = 1.2059 \text{ mF} = 1205.9 \text{ }\mu\text{F}$$

Orden de sintonía del filtro:

$$n_{sint} = 7$$

Reactancia inductiva a frecuencia fundamental por fase (en estrella):

$$X_{L1} = \frac{X_{C1}}{n_{clast}^2} = \frac{2.1995}{7^2} = 0.04488 \ \Omega$$

Inductancia del reactor en serie:

$$L = \frac{X_{1.1}}{120\pi} = \frac{0.04488}{120\pi} = 0.1190 \text{ mH}$$

Factor de calidad del reactor (valor supuesto):

Q = 30

Resistencia del reactor:

$$R = \frac{n_{sint} X_{L1}}{Q} = \frac{7 \times 0.04488}{30} = 0.01047 \ \Omega$$



c) Análisis de los resultados de la simulación

Se realizó una simulación del sistema eléctrico con los filtros de 5^a y 7^a armónica sintonizados a 300 y 420 Hz respectivamente, para observar el comportamiento de la corriente y del voltaje en el filtro bajo condiciones de sintonía en la frecuencia exacta de las componentes armónicas. El código utilizado para agregar los filtros y obtener su respectivo análisis de espectro se muestra a continuación.

c č FILTRO DE 5A. ARMONICA TABLERO BUS 1. ORDEN DE SINTONIA: 5 č ē С 5 č č NOMBR, NODO REFERENCIAS RES IND CAP ē NOD-I NOD-F BRANCH [OHM] (MH) (UF) (OHM) (OHM) ċ č BUSIA F5A 0.00580.0935 з BUS1B F5B BUSIA ESA BUSIC F5C BUSID PSD 3008.8 2 F5A F5 A F5B F5C FSB c с ċ FILTRO DE 7A. ARMONICA TABLERO BUS 1. ORDEN DE SINTONIA: 7 с ċ С 6 A ē 67000 с NOMBR. NODO REFERENCIAS RES IND CAP ċ NOD-1 NOD-F BRANCH (OHM) (MH) (UF) (OHM) С (OHM) ē BUSIA F7A 0.01040.1190 з BUSIB F7B BUSIA F7A BUSIC F7C BUSIB F7B F7A 1205.9 2 F7B F7A F7C F7B C c TARJETA PARA ACTIVAR LA GRAFICACION DE LA SERIE DE FOURIER С c с ٦ с ē SPECIAL NUMERO DE С REQUEST ARMONICAS č WORD ċ (pag 14B-18) FOURIER ON 31 c с PLOT CARDS ē COLUMNA 1-2. 1 C COLUMNA VOLTAJE DE NODO 3 : 4 ... A - VOLTAJE BRANCH c c - CORRIENTE BRANCH 9 COLUMNA UNIDADES DE HPI, HMIN, HMAX 4 : 0000 - GRADOS -CICLOS 2 3 - SEGUNDOS MILISEGUNDOS 4 с - MICROSEGUNDOS 5 č 6 FRECUENCIA EN HZ ĉ LOGARITMO BASE 10 DE LA FRECUENCIA EN 6 _ COLUMNA ESCALA HORIZONTAL HPI 5-7: C C C C COLUMNA TIEMPO INICIAL HMIN 8-11: COLUMNA TIEMPO FINAL HMAX 12-15: COLUMNA 25-30: PRIMERA VARIABLE ċ COLUMNA 31-36: SEGUNDA VARIABLE С

```
<u>Simulación de un caso de distorsión armónica</u>
```

```
VOLTAJE VAB PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR
č
                                                                 7
  3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
с
č
   HPIHMINHMAX
                      BUS1 BUS2
  +-***////*+++
                           ......
C
 1841.026.543.1
                      VHA
                           VWB
c
 CORBIENTE FASE "A" ALIMENTADOR LADO PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR
č
č
ē
                                                                 7
č
  3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
   HPIHMINHMAX
                      BUS1 BUS2
ċ
č
  +-***////++++
                           .....
 1941.026.543.1
                      V23A VHA
c
С
 VOLTAJE VAB EN EL TABLERO 1
č
č
                           7
                                                                 7
                                                       6
 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
č
č
   HPIHMINHMAX
                       BUS1 BUS2
č
    · · · ////++++
                       ----
 1841.026.543.1
                      BUSIA BUSIB
c
C CORRIENTE FASE "A" EN EL TABLERO 1
с
                                                                 7
C
                                              5
 С
~
   HPIHMINHMAX
                       BUS1 BUS2
c
  +-***////+***
 1941.026.543.1
                      BUSPA BUSIA
C
C VOLTAJE VAN EN EL BANCO DE CAPACITORES DEL FILTRO DE 5A ARMONICA
с
ċ
 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
с
ċ
  HPIHMINHMAX
                      BUS1 BUS2
ē
 +-***////++++
                      ----.........
 1841.026.543.1
                      F5A
ċ
 VOLTAJE VAN EN EL REACTOR DEL FILTRO DE 5A ARMONICA
с
с
 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
с
č
   HPIHMINHMAX
                       8051 8052
č
  +-***////++++
 1841.026.543.1
                      BUSIA F5A
c
C CORRIENTE FASE "A" EN EL FILTRO DE 5A ARMONICA
с
С
                 2
 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
С
c
   HPIHMINHMAX
                       BUS1 BUS2
  - ...//// ....
С
 1941.026.543.1
                      BUSIA F5A
C VOLTAJE VAN EN EL BANCO DE CAPACITORES DEL FILTRO DE 7A ARMONICA
с
                                                                •
ē
 c
   HPIHMINHMAX
                      BUS1 BUS2
                      -----
 +-***////++++
 1841.026,543.1
                      F7A
C VOLTAJE VAN EN EL REACTOR DEL FILTRO DE 7A ARMONICA
č
ċ
                                                                 7
                           ٦
                                             s
č
 c
  HPIHMINHMAX
                      BUS1 BUS2
 +-***////++++
С
 1841.026.543.1
                      BUSIA F7A
c
C CORRIENTE FASE "A" EN EL FILTRO DE 7A ARMONICA
с
С
 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
с
č
  HPIHMINHMAX
                       BUS1 BUS2
                       ----****
C +-***////++++
1941.026.543.1
                      BUS1A F7A
```



```
C
C SPECIAL REQUEST WORD
C ++++++++
FOURIER OFF
C
BLANK CARD ENDING CASE
BLANK
BLANK
BLANK
BLANK
```

Se observó que la distorsión en la tensión entre líneas en el tablero l disminuyó notablemente, de igual forma la distorsión en la corriente en la fase A tuvo una disminución considerable, como se muestra en la figura 5.8.



Figura 5.8

La distorsión armónica total del voltaje entre líneas en el tablero I disminuyó del 4.21% inicial, hasta el 1.15% con los filtros sintonizados a 300 y 420 Hz. La reducción obtenida en la distorsión armónica del voltaje mejoró notablemente la forma de onda del voltaje, esto se corroboró comparando las formas de onda de la tensión en las figuras 5.7 y 5.8.

Del mismo modo, la forma de onda de la corriente en la fase A del tablero experimentó una mejoría notable, al disminuir la distorsión armónica total de un 28.96% inicial hasta un 6.34% con los filtros sintonizados a 300 y 420 Hz. Comparando las figuras 5.7 y 5.9 se corroboró la mejoría experimentada en la forma de onda de la corriente.

Los análisis de espectro generados por el ATP para la corriente en la fase A y el voltaje entre las fases A y B en el tablero 1 se muestran a continuación.

PALLA DE UNGEN

	Fourier series	computat:	ion using	332	equidistant	points.	The	first	two point	s, followed
by the las	t two, are :	•							-	
2.11917514	80102540E+01	3.3370227	813720700E	E+01 -	1.5228878259	6588102+0	0 -7.	272565	841674805	0E+00
coefficien	ts of the res	ultant Pol	rier serie	es 101.	Low. "Compl	ex amplic	uae"	15 CN	e square	root or the
cosine and	the sine coef	ficients.	"Fractic	on of f	undamental"	applies	to thi	s ampl	itude.	
Harmonic	c	osine		Sine		Complex		Fract	ion of	
number	coeffi	cient	coeffi	icient	am	plitude		funda	mental	
0	-1.0371973320	7E-01 0.	000000000000000000000000000000000000000	DOE+00	1.03719733	207E-01		0.000	156378	
1	9.4068404505	05-02 3	5050647771	/5E+02	3 50613721	0326+02		0.005	286206	
3	-1.8085650200	0E-01 2	0320293725	2E+00	2.04006187	2865+00		0.003	075803	
4	-2.5004478466	3E-01 1.	1690748576	56E+00	1.19551596	274E+00		0.001	802480	
5	1.4436547993	9E-01 -6.	4874508097	76E-01	6.64613851	713E-01		0.001	002039	
6	-6.5653660444	5E-01 8.	8149646363	32E-01	1.09912525	600E+00		0.001	657152	
7	3.2651040680	0E-02 2.	4563868399	98E+00	2.45660383	418E+00		0.003	703824	
8	6 4264262020	05-01 5.	1100/90339	97E-01	3.33810/94	0435-01		0.000	646905	
10	1 93984362039	16-02 4.	5019491345	SOF-01	2 50860406	0432-01		0.000	1378722	
11	2.3380845792	0E+00 3.	1052665499)5E+00	3.88707085	679E+00		0.005	860540	
12	3.1181903873	0E-02 6.	6315634212	25E-01	6.63889030	B10E-01		0.001	000946	
13	1.0289343883	1E+00 1.	0360597193	32E-01	1.03413740	521E+00		0.001	559170	
14	1.1474325235	9E-01 3.	6153475625	7E-01	3.79306464	410E-01		0.000	571881	
15	6.8163907659	9E-02 3.	0047646752	24E-01	3.08111060	890E-01		0.000	464539	
10	2.2366643357	8E-03 1.	2106106002	146-01	2 71455406	0925-01		0.000	002737	
18	1.3316793481	96-01 6.	6229893959	4E=01	6.75554279	2785-01		0.001	018534	
19	2.0301388946	0E-01 -7.	7473273244	3E-01	8.00890408	254E-01		0.001	207503	
20	8.7303435203	7E-02 2.	0885310816	6E-01	2.26365877	704E-01		0.000	341292	
21	7.2122215943	8E-02 2.	2582040073	39E-01	2.37057941	0662-01		0.000	357412	
22	-3.1029608587	9E-02 1.	6101106584	2E-01	1.63973778	187E-01		0.000	247223	
23	1.3305089317	1E+00 1.	3459207051	3E+00	1.89255292	1826+00		0.002	853404	
24	2.3089166282	78-01 -0	72004053975	125-01	0.00000146	102E-01		0.001	508000	
26	7.3672857050	AE-02 1.	1880957300	158-01	1.39797727	1056-01		0.000	210773	
27	7.5491105477	1E-02 1.	8044023468	0E-01	1,95595463	387E-01		0.000	294899	
28	-6.1135001393	4E-02 1.	8549741855	9E-01	1.95312008	559E-01		0.000	294472	
29	1.1493070964	2E+00 6.	1199974234	8E-01	1.30209465	344E+00		0.001	963169	
30	3.6340540569	0E-01 4.	7350214350	0E-01	5.96881704	179E-01		0.000	899919	
Derived fro	om table: 1)	RMS value	■ 4.690280	097E+02	2) THD =	1,155980	95E+00			
-										
CORRIENT	E FASE "A" EN	EL TABLERC	1 1							
CORRIENT	E FASE "A" EN	EL TABLERC	1							
CORRIENTI	E FASE "A" EN 2	EL TABLERO	4	5	6	7		8		
CORRIENTI 1 34567890	E FASE "A" EN 2 12345678901234	EL TABLERC 3 5678901234	1 5678901234	5 567890	6 123456789012	7 345678901	234567	8 1890		
CORRIENTI C 1 C 34567890 C HP1HMI1	E FASE "A" EN 2 12345678901234 NHMAX	EL TABLERC 3 5678901234 BUS1 BUS	4 5678901234	5 567890	6 123456789012	7 345678901	234567	8 890		
CORRIENT	E FASE "A" EN 2 12345678901234 NHMAX /++++ 543 1	EL TABLERC 3 5678901234 BUS1 BUS BUSPA BUS1	4 5678901234 2 •	5 567890	6 123456789012	7 345678901	234567	8 1890		
CORRIENT C 1 34567890 C HPIHMIN C +-***/// 1941.026.5	E FASE "A" EN 2 12345678901234 NHMAX /++++ 543.1 Fourier series	EL TABLERC 3 5678901234 BUS1 BUS BUSPA BUS1 COMPUTAT	4 5678901234 2 •• A on using	567890 332	6 123456789012 equidistant	7 345678901 Points.	234567 The	8 890 first	two point	s. followed
C CORRIENT C 1 C 34567890 C HPIHMIN C +-***/// 1941.026. Begin the loss by the lass	E FASE "A" EN 2 12345678901234 NHAX /++++ 543.1 Fourier series t two, are :	EL TABLERO 3 5678901234 BUS1 BUS BUSPA BUS1 computati	4 5678901234 2 •• A on using	567890 332	6 123456789012 equidistant	7 345678901 points.	234567 The	8 890 first	two point	s, followed
C CORRIENT C 1 C 34567890 C HPIHM1 C +-***///, 1941.026. Begin the 1 by the last -5.56492233	E FASE "A" EN 2 12345678901234 NHMAX /+++ 543.1 Fourier series t two, are : 327636720E+01	EL TABLERC 3 5678901234 BUS1 BUS BUSPA BUS1 computati -4.797447	4 5678901234 2 •• A on using 2045898440	5 567890 332 15+01	6 123456789012 equidistant -5.264002990	7 345678901 points. 7226560E+	234567 The 01 -4	8 690 first .94930	two point 381774902	s, followed
CORRIENT C 1 C 34567890 C HPIHMI C +-***/// 1941.026. Hegin the 1 by the 1 c 5.56492233 Coefficien	E FASE "A" EN 2 12345678901234 VHMAX V++++ 543.1 Fourier series t two, are : 327636720E+01 ts of the resu	EL TABLERG 3 5678901234 BUSI BUS BUSFA BUSI computati -4.797447 ultant Fou	4 5678901234 2 A on using 2045898440 rier serie	5 567890 332 E+01 s foll	6 123456789012 equidistant -5.264002990 .cw. "Comple	7 345678901 points. 7226560E+ 2x amplit	234567 The 01 -4 ude"	8 890 first .94930 is th	two point 381774902 e square	s, followed 30E+01 root of the
CORRIENT C 1 C 34567890 C HPIHMIN C +-**//// 1941.026, Begin the las coefficient Sum of the	E FASE "A" EN 2 12345678901234 WHMAX /++++ 543.1 Fourier series t two, are : 327636720E+01 ts of the res squares of th	EL TABLERG 3 5678901234 BUS1 BUS BUSPA BUS1 Computati -4.797447 ultant Fou	4 5678901234 2 • • • • • • • • • • • • • • • • • •	5 567890 332 E+01 es foll	6 123456789012 equidistant -5.264002990 .ow. "Comple	7 345678901 points. 7226560E+ 2× amplit	234567 The 01 -4 ude"	8 690 first .94930 is th	two point 381774902 e square	s, followed 30E+01 root of the
CORRIENT C 1 C 34567890 C ++**/// 1941.026.9 Regin the 1 by the last -5.56492233 Coefficient Sum of the Cosine and Historic	E FASE "A" EN 2 12345678901234 WHMAX /++++ 543.1 Fourier series t two, are : 27636720E+01 ts of the res squares of th the sine coef	EL TABLERG 3 5678901234 BUS1 BUS BUSPA BUS1 COMPUTATI -4.797447 ultant Fou e ficients.	4 5678901234 2 A on using 2045898440 rier serie "Fractio	5 567890 332 E+01 s foll	6 123456789012 equidistant -5.264002990 .cw. "Comple undamental"	7 345670901 points. 7226560E+ ex amplit applies	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 1990 first .94930 is th s ampl	two point 381774902 e square itude.	s, followed 30E+01 root of the
CORRIENTI C 1 C 34567890 C HPIHMI C ++++//// 1941.026/ Regin the 1 by the las cosine and the cosine and Harmonic commer	E FASE "A" EN 2 12345678901234 UHMAX /+++ 543.1 Fourier series t two, are: 227636720E+01 1236720E+01 ts of the result squares of th the sine coef confi	EL TABLERC 3 5678901234 BUSPA BUS 	4 5678901234 2 A on using 2045898440 rier serie "Fractio	5 567890 332 E+01 s foll Sine cient	6 123456789012 equidistant -5.264002990 .ow. "Comple undamental" .om	7 345678901 points. 7226560E+ ex amplit applies Complex Dirude	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 1890 first .94930 is th s ampl Fract funda	two point 381774902 e square itude. ion of mental	s, followed 30E+01 root of the
CORRIENTI C 1 C 34567890 C HPIHMIN C +-***/// 1941.026.1 Begin the l Begin the l by the last 5.56492237 Coefficient sum of the Cosine and Harmonic number 0	E FASE "A" EN 2 12345678901234 WHMAX /++++ 543.1 Fourier series t two, are: 27636720E+01 ts of the res squares of th the sine coeffi 0,3300249849	EL TABLERC 3 5678901234 BUS1 BUS SUST BUS COMPUTATION -4.797447 Iltant Fou e ficients. osine cient 5E-01 0.	4 5678901234 A on using 2045898440 rier serie "Fractio coeffi 000000000	5 567890 332 E+01 s foll Sine cient 0E+00	6 123456789012 equidistant -5.264002990 .ow. "Comple undamental" 9.33002498	7 345678901 points. 7226560E++ ex amplit applies Complex plitude 495E-01	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 first .94930 is th s ampl Fract funda 0.002	two point 381774902 e square itude. ion of mental 163175	s, followed 30E+01 root of the
CORRIENTI C 14567890 C HPHIMIT C +-**/// Begin the 1 by the lass Coefficient Sum of the Cosine and Harmonic number number 1	E FASE "A" EN 2 12345678901234 UHMAX /+++ fourier series t two, are : 327636720E+01 the resu squares of the the sine coef C C C 3300249849 -3.2494030490	EL TABLERC 3 5678901234 BUS1 BUS BUSPA BUSI computati -4.797447 iltant Fou e ficients. osine cient 5E-01 0. 48-01 4.	4 5678901234 2 A on using 2045898440 rier serie "Fractio coeffi 0000000000	5 567890 332 E+01 s foll s foll Sine cient 0E+00 2E+02	6 123456789012 equidistant -5.264002990 .ow. "Comple undamental" 9.33002498 4.31311634	7 345678901 points. 7226560E+ ex amplit applies Complex plitude 495E-01 812E+02	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 1890 first .94930 is th Fract funda 0.002 1.000	two point 381774902 e square itude. ion of mental 163175 000000	s, followed 30E+01 root of the
CORRIENTI C 33567890 C 34567890 C HPHIMIT C +-***/// 1941.026.1 Begin the 1 by the last coefficient sum of the Cosine and Harmonic number 0 1 2	E FASE "A" EN 2 12345678901234 VHMAX VHAX 543.1 FOurier series t two, are: 27636720E+01 ts of the resi squares of th the sine coeffi 0 3020249849 -3.2494030490.0 1.822367731	EL TABLERC 3 5678901234 RUS1 RUS BUSPA BUS1 computati -4.797447 altant Fou e ficients. 051ne clent 55-01 0. 48+01 4. 55-01 2.	<pre>4 5678901234 2 A on using 2045898440 rier serie "Fractio coeffi 000000000 3008588015 8950568109</pre>	5 567890 332 E+01 == foll == f	6 123456789012 equidistant -5,264002990 .ow. "Comple undamental" 9.33002498 4.31311634 2.90078662	7 345678901 points. 7226560E+ ex amplit applies Complex plitude 495E-01 812E+02 634E+02	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 1990 first .94930 is th 5 ampl Fract funda 0.002 1.000 0.006	two point 381774902 e square itude. ion of mental 163175 00000 7225501	s, followed 30E+01 root of the
CORRIENTI 34567890 34567890 34567890 HPIHMIT 2 +-**/// 1941.026.1 degin the last 5.5649223 Coefficient Harmonic number 0 1 2 3 3	E FASE "A" EN 2 12345678901234 WHAX (*** 643.1 Fourier series 127636720E+01 227636720E+01 127636720E+01 027636720E+01 027636720E+01 027636730 0206731 1.327350470 1.327350470	EL TABLERC 3 5678901234 BUS1 BUS Computati -4.797447 Wiltant Fou e ficients. 0sine cient 5E-01 0. 4E+01 4. 5E-01 2. B++00 1.	4 5678901234 2 A on using 2045898440 rier serie "Fractio coeffi 000000000 3008588015 8950568109 8493106113	5 567890 332 E+01 s foll s foll on of f Sine cient OE+00 2E+02 iE+00 iE+00 iE+00	6 123456789012 equidistant -5.264002990 .ow. "Comple undamental" 9.33002996 4.31311634 2.30078662 2.30078662	7 345678901 points. 7226560E+ 5x amplit applies Complex plitude 495E-01 812E+02 634E+00 642E+00	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 9990 first .94930 is th Fract funda 0.002 1.000 0.006 0.005	two point 381774902 e square itude. ion of mental 163175 000000 725501 344474	s, followed 30E+01 root of the
CORRIENTI 34567890 34567890 HPIUMIN +-+++/// Hogin the 1 by the lass coefficient sum of the cosine and Harmonic number 1 2 3 4	E FASE "A" EN 2 12345678901234 VHMAX V+++ 543.1 FOurier series t two, are: 27636720E+01 LS of the resis squares of th the sine coeffi 9.300249849 -3.2494030490 1.822367731 1.3773580470	EL TABLERC 3 5678901234 BUSTA BUS BUSTA BUS computati -4.797447 itant Fou e ficients. osine t5E-01 4. 5E-01 5E-01 4. 5E-01 5E-01 5E	4 5678901234 2 3 0 0 1 2045898440 rier serie "Fractio coeffi 0000000000 0008588015 8950568109 8483106113 31224300255	5 5567890 332 E+01 es foll sine cient 02E+02 12E+02 12E+00 6E+00 2E+00 2E+00	6 123456789012 equidistant -5,264002990 .ow. "Comple undamental" 9.3002496 4.31311534 2.90078662 2.30513400 4.39377505	7 345678901 points. 7226560E+ * amplit applies complex plitude 495E-01 812E+02 634E+00 642E+00 902E-00	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 890 first .94930 is th Fract funda 0.002 1.000 0.006 0.005 0.010	two point 381774902 e square itude. ion of mental 163175 000000 725501 344474 187008	s, followed 30E+01 root of the
C CORRIENTI C 1 534567890 C 34567890 C HPIHMI Segin the lass Coefficient number and Harmonic number and Harmonic 1 2 3 4 5 5 5 5 6 4 5 5 5 5 5 6 1 2 3 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	E FASE "A" EN 2 1234567901234 VHMAX /++++ 543.1 Fourier series t two, are: 527636720E+01 15 of the rest squares of th the sine coc Coeffi 9.3300249849 -3.2494030490 1.822578430470 1.3774580470 -4.3256784595331	EL TABLERC 3 5678901234 HUGI BUS Computati -4.797447 litant Fou 6 ficients. 05.ne 5E-01 0. 4E-00 1. 2E-01 4. 2E-01 4. 2E-01 1.	<pre> 1 4 5678901234 2 A on using 2045898440 rier serie "Fractio coeffi</pre>	5 5567890 332 E+01 s foll s foll s foll s foll c foll c foll 2E+02 2E+00 2E+00 2E+01 2E+01	6 123456789012 equidistant -5.264002990 .ow. "Comple undamental" 9.3300290 4.31311634 2.90078662 2.30513400 4.39317305 2.30613420	7 345678901 points. 7226560E+ ex amplies of the second sec	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 890 first .94930 is th Fract funda 0.002 1.000 0.005 0.010 0.047	two point 381774902 e square itude. ion of mental 163175 000000 725501 344474 187008 769734	s, followed 305+01 root of the
CORRIENT C 1 C 34567890 C HPIHMI C 3456780 C HPIHMI Segin the lag Segin the lag Source of the lag S	E FASE "A" EN 2 12345678901234 VHMAX /++++ 543.1 Fourier series t two, are: 27636720E+01 LS of the resis squares of th the sine conf 9.300249849 -3.24984903490 1.6223667311 1.377459645941 -1.4120363345 5.229643742	EL TABLERC 3 5678901234 BUSI BUSI computati -4.797447 e ficients. osine cient 52-01 0. 52-01 4. 52-01 5. 52-01 5. 52-015. 52-01 5. 52-01 5.	<pre></pre>	5 5567890 332 E+01 s foll s ine cient 0E+00 2E+02 1E+00 6E+00 2E+01 1E+00 FF+00	6 123456789012 equidistant -5.264002990' .ow. "Comple undamental" 9.3302498 4.31311634 2.90078662 2.30513400 4.39377505 2.059347505 5.598317529	7 345678901 points. 7226560E++ sx amplit applies Complex plitude 495E-01 812E+02 634E+00 642E+00 902E+00 385E+01 352E+00	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 890 first .94930 is th Fract funda 0.002 1.000 0.006 0.005 0.010 0.010	two point 381774902 e square itude. ion of mental 163175 000000 0725501 344474 187008 769734 6384233	s, followed 30E+01 root of the
CORRIENTIC 34567890 C 14567890 C HPIIMI 1941.0261 5,5649223 Coefficient Harmonic number 0 1 2 3 4 5 6 7 8	E FASE "A" EN 2 12345678901234 WHMAX /++++ 543.1 Fourier series t two, are: 27636720E+01 LS of the ress squares of th the sine cooff () 3300249849 -3.2494030490 1.822367731 1.3774580470 1.822364594 -4.325674594 -1.4061995831 1.1820363363 5.2229613742	EL TABLERC 3 5678901234 BUSTA BUST 	4 6678901234 2 A on using 2045898440 rier serie "Fractio coeffi 000000000 3008588015 8950568109 8483106113 3724300255 5058895659 5058895659 5058895559 6475815739	5 5567890 332 E+01 ss foll Sine cient 02E+00 2E+00 2E+00 2E+01 1E+00 2E+01 1E+00 6E+00 3E-01	6 123456789012 equidistant -5.264002990 ow. "Comple undamental" 9.33002490 4.31311634 2.90078662 2.30513400 4.39377505 2.0603(120 4.39377505 2.0603(120 4.39377505 2.0603(120 4.39377505 2.9003(120 4.39377505 2.9003(120 4.39377505 2.9003(120 4.39377505 2.9003(120 4.39377505 2.9003(120 4.39377505 2.9003(120 4.39377505 2.9003(120 4.39377505 2.9003(120 4.39377505 2.9003(120 4.39377505 2.9003(120 4.39377505 2.9003(120 4.39377505 2.9003(120)(120)(120)(120)(120)(120)(120)(120)	7 345678901 points. 7226560E+ ex amplit applies complex plitude 495E=01 812E+02 634E+00 642E+00 634E+00 634E+00 634E+00 634E+00 634E+00 794E+00 385E+01	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 890 first .94930 is th Fract funda 0.002 1.000 0.006 0.005 0.010 0.013 0.001	two point 381774902 e square itude. 163175 000000 725501 344474 187008 769734 638423 429055 678919	s, followed 305+01 root of the
C CORRIENT C 1 C 34567890 C 34567890 C HPIHMI C 4-***/// 1941.026: Sum of the Sum	E FASE "A" EN 2 1234567801234 WHMAX /++++ 543.1 Fourier series t two, are: 27636720E+01 ts of the resi squares of th the sine coeff 9.3300549649 -3.2496496 -3.24964964 -3.2356784546 1.3774540470 -4.3256784546 1.406195831 1.182036365 5.2299613742 -6.2556096479 -4.7040221307	EL TABLERC 3 5678901234 BUSTA BUST computati -4.797447 ficients. 05100 ficients. 0	4 5678901234 2 • A on using 2045898440 rier serie "Fractio 000588015 8950568105 8050568105 505889559 505889559 505889559 50588957300 505889559 50588957300 5058815739 5058917547	5 557890 332 E+01 s foll s fol	6 123456789012 equidistant -5.264002990' .ow. "Comple undamental" 9.33002496 4.31311634 2.90018662 2.90018662 2.90018662 2.90018662 2.9001620 4.59847550 5.79210749 7.2413741 4.70852411	7 345678901 points. 7226560E++ x amplit applies Complex Diitude 95E-01 312E+02 642E+00 642E+00 902E+00 385E+01 352E:00 794E+00 185E-01 327E-01	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 (890 first .94930 is th Fract funda 0.002 0.006 0.005 0.010 0.010 0.013 0.011	two point 381774902 e square itude, ion of mental 163175 000000 725501 344474 187008 769734 429055 678919 091676	s, followed 30E+01 root of the
CORRIENTIC C 1456789 C 3456789 C HPIHMI /// 1941.026.1 Scorffcient Harmonic number 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 9 10	2 2345678901234 WHAX VH+++ 543.1 Fourier series t two, are: 27636720E+01 ts of the res squares of th the sine coeff C 0.310249849 -3.2494030490 1.822367731 1.3774580470 1.822364584 -4.3256784584 -4.3256784584 -1.4061995831 1.1820363363 5.2229613742 -6.2556096479 -4.7040221307 -7.218398305	EL TABLERC 3 5678901234 BUSIA BUSI computati -4.797447 litant Fou e ficients. 05L-01 0. 4E+01 4. 9E+01 1. 2E+01 4. 9E+01 1. 8E+00 1. 4E+00 1. 8E+00 1. 3E+01 4. 9E+01 1. 5E-01 2. 8E+01 -3. 7E-01 2. 5E-01 5.	<pre>4 5678901234 2 A on using 2045898440 rier serie "Fractio coeffi c0000c000 3008588015 950568109 8483106113 3724300255 50588955730 4891792404 4891792404 48951792404 489847539 0585917547 </pre>	5 557890 332 E+01 = foll = fol	6 123456789012 equidistant -5,264002990 ow. "Comple undamental" 9.33002498 4.31311634 2.90078662 2.30513400 4.39377505 2.0603(120 4.39877505 5.79210749 7.24137441 4.50847550	7 345678901 points. 7226560E+ x amplit opples 11tude 955-01 312E+02 642E+00 902E+00 385E+01 352E+00 3852E+00 3852E+00 3852E+00 3852E+00 3852E+00 394E-01 397E-01 397E-01 397E-01	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 690 first .94930 is th Fract funda 0.002 0.006 0.001 0.010 0.011 0.001 0.001	two point 381774902 e square 100 of mental 163175 000000 7725501 3444708 18708 19708	s, followed 30E+01 root of the
CORRIENT C 1 34567890 C 34567890 C HPIHMI - 266 C - +***/// 1941.0261 Source	E FASE "A" EN 2 12345678901234 WHMAX /++++ 543.1 FOurier series t two, are: 27636720E+01 Es of the resu squares of th the sine cooff 9.3300249849 -3.2494030490 1.827336731 1.3774580470 -4.3256784584 1.406195831 1.182036365 5.2299613742 -6.2556096479 -4.7340221307 -7.2183988305 9.5391587246	EL TABLERC 3 5678901234 BUSTA BUST computati -4.797447 litant Fou ficients. cient 5E-01 4. 5E-01 4. 5E-01 4. 5E-01 4. 5E-01 4. 5E-01 2. 5E-01 -1. 2E-01 -1.	<pre>4 5678901234 7 5678901234 7 on using 20458998440 riser serie "Fractio 000606000 3008588015 8950588015 895058803 505889555 5058895553 505889552300 0585917547 4388410712 2502452029</pre>	5 5567890 332 E+01 s foll s fo	6 123456789012 equidistant -5.264002990 .ow. "Compl undamental" 9.3300240 4.31311634 4.31311634 4.31311634 2.30018622 2.30513400 4.39377505 5.79210749 7.24137441 4.70852441 9.03804591 1.253879303	7 345670901 points. 7226560E+ x amplit 3000000 3122000 3122000 3122000 3122000 3122000 3122000 3122000 3122000 3122000 31200000 31200000 31200000 312000000 3120000000000	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 (1175t) .94930 is th Fract funda 0.002 1.0000 0.010 0.010 0.011 0.001 0.001 0.001 0.001	two point 381774902 e square itude. itude. itolar	s, followed 30E+01 root of the
C CORRIENT C 1 C 3456789 C HPIHMI C - + + + ///, 1941.026.1 C + - + + ///, 1941.026.1 C + - + + ///, 1941.026.1 C + - + ///, 1941.026.1 C + - + ///, 1941.026.1 C + - + ///, 1941.026.1 C + - + - + ///, 1942.1 C + - + + - //, 1942.1 C + - + + - ///, 1942.1 C + - + + - ///, 1942.1 C + - + + - + ///, 1942.1 C + - + + - + //, 1942.1 C + - + + - + - + //, 1942.1 C + - + + - + - + - + - + - + - + - + -	E FASE "A" EN 2 12345678901234 WHMAX /+++ 543.1 FOurier series t two, are: 277636720E+01 ts of the resis squares of th the sine coeffi 0.300249849 -3.2494030490 1.822367731 1.3774504504 -4.325674594 -4.325674594 -4.325674594 -6.2556096479 -4.7040221307 -7.218398305 9.5391587246 2.4699317405	EL TABLERC 3 5678901234 BUSFA BUSF computati -4.797447 iltant Fou e ficients. 05101 0. 48:00 1 0. 48:00 1 4. 98:01 4. 98:01 4. 98:01 4. 98:01 3. 88:00 2. 88:01 -3. 78:01 -1. 58:01 -3. 98:01	<pre>4 5676901234 7 5676901234 7 7 6 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7 7</pre>	5 5567890 332 E+01 5 ine cient 0E+00 2E+00 2E+00 2E+00 2E+00 2E+01 1E+00 6E+00 3E-01 3E-01 7E-01 7E-01	6 123456789012 equidistant -5,264002990 .ow. "Comple undamental" 9.33002496 4.31311634 2.90078662 2.06036120 4.39377505 2.06036120 4.39377505 7.24137441 4.5082441 9.03804591 1.25387803 3.90306646	7 345678901 points. 7226560E+ x amplit complex applies Complex applies applies Complex applies	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 11111 11111 11111 11111 111111	two point 381774902 e square itude. ion of mental 163175 000000 759734 638423 429055 678919 091676 095479 091676 095479 001301	s, followed 30E+01 root of the
CORRIENT C 1456780 C 3456780 C 4-***///. 1941.026: 5.5649223 Coefficient Number number 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 13	E FASE "A" EN 2 12345678901234 WHMAX 543.1 Fourier series t two, are: 27636720E+01 5x of the real squares of th the sine coort (19.3100249849 -3.2494030490 1.8223367311 1.3774590470 -4.3256784584 1.406195831 1.3256784584 1.406195831 2.239613742 -6.2556096479 -4.7040221307 -7.2183988305 9.5391597246 2.4698317405 -1.015987246	EL TABLERC 3 5678901234 BUSTA BUST Computati -4.797447 11tant Fou Cient 5E-01 0. 5E-01 4. 5E-01 4. 5E-01 4. 5E-01 2. 5E-01 3. 5E-01 -1. 5E-01 -1. 5E-01 -1. 5E-01 -1. 5E-01 -3. 5E-01 -3. 5E-	<pre>) 1 4 5678901234 2 . A on using 2045898440 riser serie "Fractio Coeffi 000000000 000 3008588015 895059588015 8950568109 505889559 5058895593 30243801539 5869527300 0585917547 4388410712 250242274872 4388410712 5022274872 </pre>	5 5567890 332 E+01 351ne 0E+00 2E+00 6E+00 2E+00 2E+00 2E+00 6E+00 3E+01 7E-01 3E+01 7E-01 9E+01 7E-01 9E+00	6 123456789012 equidistant -5.264002990 .ow. "Complu undamental" 9.330078622 2.30513400 4.31311634 2.90078622 2.30513400 4.3937305 2.06076220 2.30513400 4.58947350 2.79210749 7.2413741 9.03804591 1.253197903 3.9030645 3.69952033	7 345670901 points. 7226560E+ mplits applies applies 05E-01 312E+02 642E+00 642E+00 902E+00 352E+00 935E-01 352E-01 198E-01 297E-01 292E-01 198E-01	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 first .94930 is th Fract funda 0.002 1.000 0.040 0.013 0.011 0.001 0.001 0.001 0.002 0.029 0.000 0.008	two point 381774902 e square ion of mental 163175 0000000 725501 344474 187008 769734 429055 678919 091676 095479 091676 095479 091677 0917302 577372 577372	s, followed 30E+01 root of the
C CORRIENT C 1 C 34567890 C HPIHMIT C 4-***/// 1941.026: Source Antiperiod Source Antiperiod C 4-***/// 1941.026: Source Antiperiod C 4-***/// 1941.026: Source Antiperiod Source Antiperiod C 4-***// Source Antiperiod C 4-***/// Source Antiperiod C 4-***// Source Antiperiod C 4-****// Source Antiperiod C 4-***// Source Antiperiod C 4-****// Source Antiperiod C 4-****// Source Antiperiod C 4-****/ Source Antiperiod C 4-****/ Source Antiperiod C 4-*****/ Source Antiperiod C 4-***** Source Antiperiod C 4-************************************	E FASE "A" EN 2 12345678901234 VHMAX /+++ 543.1 FOurier series t two, are: 27636720E+01 LS of the resis squares of th the sine coeffi 9.3100249849 -3.2494030490 1.822367731 1.3774580470 1.822364731 1.3774580470 1.822364544 -1.4061995813 5.2299613742 -6.2556096479 -4.7040221307 -7.218398305 9.5391587246 2.665346916407 -1.665446946	EL TABLERC 3 5678901234 BUSTA BUST computati -4.797447 litant Fou e ficients. 05L-01 0. 4E+01 4. 9E+01 1. 2E+01 4. 9E+01 1. 8E+00 1. 9E+01 -3. 7E+01 2. 8E+01 -3. 7E+01 2. 9E+01 -3. 7E+01 2. 7E+01 3. 7E+01 3. 7E+013. 7E+013. 7E+013. 7E+013. 7E+013. 7E+	4 5676901234 2 A on using 2045898440 rier serie "Fractio 000000000 3008588015 955568109 8483106113 31724300255 56589527300 44831792404 44941792404 44941794404 4494404404404 4494440440440440440440440440440440404404	5 5567890 332 E+01 5 ine cient 0E+00 2E+02 iE+00 2E+02 iE+00 2E+01 iE+00 2E+01 3E-01 6E-01 3E-01 7E-01 0E+01 4E-01	6 123456789012 equidistant -5,264002990 .ow. "Comple undamental" 9.33002496 4.31311634 2.90078662 2.0003620 4.39377505 2.0603(120 4.39377505 2.0603(120 4.39377505) 7.24137441 4.5082441 9.03804591 1.25337903 3.90306646 3.6052051005100000000000000000000000000000	7 345678901 points. 7226560E+ ex amplit 322650E+ ex amplit 305E-01 312E+02 534E+00 95E-01 312E+02 534E+00 934E+00 3152E+00 3152E+01 207E-01 105E-01 170E-01	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 890 first .94930 is th Fract 1.000 0.005 0.010 0.010 0.011 0.002 0.002 0.0000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.000000 0.00000000	two point 381774902 e square itude. ion of mental 163175 000000 725501 344474 187008 769733 638423 638423 638423 638423 638423 638423 638423 638423 638453 638453 638453 638454 639456 639455 639456 639455 639455 639455 639455 639455 639455 6395555 6395555 6395555 6395555 6395555 6395555 6395555 6395555 63955555 6395555555 639555555555555555555555555555555555555	s, followed 30E+01 root of the
CORRIENT C 3456780 E 3456780 E HPIHMI 1026: +**///. 1941.026: 5.5649223 Coefficient Number number 1 3 4 5 6 7 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16	E FASE "A" EN 2 234567801234 WHMAX /++++ 543.1 Fourier series t two, are: 27636720E+01 LS of the ress squares of th the sine coof () 3300249849 -3.2494030490 1.822367731 1.3774580470 1.406195581 1.406195581 1.406195581 1.406195581 1.406195581 1.406195581 1.406195581 1.182036363 5.2299613742 5.2299613742 5.2591587246 2.4659417405 -1.0159946497 -1.015994678 -3.1500442668 -3.150044268478 -1.15894784	EL TABLERC 3 5678901234 RUSI BUS Computati -4.797447 dictiont Fou cient 5E-01 0. 4E+01 4. 5E-01 2. 5E-01 2. 5E+01 4. 5E-01 2. 5E+01 2. 5E+01 3. 5E+01 3. 5E+00 3. 5E+000	4 5678901234 2 A on using 2045898440 rier serie "Fractio coeffi 0000000000 3008588015 8950568109 8483106113 3724300255 505889553 505889553 5058895527300 0585917547 4188410712 2002452029 5058277400 5058740194 505782829 506668846 50668846 5	5 567890 332 E+01 s of f Sine Cient Sine Cient Sine Cient Sien0 2E+00 2E+00 2E+00 2E+00 2E+01 1E+00 6E-02 0E-01 3E+01 7E-01 9E+01 4E-01 9E-01	6 123456789012 equidistant -5.264002990 .ow. "Comple undamental" 9.330024 4.31311634 2.90078662 2.0603(120 4.9317505 5.79210749 7.24137461 4.59847550 5.79210749 7.24137461 4.59847550 5.79210749 7.24137461 4.59847550 5.79210749 7.24137461 4.59847550 5.79210749 7.24137461 4.59847550 5.79210749 7.24137461 4.59847550 5.79210749 7.24137461 4.59847550 5.79210749 7.24137461 4.59847550 5.79210749 7.24137461 4.59847550 5.79210749 7.24137461 4.59318742 7.2413741 1.25387503 4.01314512 1.533181452 2.763131665	7 345678901 points. 7226560E+ x amplit applies complex applies complex applies complex applies complex applies complex bitude 422:00 342:00 352:00 32:00 32:00 32:00 32:00 32:00 32:00 32:00 32:00 32:00 32:00 32:00 32:00 32:00 32:00 32:00 32:00 32:00 30:0	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 890 first .94930 is th 5 ampl Fract funda 0.002 0.000 0.013 0.001 0.001 0.001 0.002 0.000 0.008 0.0000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.000000 0.00000000	two point 381774902 e square ituda: ituda: ituda: itairs: ituda	s, followed 30E+01 root of the
C CORRIENT C 1 34567890 C 34567890 C HPIHMIT 1941.026.1 South of the South of th	E FASE "A" EN 2 12345678901234 VHMAX /+++ 543.1 FOurier series t two, are: 27636720E+01 Es of the resis squares of th the sine conf 0.3100249849 -3.2494030490 1.822367731 1.3774580470 1.822364731 1.3774580470 1.822364731 1.3774580470 1.822364534 -2.256054137 -2.218308305 9.5391597266 2.4608317405 -3.150946497 -4.1589594768 -1.1589594768 -1.5159594768	EL TABLERC 3 5678901234 BUSTA BUST computati -4.797447 iltant Fou e ficients. 0510 2 5501 0. 48:01 4. 5501 2. 88:00 1. 98:01 4. 98:01 4. 98:01 4. 98:01 2. 88:01 2. 88:01 2. 98:01 3. 98:01 3. 99:01 3. 90:01 3. 90:	4 5676901234 2075898440 rier serie "Fractio 00000000 3008588015 8950568109 8483106113 3072430025 508952700 84927200 4615615739 0585917547 438840712 505452750208 9859340194 5006788289 5006608846 915905374	5567890 332 E+01 s foll s foll	6 123456789012 equidistant -5.264002990 .ow. "Comple undamental" 9.33002496 4.31311534 2.90078662 2.00513400 5.79210749 7.24137431 4.50837450 5.79210749 7.24137431 4.50837451 3.69952033 4.01314512 2.76434166 5.99810027	7 345678901 points. 7226560E+ x amplit 3000	234567 The 01 -4 ude" to thi	8 890 first .94930 is the Fract funda 0.002 1.000 0.006 0.001 0.001 0.001 0.002 0.002 0.0000 0.00000 0.0000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.000000 0.000000 0.00000000	two point 381774902 e square itude. 100 of 163175 000000 725501 344479 16708	s, followed 30E+01 root of the
CORRIENT C 1456700 C HPIIMU 1941.026.1 Store HPIIMU 19	E FASE "A" EN 2 12345678901234 WHAX VHAX 543.1 Fourier series t two, are: 27636720E+01 LS of the ress squares of th the sine coorf 0.300249849 -3.2494030490 1.822367731 1.3774580470 1.822364584 -4.3266784584 -4.3266784584 -1.4061995831 0.52299613742 5.2299613742 5.2299613742 5.2299613742 5.3991587246 2.45988305 9.5391587246 2.4654448946 -3.1500442668 9.6729249844 4.9735467608	EL TABLERC 3 5678901234 RUS1 BUS computati -4.797447 ilclents. 05100 05100 161001 55010 55010 55010 55001 500000 500000 500000 500000 500000 500000 50000000 500000000	4 5678901234 2045898440 rier serie "Fractio coeffi 0000000000 000588015 8950568109 8483106113 3724300255 505889553 505889553 505889553 5058957300 5058917547 4388401754 5058410712 5572750208 5572750208 5572750208 5572750208 5572750208 5572750208 5572750208 5572750208 5572750208 5572750208 5572750208 5572750208 5572750208 557275028 5575028 557275028 55757508 55757508 557	5567890 332 E+01 = foll =	6 123456789012 equidistant -5,264002990 .ow. "Comple undamental" 9.33002498 4.31311634 2.90078662 2.0513400 4.39377505 2.0603(120 4.39377505 2.0603(120 4.39377505 2.0603(120 4.39377505 3.0906466 3.69952033 .90306646 3.69952033 .90306646 3.69952033 .90306646 3.69952033 .90306646 3.69952033 .90306646 .369952033 .90306646 .369952033 .90306646 .369952033 .90316646 .369952033 .90316646 .369952033 .903164591 .0051414512 .764341665 .99810027 .763414665 .99810027 .763414665 .99810027 .763414665 .99810027 .763414665 .79814095 .763414665 .79814095 .76341465 .76341465 .76341465 .76341465 .76341465 .76341465 .76341465 .76341465 .76341465 .76341465 .76341465 .7754145 .7754145 .7754145 .7754145 .7754145 .7754145 .7754145 .7754145 .7754145 .7754145 .7754145 .7754145 .7754145 .7754145 .7754145 .7754145 .7754145 .7754145 .77541	7 345678901 points. 7226560F+ x amplit 3226507+ 345400 955-01 3125:02 6425:00 9025:00 3455:01 3525:00 3525:00 3525:00 3525:00 195-01 205:01 20	The 01 -4 ude" to thi	8 8 9 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	two point 381774902 e square itude:	s, followed 30E+01 root of the
C CORRIENT C 14567890 C 34567890 C HPIHMI Segin the lag Segin the lag Source of the	E FASE "A" EN 2 12345678901234 WHMAX /++++ 543.1 FOurier series t two, are: 27636720E+01 LS of the resis squares of th the sine conf 0.300249849 -3.2494030490 1.6223667311 1.37459064731 1.37459064731 1.3745906497 -4.2266984984 -2.2485987266 2.409813742 -6.2556096479 -3.259613742 -6.2556096479 -3.3502421307 -7.2183988305 2.5391597266 2.409813740 -3.1500442668 -1.1589594768 9.6722249894 4.9735167500	EL TABLERC 3 5678901234 BUSTA BUST computati -4.797447 iltant Fou e ficients. 65001 0. 165001 0. 165000 0. 1650000 0. 165000000000000000000000000000000000000	4 5676901234 2075898440 rier serie "Fractio 00005858015 909858015 909858015 909858015 909859166113 3724100255 505889555 5058895553 5058895573 50585917547 4388410712 5052750200 9859340194 64735815739 5022274072 5022274072 502628402 502688400 50268840000000000000000000000000000000000	5567890 332 E+01 E= 01 0 of f Sinet Cient 02+00 22+00 22+00 22+00 22+00 33-01 62-01 32-01 62-01 32-01 92	6 123456789012 equidistant -5,264002990' .ow. "Comple undamental" 9,33002496 4,31311534 2,90078662' 2,30513400 4,39377505' 2,06016120 4,39377505' 2,06016120 4,39377505' 2,06016120 4,5984750 3,69952033 3,0906646 3,69952033 3,0906646 3,69952033 3,0906646 3,69952033 3,0906646 3,69952033 3,0906646 3,69952033 3,0906646 3,69952033 3,0906646 3,69952033 3,0906646 3,69952033 3,0906646 3,69952033 3,0906646 3,6995203 3,0006646 3,6995203 3,0006646 3,6995203 3,0006646 3,6995203 3,0006646 3,6995203 3,0006646 3,6995203 3,0006646 3,6995203 3,0006646 3,000664 5,000664 5,000664 5,000664 5,000664 5,000664 5,000664 5,00066666 5,00066666666666666666666666	7 345670901 points. 7226560E+ x amplits complex amplit 95E-01 95E-01 95E-01 95E-01 962E+00 962E+00 962E+00 962E+00 962E+00 962E+01 974E+000000000000000000000000000000000000	The 01 -4 ude" to thi	8 990 first .94930 15 th Fracta fracta 1.0000 0.0016 0.0015 0.0010 0.0010 0.0010 0.0010 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000 0.00000000	two point 381774902 e square itude. ion of mental 163175 163175 163075 163075 163075 1630423 429055 678919 091676 095479 091676 095479 091675 1769734 1930451 1355516 640915 1936651 574695 3742695 3745695 3745695 374265 374265 374265 374265 374265 374265 374265 374265 3745655 3745655 3745655 3745655 3745655 3745655 3745655 374565	s, followed 30E+01 root of the
C CORRIENT C 1 5 3456780 C HPIHMI C - + + + /// 1941.026.1 Scorfficient Harmonic number number 0 1 2 3 4 4 5 5 6 6 7 7 8 9 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	E FASE "A" EN 2 12345678901234 WHMAX //+++ 543.1 Fourier series t two, are: 27636720E+01 ts of the resis squares of th the sine corf C coeffi 9.300249849 -3.2494030490 1.822364731 1.3774580470 1.822364544 -1.4061995813 5.2299613742 5.2299613742 5.25940840 -4.3256744544 -1.406199581 1.380363635 5.2299613742 5.25944844 -1.406199581 1.158954764 9.559594649 -3.1500442666 -3.1500442666 9.6729249844 4.973546760 -2.4485594004	EL TABLERC 3 5678901234 BUSIRA BUSI BUSIRA BUSI COMPUTATI -4.797447 Itant Fou c ficients. 05100 5E-01 0. 4E+01 4. 9E+01 4. 9E+01 4. 9E+01 4. 9E+01 -3. 5E+00 -3. 5E+00 -3. 5E+01 -4. 5E+01 -4	1 4 5676901234 2 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	5567890 332 E+01 51ne cient 0E+00 2E+02 1E+00 2E+00 2E+00 2E+01 1E+00 2E+01 3E+01 3E+01 3E+01 3E+01 7E+01 3E+01 7E+01 5E+00 2E+01 3E+01 2E+02 1E+02 1E+02 1E+02 1E+02 1E+02 1E+01 2E+02 1E+02 1E+02 1E+01 2E+02 1E+0	6 123456789012 equidistant -5,264002990 ow. "Comple undamental" 9.33002498 4.31311634 2.90078662 2.30513400 4.39377505 2.0603(120 4.39377505 2.0603(120 4.39377505 3.09306461 3.093064591 1.25387903 3.09306646 3.69552033 3.09306646 3.69552033 2.764341665 5.99810027 2.764341665 5.99810027 2.764341665 5.99810027 3.89501813 3.89501813	7 345678901 points. 7226560E+ x amplit omplex applies complex	234567 The 101 -4 Ude" to thi	8 890 first .94930 is th Fract 1.000 0.005 0.010 0.001 0.001 0.001 0.002 0.0000 0.00000 0.0000 0.0000 0.000000 0.000000 0.00000 0.00000000	two point 381774902 e square itude. ion of mental 163175 000000 775501 3444708 1769734 638423 638423 648945 97372 904930 95479 904930 95479 904930 577372 930451 930451 90665 574695 574695 974665 972562 902064	s, followed 30E+01 root of the
C CORRIENT C 1 C 3456789 C 3456789 C 4.1141 E 4.1141 C 1941.026.1 Sum of the Sum o	E FASE "A" EN 2 12345678901234 WHMAX /++++ 543.1 FOurier series t two, are: 27636720E+01 Es of the resi squares of th the sine coeff 0.3300249849 -3.249849 -3.24984949 -3.24984949 -3.256784584 1.406195831 1.182036360 5.2299613742 -6.2556096479 -4.7040221307 -7.2183988305 5.2599613742 -6.2556096479 -3.1500442668 2.405914768 -3.1500442668 -1.1585594768 -2.2485594008 -1.5559702473 -3.3372060629	EL TABLERC 3 5678901234 BUSTA BUST computati -4.797447 ficients. 65E-01 4. 56E-01 5. 56E-01 5. 56E-0	1 4 5678901234 207898440 rier serie "Fractio 000588015 8950568109 8483106113 3724300255 505889559 505889559 505889559 505889527300 0585917547 438410712 502452029 0222274872 502542029 02522748209 50252740208 9859340194 43590608846 915905374 62526498515 506788289 5066788289 506608846 915905374 62526498515 506778289 50707314150 6252629301	5567890 332 E+01 51ne	6 123456789012 equidistant -5.264002990' .ow. "Compl- undamenta!" 9.33002498 4.31311634 2.90078662 2.30513400 .30513400 5.79210749 7.2413741 1.25387903 3.9036646 3.69552033 4.01314512 2.7485419 1.5338342 2.76434166 5.99810027 6.79184095 2.74856019 3.89501813 2.704326619 3.89501813 2.50432049	7 345670901 points. 7226560E+ x amplit 322560E+ x amplit 312E+02 0425+02 352E+02 352E+02 0425+02 352E+02 352E+02 94E+00 352E+01 352E+01 259E+01 259E+01 260E+01 275E+01 208E+01 2655E+00 208E+01 2675E+01	The -44 01 -44 ude" to thi	8 890 first .94930 is th 5 ampl 0.002 0.000 0.010 0.010 0.010 0.010 0.010 0.010 0.010 0.010 0.010 0.010 0.010 0.010 0.010 0.010 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.00000 0.000000	two point 381774902 e square itude. itude. itude. 1000000 000000 725501 34474 187008 769734 429055 678919 091676 095479 091676 095479 091675 678919 091651 577372 930451 355516 640915 930651 574695 372562 903064 580768	s, followed 30E+01 root of the
C CORRIENT C 1 C 3456700 C HPIHMIT S +-**/// 1941.026.1 C +-**/// 1941.026.1 C +-**/// 1941.026.1 C +-**/// S +- 5,56492.3 Coefficient by the lass Coefficient Number Numb	E FASE "A" EN 2 12345678901234 WHMAX //+++ 543.1 543.1 543.1 547636720E+01 557636720E+01 557636720E+01 577636720E+01 577636720E+01 577636720E+01 5776367731 1.3774500470 1.822367731 1.3774500470 1.822364731 1.3774500470 1.822364731 1.3774500470 5.2299613742 5.2299613742 5.2299613742 5.2299613742 5.2299613742 5.2299613742 5.2299613742 5.2299613742 5.2299613742 5.259450459400 9.5391587246 9.5722249594 4.731667608 7.218394768 9.5722249594 4.731667608 7.318594768 9.5722249594 4.573667608 7.318594768 9.5722249594 1.155594768 9.5722249594 4.573667608 7.318594768 9.5722249594 1.55594768 9.5722249594 1.55594768 9.5722249594 1.55594768 9.5722249594 1.55594768 9.5722249594 1.55594768 9.5722249594 1.55594768 9.5722249594 1.55594768 9.5722249594 1.55594768 9.5722249594 1.55594768 1.555947888 1.555947888 1.55594788 1.555947888 1.55594888 1.55594888	EL TABLERC 3 5678901234 BUSTA BUST computation 6 6 6 7 7 7 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	1 4 5676901234 2075898440 rier serie "Fractio coeffi 000000000 3008588015 955568109 8483106113 3724300255 568952730 48910712 2502452029 56952730 0585917547 408410712 2502452029 57750208 408410712 2502452029 57750208 5655274052 57750208 5655274052 57750208 576788386 505695374 6252498515 576788386 576788386 576788386 576788386 576788386 576788386 576788386 576788386 576788386 576788386 576788386 57750208 5777314150 4025908301 577514150 5777314150 577750	5567890 332 E+01 = foll =	6 123456789012 equidistant -5,264002990 .ow. "Comple undamental" 9.33002496 4.31311634 2.90078662 2.06036120 4.39377505 2.06036120 4.39377505 7.24137441 4.59817500 5.79210749 7.24137441 4.5981750 3.00306466 3.69552033 3.00306646 3.69552033 2.76341665 5.99910027 2.76341665 5.99910027 2.76456019 3.685601913 3.685601913 2.50492049	7 345678901 points. 7226560E+ x amplit omplex applies complex plitude 195E-01 912E+02 534E+00 932E+00 934E+00 195E-01 207E-01 198E-01 207E-01 198E-01 207E-01 198E-01 207E-01 107E-01 106E-00 208E-01 257E-01	234567 The 01 -4 Ude" to thi	8 6(90) first .94930 is th 5 ampl 7 content 0.002 0.002 0.000 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.001 0.000 0.000 0.000 0.000 0.00100000000	two point 381774902 e square itude. ion of mental 163175 000000 775501 344474 187008 769734 608423 031676 035479 031676 035479 031676 035479 031675 035479 031675 035479 031675 035479 031675 035479 031675 035479 031675 035479 031675 035479 031675 035479 031675 035479 031675 035479 031675 035479 035675 03575 035675 035755 03575 03575 035755 035755 035755 035755 035755 0	s, followed

153

22	6 828458222205-02	8 770843043305-02	1 111555202865-01	0 000757715
	0.020450775708-02	2 220405220552-02	1.111355362002-01	0.000237715
~ 3	-2.02/16/83851E-U2	-3.3%8482/39365+00	3.32858941889E+00	0.00/11/362
24	3.79102931525E-01	-5.36260312668E-01	6.56729895493E-01	0.001522634
25	-2.09853742375E+00	-3.21261816391E-01	2.12298574502E+00	0.004922162
26	-2.31319382033E-01	-3.03078102962E-01	3.81267613362E-01	0.000883972
27	-8,25537076841E-02	-2.94850424318E-01	3.06189299899E-01	0.000709903
28	1.51905357950E-01	-5.84102622152E-02	1.62748261146E-01	0.000377333
29	-6.14352476432E-01	-1.79149607739E+00	1.89390790711E+00	0.004391043
30	1.87805855083E-01	-5.46158319036E-01	5.77546490471E-01	0.001339047
Derived fr	om table: 1) RMS va	lue = 3.05598529E+02	2) THD = 6.34718708E+00	8

La corriente nominal, de componente fundamental, del banco de capacitores para el filtro de 5^a armónica se calculó del siguiente modo:

$$I_{cap5} = \frac{Q_5}{\sqrt{3}V_{11}} = \frac{261.343 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 480} = 314.3467 \text{ A}$$

y para el banco de capacitores del filtro de 7^a armónica, su corriente nominal de componente fundamental se obtuvo como:

$$l_{cap7} = \frac{Q_7}{\sqrt{3}V_{1.L}} = \frac{104.750 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 480} = 125.9946 \text{ A}$$

El análisis de espectro de la corriente en el filtro de 5^a armónica revela que la corriente que circula a través del filtro es mayor a la corriente nominal del banco de capacitores. Efectivamente el valor de la corriente en el filtro es de 346.69 A. Este valor de la corriente, por encima del valor normal se manifiesta en el aumento en la tensión en el banco de capacitores; el análisis de espectro de la tensión en el banco de capacitores que forma parte del filtro indicó que el voltaje tiene una magnitud de 282.87 V, mientras que los capacitores son para 277 V. Aunque la sobretensión no es de consideración, por ser apenas del 2.11%, ésto pone en evidencia que la sintonización de los filtros a la frecuencia exacta de la componente que se desea filtrar da origen a corrientes elevadas en el filtro, con la posibilidad de provocar sobretensiones que pudieran dañar a los componentes del filtro.

```
ç
  VOLTAJE VAN EN EL BANCO DE CAPACITORES DEL FILTRO DE 5A ARMONICA
c
С
                     2
                                ٦
  345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
c
    HPTHMINHMAY
c
                           BUS 1
                                  BUS2
   - • • • / / / / • • • •
                           -----
 1841.026.543.1
                          F5A
Begin the Fourier series computation using 332
                                                        equidistant points.
                                                                                 The first two points,
                                                                                                           followed
by the last two,
                   are :
-1.6262510601152340E+02 -1.5750639343261720E+02 -1.8049343872070310E+02 -1.7492848205566400E+02
Coefficients of the resultant Fourier series follow. "Complex amplitude" is the square root of
                                                                                     is the square root of the
sum of the squares of the
cosine and the sine coefficients.
                                        "Fraction of fundamental"
                                                                      applies to this amplitude.
 Harmonic
                         Cosine
                                                  Sine
                                                                     Complex
                                                                                       Fraction of
   number
                   coefficient
                                          coefficient
                                                                   amplitude
                                                                                       fundamental
                                    0.0000000000E+00
        0
             6.52869099235E-01
                                                          6.52869099235E-01
                                                                                       0.001637702
            -1.96309882919E+02
                                    3.46963878600E+02
                                                          3.98649599504E+02
                                                                                       1.000000000
         1
         2
            -8.35190310077E-01
                                    1.88427005376E+00
                                                          2.06107168472E+00
                                                                                       0.005170134
                                    1,19769881210E+00
                                                          1.37382863337E+00
                                                                                       0.003446206
         ٦
            -6.72995296701E-01
                                    5.68334639101E-01
         4
            -1.32684737865E+00
                                                          1.44344318496E+00
                                                                                       0.003620832
         5
             3.10194530069E+01
                                   -1.16864676075E+01
                                                          3.31478504581E+01
                                                                                       0.083150342
         6
             1.26126224936E+00
                                    2.7B467434184E-01
                                                          1.29163716792E+00
                                                                                       0.003240031
         .,
             6.85977421523E-01
                                   -5.76031003381E-01
                                                          8.95754843524E-01
                                                                                       0.002246973
         н
             8.69771274792E-02
                                    2.53730966863E-01
                                                          2.68224578012E-01
                                                                                       0.000672833
         ā
             8.48710494251E-02
                                    2.35517748667E-01
                                                          2.503431743986-01
                                                                                       0.000627978
        10
             8,94864380425E-02
                                    2.36142236165E-01
                                                          2.52529163255E-01
                                                                                       0.000633461
        11
            -4.32845062847E-01
                                    2.74782015805E-02
                                                          4.33716381974E-01
                                                                                       0.001087964
             4.30340577459E-02
                                    1.60624936228E-01
                                                          1.66289808059E-01
                                                                                       0.000417133
```

	(())(())))))))))))))))			1 5606-00-00-00	0.000303740
13	-6.5134/22/5256-	1.428027	911285-01	1.569642476846-01	0.000393740
14	3.062528631082-	02 1.461095	4B694E-01	1.49284655545E-01	0.000374476
15	3.44354759527E-	·02 1.388743	916726-01	1.43080042866E-01	0.000358912
16	4.15330796799E-	02 1.355267	29285E-01	1.41747984319E-01	0.000355570
17	-8.60725359066E-	02 7.515254	04362E-02	1.14264542932E-01	0.000286629
18	2.625457293075-	02 1 056747	471678-01	1.088873490756-01	0 000273140
10	-2 611713236068-	07 1 490766	907208-01	1.400300000705-01	0.000373814
1.9	-3.033373236962-	1.489766	897306-01	1.450209900798-01	0.000373814
20	2.33492344977E-	02 1.071265	56388E-01	1.096416245566-01	0.0002/5033
21	2.46836704330E-	02 1.002055	51400E-01	1.03200950177E-01	0.000258876
22	2.97814123862E-	02 9.519660	26904E-02	9.97463066359E-02	0.000250210
23	-1.86225999778E-	02 8.126291	19031E-02	8.33694313337E-02	0.000209130
24	2.142725080256-	02 8.071229	63070E-02	8.35080945304E-02	0.000209477
25	1 404544214718-	02 1 137444	764285-01	1 14608378241E-01	0 000287492
26	2 120420102228-	02 0 750443	630018-01	9 610016749168-02	0.000216228
20	2.138470182228-	02 0.330442	670012-02	8.019913748106-02	0.000210220
27	5.109318181106-	02 7.839508	988258-02	8.134115965986-02	0.000204042
28	2.513412432716-	02 7.355540	25151E-02	7.77310841611E-02	0.000194986
29	4.20702423484E-	03 7.426825	62162E-02	7.43873170258E-02	0.000186598
30	1.975242156016-	02 6.635886	06441E-02	6.92362372134E-02	0.000173677
Derived fr	om table: 1) PMS	value # 2.82	871406E+02	21 THD = 8.35778859	F+00 1
perived in	Sur cable: 17 KAS	varue = 2.02	0/14000.002	2) IND = 0,007/0000	55,00 \$
с					
C VOLTAJE \	JAN EN EL REACTOR	DEL FILTRO D	E 5A ARMON	ICA	
c					
c ı	2	3 4	د	6 7	A
G 346 (3000)	2246 4 200 0 22 46 43	0001334667000	1004667000	1 2 2 4 5 6 7 0 0 0 1 2 2 4 5 6 7 0 0 0 1 2	45 67000
C 3456/8901	12345678901234567	8901234567890	123420/890	123436/890123436/89012.	34367890
C HEIHWID	HMAX BU	SI BUS2			
C +-***////	/++++	*****			
1841.026.5	543.1 BUS	1A F5A			
Begin the l	Fourier series co	moutation usi	na 332	equidistant points.	The first two points. followed
by the last	tun are -			squeense peried.	
by the fast	two, are .	343301 600030			1 012011202222220202.01
-1.76426944	1/32666006+01 -1	. /433816909/9	00406+01	-3.21329832077026406-0.	-1.81/811393/3//930E+01
Coefficient	is of the result	ant Fourier s	eries foll	low. "Complex amplitue	de" is the square root of the
sum of the	squares of the				
cosine and	the sine coeffic	ients. "Fra	ction of f	undamental" applies to	o this amplitude.
Ubrmonic data	Coni	De III	Sine	Complex	Fraction of
Marmonic	0.031		- f f / signs		fundamentel
number	coefficie	nt co	efficient	amplitude	fundamental
0	3.84133795546E-	02 0.000000	00000E+00	3.84133795546E-02	0.002362050
1	1.02820939314E+	01 -1.259979	73337E+01	1.62627288136E+01	1.00000000
2	2.39773020572E-	01 -1.160876	04424E-01	2.66397134547E-01	0.016380839
3	3 524084367336-	01 -1 562156	272458-01	3 85480256921E-01	0 023703295
,	5.524004307336	-1.502150	2724JE-01	0.00002009216-01	0.010/00200
4	9.618042957546-	01 2.180142	952896-02	9.620513529226-01	0.059156822
5	~3.15902487914E+	01 1.120974	77263E+01	3.35201769504E+01	2.061165585
6	-1.71567689266E+	00 7.573186	59036E-02	1.71734752322E+00	0.105600207
7	-1.26713132424E+	00 1.728544	31503E+00	2.14324222660E+00	0.131788598
8	-8 07989671077F-	02 4 656844	89550E-02	9 325820888135-02	0.005734475
ä	-1 190491010005-	01 1 042721	001045-02	1 205241255275-01	0.007411065
.,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,,	-1.109401010906-	01 1.942721	007946-02	1.203241333276-01	0.007411005
10		11 - 7 721785	321461-02	2 1111111111111111111111111111111111111	
	-1.85561622888E-			2.003000471212 01	0.012330/41
11	-1.85561622888E- 2.30780335987E+	00 8.719799	425616-01	2.46704385207E+00	0,151699255
11	-1.85561622888E- 2.30780335987E+ -3.98769041431E-	00 8.719799 02 1.210739	67701E-01	2.46704385207E+00 1.27471852339E-01	0.151699255 0.007838282
11 12 13	-1.85561622888E- 2.30780335987E+ -3.98769041431E- 6.81358797628E-	00 8.719799 02 1,210739 01 1.774510	42561E-01 67701E-01 72024E-01	2.46704385207E+00 1.27471852339E-01 7.04087135280E-01	0.151699255 0.007838282 0.043294526
11 12 13	-1.85561622888E- 2.30780335987E+ -3.98769041431E- 6.81358797628E- 1.27989474104E-	00 8.719799 02 1,210739 01 1.774510 02 7.352497	42561E-01 67701E-01 72024E-01 30638E-02	2.46704385207E+00 1.27471852339E-01 7.04087135280E-01 7.46306553559E-02	0.012330741 0.151699255 0.007838282 0.043294526 0.04589061
11 12 13 14	-1.85561622888E- 2.30780335987E+ -3.98769041431E- 6.81358797628E- 1.27989474104E- -3.36032127802E-	00 8.719799 02 1.210739 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433890	42561E-01 67701E-01 72024E-01 30638E-02 84281E-02	2.46704385207E+00 1.27471852339E-01 7.04087135280E-01 7.46306553559E-02	0.012306741 0.151699255 0.007838282 0.043294526 0.0043294526 0.004589061 0.00328596
11 12 13 14 15	-1.85561622888E- 2.30780335987E+ -3.98769041431E- 6.81358797628E- 1.27989474104E- -3.36032127802E-	00 8,719799 02 1,210739 01 1,774510 02 7,352497 02 5,433890	42561E-01 67701E-01 72024E-01 30638E-02 84281E-02	2.46704385207E+00 1.27471852339E-01 7.04087135280E-01 7.46306553559E-02 6.38896930522E-02	0.012330741 0.151699255 0.007838282 0.043294526 0.004589061 0.003928596
11 12 13 14 15 16	-1.85561622888E- 2.30780335987E 6.81358797628E- 1.27989474104E- -3.36032127802E- -1.24780170892E-	00 8.719799 02 1.210739 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433890 01 1.279581	42561E-01 67701E-01 72024E-01 30638E-02 84281E-02 91263E-04	2.46704382207E+00 1.27471852339E-01 7.04087135280E-01 7.46306553559E-02 6.3889693052E-02 1.24780236500E-01	0.0123041 0.151699255 0.007838282 0.043294526 0.004589061 0.003928596 0.003928596
11 12 13 14 15 16 17	-1.85561622888E- 2.30780335987E -3.98769041431E- 6.81358797628E- 1.27989474104E- -3.36032127802E- 1.24780170892E- 1.35333270649E*	00 8.719799 02 1.210739 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433890 01 1.279581 00 6.341313	42561E-01 67701E-01 72024E-01 30638E-02 84281E-02 91263E-04 79197E-01	2.46704385207E00 1.27471852339E01 7.04087135280E01 7.46306553559E02 6.38896930522E02 1.24760236500E01 1.49453404797E00	0.01230741 0.151699255 0.007838282 0.043294526 0.004589061 0.003928596 0.007672774 0.09389596
11 12 13 14 15 16 17 18	-1.85561622888E- 2.30780335987E+ -3.98769041431E- 6.81358797628E- 1.27989474104E- -3.36032127802E- -1.24780170892E- 1.3533270649E+ 1.84177352015E-	8.719799 02 1,210739 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433890 01 1.279581 00 6.341313 02 1.956419	42561E-01 67701E-01 72024E-01 30638E-02 91263E-02 91263E-04 79197E-01 98749E-01	2.46704385207E.00 1.27471852339E-01 7.04087135280E-01 7.46306553559E-02 6.38896930522E-02 1.24780236500E-01 1.49453404797E+00 1.96567009148E-01	0.0123041 0.151699255 0.007838282 0.043294526 0.004589061 0.003928596 0.007672774 0.091899340 0.012083274
11 12 13 14 15 16 17 18 19	-1.85561622888E -3.98769041431E 6.81358797628E -3.369374104E -3.36032127802E -1.24780170892E -1.3533270649E 4.60723346530E	00 8.719799 02 1.210739 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433890 01 1.279581 00 6.341313 02 1.956419 01 -5.176774	42561E-01 67701E-01 72024E-01 30638E-02 84281E-02 91263E-04 79197E-01 98749E-01 43007E-01	2.467033652775-00 1.27471852339E-01 7.46306553559E-02 6.38096930522E-02 1.24780236500E-01 1.49453304797E+00 1.96507009148E-01 6.93005005058E-01	0.01203041 0.151699255 0.007838282 0.043294526 0.004589061 0.003928596 0.007672774 0.091899340 0.012083274 0.012083274
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	-1.85561622888E -3.0780335997E -3.98769041431E -6.81358797628E -1.27989474104E -3.36032127802E -1.24780170892E -1.35333270649E -1.81177352015E -4.60723346530E -5.07285784764E	00 8.719799 02 1.210739 01 1.774510 02 5.433890 01 1.279581 00 6.341313 02 1.956419 01 -5.176774 02 1.618159	42561E-01 67701E-01 72024E-01 30638E-02 84281E-02 91263E-04 79197E-01 98749E-01 43007E-01 68039E-02	2.457043852075+00 1.27471852339E-01 7.40107135280E-01 7.46306533559E-02 6.38096930522E-02 1.24780236500E-01 1.49453404797E+00 6.9300500508E-01 6.9300500508E-01 5.34377471766E-02	0.05150075 0.15150075 0.00132582 0.001294526 0.001580061 0.001928596 0.001672774 0.091899340 0.012083274 0.042613083 0.042613083
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	-1.855616224888 -2.30780335987 -3.98769041431 -6.813587976248 -1.27989474104 -3.360321278028 -1.247801708928 -1.35332706498 -1.841773520155 -4.607733465305 -5.092857847648 -3.16649738 -1.604733	00 8.719799 02 1.210739 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433890 01 1.279581 02 5.433890 01 1.279581 02 5.433890 03 1.956419 04 -5.176774 02 1.618159 05 470132	42561E-01 67701E-01 72024E-01 30638E-02 84281E-02 91263E-02 91765-01 98749E-01 43007E-01 68039E-02	2.467043852075+00 1.27471852339E-01 7.46306553559E-02 6.3889630522E-02 1.24780236500E-01 1.4945304797E+00 1.65507009148E-01 6.930050558E-01 5.34374791766E-02 5.3573041204E-02	0.0123041 0.151699255 0.007838282 0.043294526 0.004589061 0.003928596 0.007672774 0.091899340 0.012083274 0.012083274 0.042613083 0.003285886 0.003285886
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21	-1.85561622888E- 2.30780335967E- 3.98769041431E- 6.81358979628E- 1.27989474104E- 3.36032127802E- 1.24780170892E- 1.35333270649E+ 1.84177352015E- 4.60723346530E- 5.09285784764E- 2.21042694773E-	8 719799 00 8 719799 01 1.210739 1.210739 01 1.774510 02 7 352497 02 02 7.352497 02 01 1.279581 01 02 1.956419 01 01 1.279581 02 02 1.956419 01 01 -5.176774 02 02 4.770132 02 02 4.770132 02	42561E-01 72024E-01 30638E-02 84281E-02 91263E-04 79197E-01 98749E-01 98749E-01 68039E-02 79135E-02 79135E-02	$\begin{array}{c} 2, 457043852075+00\\ 1, 274718523398-01\\ 7, 040871352808-01\\ 7, 45105535595-02\\ 6, 38896305228-02\\ 1, 247802365008-01\\ 1, 245302365008-01\\ 1, 94530049782+00\\ 1, 94530049782+00\\ 1, 945300505882-01\\ 5, 3437479174662-02\\ 5, 2573704304782-02\\ 5, 2573704304782-02\\ \end{array}$	0.01230745 0.12130745 0.007830282 0.001294526 0.0013294526 0.0013294526 0.0013294526 0.0013294526 0.001672774 0.001672774 0.012083274 0.012083274 0.01268886 0.0022537865 0.0022537865
11 12 13 14 15 16 17 18 20 21 22	$\begin{array}{c} -1.855616224888r\\ -3.907630359075r\\ -3.9087650414318r\\ -6.81356797628r\\ -1.279994741048r\\ -3.360321278028r\\ -1.247801708928r\\ -1.247801708928r\\ -1.35332706498r\\ -1.841773520158r\\ -4.607233465308r\\ -5.092857847648r\\ -2.10426947788r\\ -8.723778523178\end{array}$	a. 719799 00 8. 719799 01 1. 210739 01 1. 774510 02 7. 352497 02 5. 433890 01 1. 279581 00 6. 341313 02 1. 956419 01 -5. 176774 02 1. 618159 02 4. 590016	42561E-01 72024E-01 30638E-02 91263E-02 91263E-04 79197E-01 43007E-01 43007E-01 68039E-02 70935E-02	$\begin{array}{c} 2, 46704385207E+00\\ 1, 27471852339E+01\\ 7, 04087135280E+01\\ 7, 46306535559E+02\\ 6, 30896930522E+02\\ 1, 24780236500E+01\\ 1, 49453404797E+00\\ 1, 96507009148E-01\\ 6, 9300500508E+01\\ 5, 34374791766E+02\\ 5, 25733043047E+02\\ 1, 03616494618E+01\\ \end{array}$	0.01233041 0.151699255 0.007838282 0.043294526 0.004589061 0.003928596 0.007672774 0.091899340 0.012083274 0.042613083 0.003285886 0.003232785 0.006371405
11 12 13 14 15 16 17 18 20 21 22 23	$\begin{array}{c} -1.855616224888r\\ -2.070803359075r\\ -3.9087650414318r\\ -6.81350797628r\\ -1.279894741048r\\ -3.360321279028r\\ -1.247801708928r\\ -1.247801708928r\\ -1.353332706498r\\ -1.841773520158r\\ -4.607233465308r\\ -5.092857847648r\\ -5.210426947738r\\ -8.723778523178r\\ -9.596612473086r\\ -9.596612473086r\\ -9.596612473086r\\ -9.59661247308r\\ -9.59661247808r\\ -9.5966128788r\\ -9.5966128788r\\ -9.59661288r\\ -9.596788r\\ -9.59878r\\ -9.5988r\\ -9.5888r\\ -9.5888r\\ -9.5888r\\ -9.5888r\\ -9.5888r\\ $	00 8.719799 02 1.210739 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433890 01 1.279581 00 6.341913 01 5.56419 01 5.176774 02 4.770132 02 5.591016 01 2.788899	42561E-01 72024E-01 30638E-02 84281E-02 91263E-04 79197E-01 98749E-01 43007E-01 68039E-02 79135E-02 79135E-02 06319E-01	2.457043852075.00 1.27471852339E-01 7.04087135280E-01 7.46306553559E-02 6.38896930522E-02 1.24780236500E-01 1.49453404797E+00 1.65507009148E-01 5.34374791766E-02 5.257370430476E-02 1.03616494618E-01 9.99364443228E-01	0.01230741 0.151699252 0.007838282 0.043294526 0.004589061 0.003928596 0.007672774 0.051899340 0.012083274 0.042613083 0.003285886 0.003232785 0.006371409 0.066371409
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24	$\begin{array}{c} -1.855616224888r-\\ -2.0780335967z+\\ -3.987500414318r-\\ -6.81368797528r-\\ -1.279894741048r-\\ -3.3603212218028r-\\ -1.247801708928r-\\ -1.353332706498r+\\ -1.841773520152r-\\ -4.607233465308r-\\ -5.092857847648r-\\ -2.10426947738r-\\ -9.5946612478068r-\\ -7.5511440078058r-\\ -7.55114407808r-\\ -7.55114407808r-\\ -7.55114407808r-\\ -7.5511488r-\\ -7.55188r-\\ -7.5511488r-\\ -7.551$	0 8.75976 02 1.210739 01 1.774510 02 7.352497 01 1.774510 02 7.352497 01 1.279501 01 1.279501 01 1.279501 01 1.279501 01 1.76774 02 1.618159 02 2.591016 01 2.788090 02 2.414016	42561E-01 72024E-01 30638E-02 91263E-02 91263E-04 9197E-01 43007E-01 68039E-02 79135E-02 70970E-02 06319E-01 28456E-01	$\begin{array}{c} 2,457043852075+00\\ 1,274718523398-01\\ 7,040871352808-01\\ 7,461065535598-02\\ 6,380965305528-02\\ 6,380965305528-02\\ 1,247802365008-01\\ 1,494534047978+00\\ 1,965370091488-01\\ 6,93005005088-01\\ 5,343747917666-02\\ 5,357390430478-02\\ 1,03614946188-01\\ 9,993644432288-01\\ 2,277005284378-01\\ \end{array}$	C .051309235 C .151309235 C .007832282 C .003589061 C .003589061 C .007672774 C .091899340 C .012083274 C .042613083 C .003285886 C .003228586 C .006371409 C .061451215 C .014001373
11 12 13 14 15 16 17 18 20 21 20 21 22 23 24 25	-1.855616224888 -1.07003359075 -3.9087650414318 -6.81356797628 -1.279894741048 -3.360321274028 -1.247801708928 -1.353332706498 -1.41773520158 -4.607733465307 -5.092857847648 -2.210426947738 -8.723778523178 -9.596612478068 -7.551144007408 -2.756713915478	0 8.710739 01 1.714510 02 7.352497 01 1.774510 02 7.352497 03 1.279581 01 1.279581 01 1.279581 02 1.956419 03 1.956419 04 1.76774 02 1.618159 03 1.67849 04 2.591016 05 2.591016 06 2.788899 02 2.141016	42561E-01 72024E-01 30638E-02 84281E-02 91263E-04 9197E-01 98749E-01 43007E-01 68039E-02 79135E-02 79176E-02 26456E-01 28456E-01	2 4 670 38 52075.00 1 2747 1852339E-01 7 4 630 6553558E-02 6 3889630522E-02 1 24780236500E-01 1 4 945304797E+00 1 69507009148E-01 6 300505058E-01 5 34374791766E-02 5 257730430478E-02 1 03616494618E-01 9 -9364443228E-01 2 77700528437E-01	0.01233041 0.151369225 0.007838282 0.043294526 0.04589061 0.03928596 0.007672774 0.031899340 0.012083274 0.042613083 0.003285886 0.003285886 0.003232785 0.006371409 0.061451215 0.014001373 0.047812286
11 12 13 14 15 16 18 20 22 23 23 25 24 25	$\begin{array}{c} -1.855616228088r\\ -2.057003359075r\\ -3.90876590414318r\\ -6.81350797628r\\ -1.279894741048r\\ -3.360321270024r\\ -1.247001700922r\\ -1.247001700922r\\ -1.35332706495r\\ -1.85237270649r\\ -2.21026947738r\\ -8.72377823178r\\ -8.72377823178r\\ -8.72377823178r\\ -5.5511200788r\\ -7.85671391577r\\ -7.85651145317r\\ -7.85671145217r\\ -7.85651145317r\\ -7.85671145217r\\ -7.857817r\\ -7.857817$	00 8.719759 02 1.210739 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433800 01 1.279581 00 6.341313 01 5.479581 02 6.356419 03 -5.176774 04 -6.18159 02 4.770132 02 5.91016 01 -7.88809 02 2.141016 01 -7.270502 02 2.29169	42561E-01 72024E-01 72024E-01 84281E-02 91263E-04 79197E-01 98749E-01 98749E-01 98749E-01 68039E-02 79135E-02 79135E-02 70970E-02 06319E-01 69172E-01 69172E-01	2.457043852075-00 1.27471852339E-01 7.04087135280E-01 7.4506553559E-02 6.38896930522E-02 1.24780235500E-01 1.40453404797E+00 1.96507009148E-01 6.93005005058E-01 5.34374791766E-02 5.25739043047E-02 5.25739043047E-02 7.755823574E-01 7.755823574E-01 7.755823574E-02	0.01230745 0.15130745 0.007930252 0.007930252 0.00328596 0.00328596 0.003928596 0.003928596 0.003928596 0.00312083274 0.012083274 0.042613063 0.003285866 0.003238586 0.00323785 0.006371409 0.061451215 0.014001373 0.047812286 0.005128649
11 12 13 14 15 16 17 17 20 21 20 21 22 23 24 25 26 25 26	$\begin{array}{c} -1.855616224888r-\\ -2.07003359075r-\\ -3.9087650414318r-\\ -6.81350797628r-\\ -1.279894741048r-\\ -3.360321278028r-\\ -1.247801708928r-\\ -1.247801708928r-\\ -1.353332706498r-\\ -2.310432706498r-\\ -2.310432706498r-\\ -2.31042877847648r-\\ -2.31042877847648r-\\ -2.31042877847648r-\\ -2.3178523178r-\\ -9.596612478068r-\\ -7.551144007808r-\\ -7.551144007808r-\\ -7.5513915478r-\\ -7.809655134538r-\\ -7.80965514538r-\\ -7.80965514558r-\\ -7.80965514558r-\\ -7.80965514655188r-\\ -7.80965514558r-\\ -7.80965514558r-\\ -7.80965514558r-\\ -7.80965514558r-\\ -7.80965514558r-\\ -7.80965514588r-\\ -7.8096551488r-\\ -7.809658r-\\ -7.8096588r-\\ -7.8096588r-\\ -7.8098r-\\ -7.808r-\\ -7.808r-\\ -7.808r-\\ -7.808r-\\ -7.808r-\\ -7.808r-\\ -$	0 8.719758 01 8.719758 01 1.774510 01 1.774510 02 7.352497 02 7.352497 02 5.431890 01 1.279581 01 1.279581 02 1.956419 03 1.956419 04 1.76774 02 1.618159 04 2.70412 05 5.591016 01 2.188899 02 2.141016 03 2.270502 04 -7.270502 05 -2.929169 05 -2.42484	42561E-01 72024E-01 72024E-01 84281E-02 91263E-04 91263E-04 913765E-01 98749E-01 43007E-01 68039E-02 79135E-02 06319E-01 28456E-01 28476E-01 027/08E-02	$\begin{array}{c} 2,46704385207E+00\\ 1,27471852339E+01\\ 7,04087135280E+01\\ 7,46306553559E+02\\ 6,3896930522E+02\\ 1,24780236500E+01\\ 1,49453404797E+00\\ 1,46507009148E+01\\ 6,9300500508E+01\\ 5,34374791766E+02\\ 5,257370430478E+02\\ 1,0364443228E+01\\ 9,9364443228E+01\\ 2,27706224437E+01\\ 7,34597039504E+02\\ 7,3577403430E+02\\ 7,3577403430E+02\\ \end{array}$	0.01230741 0.151699255 0.007830292 0.043294526 0.004589061 0.03928596 0.007672774 0.031899340 0.012083274 0.042613083 0.003285886 0.003232785 0.006371409 0.061451215 0.014001373 0.047812286 0.005128849 0.005128849
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 26 27	$\begin{array}{r} -1.855616224888r\\ -2.007003359075r\\ -3.90876500414318r\\ -6.813587976218r\\ -1.279894741048r\\ -3.3603212740028r\\ -1.247801708928r\\ -1.247801708928r\\ -1.353332706498r\\ -1.841773520158r\\ -4.607233465308r\\ -5.092857847648r\\ -2.210426947738r\\ -8.723778523178r\\ -9.596612473068r\\ -7.5511440074028r\\ -7.55113915478r\\ -7.809655134538r\\ -6.7197165518453r\\ -6.7197165518453r\\ -7.5671405518453r\\ -7.809655134538r\\ -7.8096551348r\\ -7.809655134538r\\ -7.809655134538r\\ -7.809655134538r\\ -7.809655134538r\\ -7.809655134538r\\ -7.809655134538r\\ -7.809655134538r\\ -7.809655134578r\\ -7.809655134578r\\ -7.809655134578r\\ -7.809655134578r\\ -7.8096551848r\\ -7.80965588r\\ -7.80965588r\\ -7.8095588r\\ -7.8095588r\\ -7.8095588r\\ -7.8095588r\\ -7.809588r\\ -7.80988r\\ -7.80988r\\ -7.80988r\\ -7.80988r\\ -7.80988r\\ -7.80988r\\ -7.80988r\\ -7.80988r\\ -7.8088r\\ -7.80988r\\ -7.8088r\\ -7.8088r\\ -7.8088r\\ -7.808$	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	42561E-01 72024E-01 72024E-01 91263E-02 91263E-04 91263E-04 91362E-01 98749E-01 98749E-01 98749E-01 68039E-02 70970E-02 06319E-01 69172E-01 69172E-01 28456E-01 69172E-02 26499E-02	$\begin{array}{c} 2, 457043852075+00\\ 1, 274718523398-01\\ 7, 040871352808-01\\ 7, 451065535595-02\\ 6, 38896305228-02\\ 1, 247802365008-01\\ 1, 94503063975+00\\ 1, 94503063975+00\\ 1, 94507091488-01\\ 1, 9450305095488-01\\ 5, 343779517566-02\\ 5, 2573904304768-02\\ 1, 036164946188-01\\ 2, 277005244378-01\\ 2, 277005244378-01\\ 2, 277005244378-01\\ 8, 340907895048-02\\ 7, 2557740434368-02\\ 2, 2725774034368-02\\ 2, 2725774034368-02\\ 2, 25774034368-02\\ 2, 25774034368-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 25774058-02\\ 3, 257768-02\\ 3, 257768-02\\ 3, 257768-02\\ 3, 257768-02\\ 3, 257768-02\\ 3, 257768-02\\ 3, 257768-02\\ 3, 257768-02\\ 3, 257768-02\\ 3, 257768-02\\ 3, 257768-02\\ 3, 257768-02\\ 3, 257768-02\\ 3, 257768-02\\ 3, 257768-02\\ 3, 257768-02\\ 3, 25786-02\\ 3, 25786-02\\ 3, 25786-02\\ 3, 25786-02\\ 3, 2578$	0.014330441 0.114330441 0.007830282 0.007830282 0.00132945261 0.0014580061 0.003928594 0.001829374 0.012083274 0.012083274 0.0012083274 0.003285886 0.003232785 0.006371405 0.006371405 0.006371405 0.006371405 0.004351286 0.00512885 0.0051285 0.0051285 0
11 12 13 14 15 16 17 18 20 21 22 23 24 25 26 27 28	$\begin{array}{r} -1.855616224888r\\ -3.967650414318r\\ -6.81356797628r\\ -1.279894741048r\\ -3.360321274028r\\ -1.247801708928r\\ -1.247801708928r\\ -1.35332706498r\\ -1.841773520158r\\ -3.902857847648r\\ -2.210426947738r\\ -2.210426947738r\\ -2.594612478068r\\ -7.551440078068r\\ -7.551440078058r\\ -7.551440078058r\\ -7.8517855134538r\\ -7.85174655134538r\\ -6.7197165513488r\\ -4.902965134538r\\ -3.998661245888r\\ -4.902964658584r\\ -3.998665314538r\\ -3.998665314538r\\ -3.998665314538r\\ -3.998665314538r\\ -3.998665314538r\\ -3.9986653848r\\ -3.998665314538r\\ -3.998665314538r\\ -3.998665314538r\\ -3.999665314538r\\ -3.99966538r\\ -3.999666388r\\ -3.99966766688r\\ -3.99966766688r\\ -3.99966766688r\\ -3.99966766688r\\ -3.99966766688r\\ -3.99966766688r\\ -3.999667688r\\ -3.99967688r\\ -3.9996788r\\ -3.9996788r\\ -3.9996788r\\ -3.9996788r\\ -3.999788r\\ -3.9996788r\\ -3.999788r\\ -3.99988r\\ -3.99988r\\ -3.99988r\\ -3.99988r\\ -3.99988r\\ -3.9988r\\ -$	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	42561E-01 72024E-01 72024E-01 84281E-02 84281E-02 84281E-02 90749E-01 43007E-01 68039E-02 70970E-02 70970E-02 70970E-02 70970E-02 28456E-01 027748E-02 26499E-02 26499E-02	$\begin{array}{c} 2,457043852075+00\\ 1,274718523398-01\\ 7,040871352808-01\\ 7,640871352808-01\\ 7,6408735535598-02\\ 6,380969305228-02\\ 1,247802365008-01\\ 1,94534047978+00\\ 1,965070091488-01\\ 6,93005005088-01\\ 5,343747917668-02\\ 5,357390430478-02\\ 1,03614946188-01\\ 9,993644432288-01\\ 7,75582357748-01\\ 7,75582357748-01\\ 8,340970895048-02\\ 7,257774034308-02\\ 1,03544371298-01\\ 1,0354437198-01\\ 1,0354437198-01\\ 1,0354437198-01\\ 1,0354437198-01\\ 1,0354437198-01\\ 1,0354437198-01\\ 1,0354437198-01\\ 1,0354437198-01\\ 1,0354437198-01\\ 1,0354437198-01\\ 1,0354437198-01\\ 1,0354437198-01\\ 1,0354437198-01\\ 1,035488-00\\ 1,035488-00\\ 1,035688-00\\ 1,035688-00\\ 1,03588-00\\ 1,03588-00\\ 1,03588-00\\ 1,03588-00\\ 1,03588-00\\ 1,03588-00\\ 1,03588-00\\ 1,03588-00\\ 1,03588-00\\ 1,03588-00\\ 1,03588-00\\ 1,03588-00\\ 1,03588-00\\ 1,03588-00\\ $	C 1051280235 C 1051280235 C 007832282 C 003928526 C 003928596 C 007672774 C 007672774 C 007672774 C 042613083 C 003228586 C 003228586 C 003232785 C 006371409 C 061451215 C 014001373 C 047812286 C 005128849 C 004462827 C 004462827 C 004462827 C 004462827
11 12 13 14 15 16 17 10 20 21 23 24 25 26 27 28 27 28 29	$\begin{array}{r} -1.855616224888r\\ -2.07003359075r\\ -3.9087650414318r\\ -6.81350797628r\\ -1.279894741048r\\ -3.360321279028r\\ -1.247801708928r\\ -1.353332706498r\\ -1.841773520158r\\ -4.607233465308r\\ -5.092857847648r\\ -2.210426947738r\\ -8.723778523178r\\ -9.596612473068r\\ -7.551144007408r\\ -7.551144007408r\\ -7.5513915478r\\ -7.609655134538r\\ -4.9096458548r\\ -4.90996458548r\\ -4.9096458548r\\ -4.90996458548r\\ -4.909964585386r\\ -4.909964588r\\ -4.909964588r\\ -4.909645888r\\ -4.909688r\\ -4.90988r\\ -4.9088r\\ $	0 8.710739 01 1.774510 02 7.352497 02 7.352497 02 5.433800 1.279501 1.279501 00 6.341313 01 1.95617 02 5.4717674 02 1.618159 02 2.591016 01 2.78889 02 2.141016 03 -7.970502 04 -7.270502 05 9.116744 06 -7.42388 07 -2.169115	42561E-01 72024E-01 72024E-01 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84749E-01 43007E-01 68039E-02 79135E-02 79135E-02 06319E-01 68172E-01 027748E-02 26439E-02 78043E-02 78043E-02	$\begin{array}{c} 2, 4 670 438 5207 E + 00\\ 1, 2747 185 2339E + 01\\ 7, 4610 655 3559E + 02\\ 6, 3889 693 052 2E + 02\\ 1, 247 802 365 00E + 01\\ 1, 4945 340 4797 E + 01\\ 1, 4945 340 4797 E + 01\\ 1, 650 700 51 48E + 01\\ 6, 3100 500 558E + 01\\ 5, 257 370 430 47E + 02\\ 1, 0361 64946 18E + 01\\ 9, 993 64 443 228E + 01\\ 2, 277 005 284 37E + 01\\ 8, 340 907 895 04E + 02\\ 7, 2577 700 530 46 + 02\\ 1, 035 484 371 39E + 01\\ \end{array}$	0.01230441 0.1151699252 0.007830282 0.043294526 0.043599061 0.03928596 0.007672774 0.031899340 0.012083274 0.042613083 0.003232785 0.006371409 0.06451215 0.006371409 0.061451215 0.014001373 0.047812286 0.005128049 0.006367224 0.006367224 0.006367224
11 12 13 14 15 16 17 10 20 21 20 21 22 23 23 24 25 26 27 28 29 30	$\begin{array}{c} -1.855616224888r\\ -2,00700335987z\\ -3,087650414318r\\ -6,81356797628r\\ -1,279894741048r\\ -3,3603212740028r\\ -1,247801706928r\\ -1,247801706928r\\ -1,35332706498r\\ -1,35332706498r\\ -1,35332706498r\\ -1,3533465308r\\ -5,092857047648r\\ -5,092857047648r\\ -5,092857047648r\\ -7,55144007806r\\ -7,55144007806r\\ -7,55144007806r\\ -7,55144007806r\\ -7,55144007806r\\ -7,791165513458r\\ -6,719716551345r\\ -6,73953387738r\\ -6,73953387738r\\ -1,348459531387\end{array}$	00 8.719759 02 1.210739 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433800 01 1.279581 00 6.341313 01 5.479581 02 6.341313 03 1.956419 01 -5.176774 02 4.770132 05 5.91016 01 2.7888090 2 2.591016 01 2.788909 2 2.929169 02 2.742308 03 2.929169 04 -161444 01 -2.169415	42361E-01 72024E-01 72024E-01 72024E-01 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84381E-02 84391E-02 64039E-02 79135E-02 06319E-01 69172E-01 69172E-01 26439E-02 26439E-02 67291E-02 67291E-02	2.46704385207E+00 1.27471852339E+01 7.46306553559E+02 6.38896530552E+02 6.38896530552E+02 6.38896530552E+02 1.24780236500E+01 1.49453404797E+00 6.93005005058E+01 5.34374791766E+02 5.25739043047E+02 1.03616494618E+01 9.99364443228E+01 2.277052843374E+01 8.3409708504E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+01 6.87737492105E+01 6.22959562405E+01	0.05130745 0.15130745 0.00130282 0.00130282 0.0013028596 0.001928596 0.001672774 0.091899340 0.012083274 0.042613083 0.003285886 0.003232785 0.006371409 0.061451215 0.014001373 0.047812286 0.0051280849 0.0051280849 0.004462827 0.006367224 0.004362827 0.006367224 0.00436389182
11 12 13 14 15 16 17 18 20 21 21 22 23 24 25 26 25 26 27 28 29 30 Derived fro	-1.85561622488E- 2.0700335907E× -3.960750041431E- 6.8135679762E- 1.27989474104E- 3.36032127002E- 1.24780170692E- 1.5533270649E+ 1.84177352015E- 4.607733240530F- 5.09285784764E- 2.1042694773E- 8.2377852317E- 9.59661247806E- 7.55114400780E- 7.5513453E- 7.80965513453E- 4.0909645854E- 6.719716551845E- 4.9099645854E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E-	00 a.719759 02 1.210739 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433800 01 1.279581 00 6.341313 01 5.479581 02 4.556419 01 -5.176774 02 4.770132 02 4.770132 02 5.91016 01 2.79800 02 4.770132 03 2.799501 04 7.4101b 05 2.79900 02 2.79200 02 2.1242388 02 2.1401b 03 2.279300 04 -1.619115 01 -2.169115 01 -2.169115 01 -2.169115 01 -2.169115 01 -2.759301	42561E-01 72024E-01 72024E-01 72024E-01 84281E-02 84281E-02 84749E-01 43007E-01 43007E-01 68039F-02 70970E-02 70970E-02 70970E-02 70970E-02 70970E-02 70970E-02 78043E-02 78043E-02 78043E-02 78043E-02 78042E-02	2.46704385207E+00 1.27471852339E+01 7.04087135280E+01 7.46306553559E+02 6.30896930522E+02 1.24780236500E+01 1.49453404797E+00 1.96507009148E-01 6.9300500508E+01 5.34374791766E+02 5.25737043047E+02 1.03616494618E+01 9.99364443228E+01 2.27700524437E+01 7.7558235774E+01 7.2557748=00 1.25574829105E+01 2.257703330E+02 1.0354437139E+01 6.8773492105E+01 2.27959396240E+01 2.279794220E+01 2.259396240E+01 2.259396240E+01 2.279794220	0.01230941 0.151699255 0.007830292 0.043294526 0.04589061 0.03928596 0.007672774 0.031208374 0.012083274 0.042613083 0.003285886 0.003232785 0.006371409 0.061451215 0.014001373 0.047812286 0.005128049 0.006367224 0.006367224 0.006367224 0.00537285 0.0053785 0.0055785 0.0055785 0.0055785 0.0055785 0.0055785 0.0055785 0.0055785 0.0055785 0.0055785 0.0055785 0.0055785 0.0055785 0.0055785 0.00557855785 0.00557855 0.00557855
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 21 21 23 24 25 26 27 27 28 29 Derived fro	$\begin{array}{r} -1.855616224888r\\ -2.05700335987z\\ +3.987590414318r\\ -6.81358797628r\\ -1.279894741048r\\ -3.36032127002te\\ -1.247801708928r\\ -1.353332706498r\\ +1.841773520155r\\ -4.607233706498r\\ -2.210426947738r\\ -2.210426947738r\\ -8.723778523178r\\ -9.596612473068r\\ -7.551144007002r\\ -7.551144007002r\\ -7.551144007002r\\ -7.551144007402r\\ -7.5613915472r\\ -4.6073319547r\\ -4.6073319547r\\ -4.903655138774r\\ -4.903645388748r\\ -4.903645388748r\\ -1.34945931302r\\ -1.34945931302r\\ -1.34945931302r\\ -1.34945931302r\\ -1.361428r\\ -1.8788r\\ -1.36148r\\ -1.8788r\\ -1.36148r\\ -1.3848r\\ -1.$	00 8.719798 01 1.274510 02 7.352497 02 5.433800 01 1.279581 00 6.341313 01 6.341313 01 -5.176774 01 -5.176774 02 4.770132 02 4.770132 02 2.741016 01 -7.270502 02 -2.929169 02 -2.429169 02 -2.429169 03 -2.5557 value -2.65	42361E-01 72024E-01 72024E-01 72024E-01 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84391E-01 43007E-01 69039E-02 79135E-02 06319E-01 69172E-01 69172E-01 02776F-02 26496E-02 67291E-02 26496E-02 67291E-02 370142E+01	2.447043852075-00 1.27471852339E-01 7.46306553559E-02 6.38896930522E-02 1.24780235500E-01 1.49453404797E+00 1.96507009148E-01 6.93005005058E-01 5.33774791766E-02 5.25739043047E-02 5.25739043047E-02 7.7558235774E-01 8.3409708504472E-02 7.25777403430E-02 7.25777403430E-02 7.25777403430E-02 7.25777403430E-02 7.25777403430E-02 7.25959396240E-01 2.22959396240E-01 2.22959396240E-01 2.2797974224	0.01233041 0.11233041 0.007830282 0.007830282 0.003220956 0.003220956 0.003220956 0.00152083274 0.012083274 0.042613083 0.002285886 0.002285886 0.00232785 0.001285886 0.00232785 0.00128586 0.001
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 20 21 22 23 24 25 26 27 27 28 29 29 20 20 21 21 22 23 24 25 26 26 27 20 28 29 29 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20	$\begin{array}{c} -1.855616224888r\\ -2.00700335907ts\\ -3.908765041431re\\ -6.8135079762re\\ -1.27989474104re\\ -3.36032127802te\\ -1.24780170892re\\ -1.24780170892re\\ -1.24780170892re\\ -2.3103270649tc\\ -2.3104270647te\\ -2.31042706477re\\ -2.31042694773re\\ -8.72377852317re\\ -9.59661247806re\\ -7.751144007802re\\ -7.751144007802re\\ -7.751144007802re\\ -7.751144007802re\\ -7.751144007802re\\ -7.751144007802re\\ -7.751144007802re\\ -7.751144007802re\\ -7.751145317re\\ -8.73953107732re\\ -4.90964658548re\\ -6.8739531307732re\\ -1.34459531302rm\\ -1.346459531302rm\\ -1.346457873531202rm\\ -1.346457873531202rm\\ -1.346457873531202rm\\ -1.346457873531202rm\\ -1.34645787782rm\\ -1.346787782rm\\ -1.346787782rm\\ -1.34787878787878787878787878778778778778778$	0 a.710759 02 1.210739 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433800 01 1.279581 00 6.341313 01 5.479581 02 6.341313 01 5.176774 02 4.770132 02 5.91016 01 2.7888090 02 2.929169 02 2.742388 02 2.929169 02 2.742386 02 1.616744 01 -2.169115 02 1.472587 03 1.75597	42361E-01 72024E-01 72024E-01 72024E-01 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84284E-02 60339E-02 74135E-02 66339E-02 74135E-02 26436E-01 663172E-01 663172E-01 663172E-01 870643E-02 67291E-02 76043E-02 67291E-02 730442E+01	2.46704385207E+00 1.27471852339E+01 7.04087135280E+01 7.46306553559E+02 6.38896930522E+02 1.24780236500E+01 1.49453404797E+00 1.96507009148E+01 6.93005005058E+01 5.34374791766E+02 5.25733043047E+02 1.03616494618E+01 9.99364443228E+01 2.277052843374E+01 8.34090789504E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 1.0354437139E+01 6.87737492105E+01 2.27959362405+01 2.277053962405+01 2.2759362405+01 2.2759362405+01 2.2759362405+01 2.2759362405+01 2.2759362405+01 2.2759362405+01 2.2759362405+01 2.275774054371392+01 2.2759362405+01 2.2759362405+01 2.2759362405+01 2.2759362405+01 2.2759362405+01 2.2759362405+01 2.2759362405+01 2.2759362405+01 2.27577405437155+01 2.27577405437155+01 2.2757740547155+01 2.275774055+01 2.2757740550455+01 2.27577405504555+01 2.27577405504555+01 2.275774055+01 2.275774055+01 2.275774055+01 2.275774055+01 2.275774055+01 2.275774055+01 2.275774055+01 2.275774055+01 2.275774055+01 2.275774055+01 2.275774055+01 2.275774055+01 2.275775555+02 2.275775555555555555555555555555555555	L 0.051389245 C 151389245 C 0.043294526 C 0.043589061 C 0.043589061 C 0.07672774 C 0.03928596 C 0.07672774 C 0.0312083274 C 0.042613083 C 0.03235886 C 0.03232785 C 0.06371409 C 0.06451215 C 0.06451215 C 0.0414001373 C 0.0414001373 C 0.041812286 C 0.06367224 C 0.06367224 C 0.04289182 C 0.013709839 DE+02 X
11 12 13 14 15 16 17 19 20 20 21 22 22 23 24 24 24 25 26 26 27 28 29 30 Derived fro	-1.855616224888 -1.07803359875 -3.98759041431E 6.81358797628 -1.27989474104E -3.36032127902E -1.24780170892E -1.35333270649E 1.8533270649E 2.21042694773E 2.21042694773E -8.72377852317E -9.59661247806E -7.75114400780E -7.7511391547E -7.80965513453E -4.90964558548E -4.909964568548E -4.9099645583130E 1.34845953130E 1.34845953130E -1.3484555314E -1.3484555528 -1.3484555528 -1.3484555528 -1.3484555528 -1.3484555528 -1.3484555528 -1.3484555528 -1.3484555528 -1.348455528 -1.348455528 -1.348455528 -1.348455528 -1.348455528 -1.348455528 -1.348455528 -1.348455528 -1.348455528 -1.348455588 -1.348455588 -1.348455588 -1.348455588 -1.348455588 -1.34845588 -1.34845588 -1.34845588 -1.3484588 -1.3484588 -1.3484588 -1.3484588 -1.3484588 -1.34845888 -1.3484588 -1.3484588 -1.3484588 -1.348458888 -1.348458888	00 8.719759 01 1.774510 02 7.352497 02 5.4331800 01 1.779501 00 6.341913 01 6.341913 01 6.341913 01 6.341913 01 6.341913 02 7.788099 02 2.748099 02 2.749106 02 7.279502 02 6.299169 02 2.742388 02 9.116744 01 2.169115 01 1.775597 Value = 2.65	42561E-01 7701E-01 770244-01 770244-01 91263E-04 91263E-04 91263E-04 91263E-01 94749E-01 94749E-01 94749E-01 949749E-02 70970E-02 70970E-02 70970E-02 70970E-02 70970E-02 70970E-02 78043E-02 78043E-02 78043E-02 78043E-02 78044E-01 370142E+01	2.457043852075.00 1.274718523398.01 7.451065535595.02 6.38969305227.02 1.247802365005.01 1.4745340479775.00 1.46507091485.01 6.930050051585.01 5.35735043047675.02 1.036164946185.01 1.036164946185.01 2.2777005244377501 8.340907895045.02 1.035484371395.01 2.229593962405.01 2.229593962405.01 2.277974225	0.0123044 0.1123044 0.007830282 0.007830282 0.0013294526 0.0013294526 0.003928596 0.007672774 0.012083274 0.012083274 0.012083274 0.002285886 0.0032132785 0.006371405 0.006371405 0.006371405 0.006371405 0.001450125 0.001450125 0.001450286 0.005128849 0.006367224 0.006367224 0.006367224 0.006367224 0.00367224 0.00367224 0.00367224 0.003709839
11 12 13 14 15 16 17 19 20 21 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 0 Derived fro C CORRIENTE	-1.855616224888 -1.07003359875 -3.98759041431E 6.81358797628 -1.27989474104E -3.360321270025 -1.24780170692E -1.24780170692E -1.353327064592 -1.353327064595 -2.2103764551345 -2.21037645378 -3.59461243066E -3.59461243066E -3.59461243066E -3.59461243066E -3.59461243066E -3.59461243066E -3.59461243066E -3.59461243066E -3.59461243066E -3.59461243066E -3.59461243066E -3.59461243066E -3.59461243066E -3.59461243066E -3.59461243066E -3.59461243066E -3.59461243066E -3.59461243066E -3.5946458542 -3.594531362E -3.38455531362E -3.38455531362E -3.3845553562E -3.38455555562E -3.38455555562E -3.384555555555555555555555555555	00 8.719759 01 1.774510 02 1.210739 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433800 01 1.279581 00 6.341313 01 9.56419 01 -5.176774 01 -5.176774 01 -5.176774 02 4.770132 02 5.591016 01 2.7888090 02 2.141016 01 -7.270502 02 2.929169 02 2.742388 02 4.292169 02 2.742388 01 1.775597 value - 2.65 FILTRO DE 5A	42561E-01 72024E-01 72024E-01 72024E-01 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 8436E-04 66039E-02 74135E-02 06319E-01 69172E-01 920436E-02 66399E-02 264398E-02 264398E-02 67291E-02 26439E-02 73043E-02 67291E-02 370142E+01	2.46704385207E+00 1.27471852339E+01 7.04087135280E+01 7.46306553559E+02 6.38896930522E+02 1.24780236500E+01 1.49453404797E+00 1.96507009148E+01 6.93005005058E+01 5.33374791766E+02 5.25739043047E+02 1.03616494618E+01 9.99364443228E+01 2.77052843774E+01 8.34090789504E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+01 6.87737492105E+01 2.22959396240E+01 2.274074228	C 13 13 03 04 C 13 13 03 04 C 13 13 04 C 10 13 02 02 C 00 13 02 03 C 00 13 02 C 00 1
11 12 13 14 15 16 17 19 20 21 23 23 23 24 24 24 25 26 27 28 29 30 Derived fro C CORRIENTE C	-1.855616224888 -1.970803359875 -3.908765041431E 6.81358797628 -1.27989474104E -3.360321270025 -1.2478017089225 -1.353332706458 -1.852332706458 -2.210426947735 -2.210426947735 -2.210426947735 -2.21042694778 -2.756713915475 -8.723778523175 -9.596612478065 -7.5511440078025 -7.5511440078025 -7.551345385 -4.9096551345385 -4.909646585485 -4.909646585485 -1.3484595313025 -1.3484595313025 -1.3484595133025 -1.3484595133025 -1.3484595133025 -1.3484595133025 -1.3484595133025 -1.3484595133025 -1.3484595133025 -1.3484595120 -1.34845551345 -1.3484555126 -1.348455558 -1	00 a.719759 01 1.271979 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433190 01 1.279581 00 6.341313 01 5.479581 02 6.341313 01 5.176774 02 4.770132 02 5.91016 01 2.7886190 02 4.770132 02 5.91016 01 2.7886190 02 4.720900 02 4.741016 02 2.929300 02 2.16242368 02 9.16242368 02 9.16243268 02 9.16243268 02 9.16243268 02 9.16243268 02 9.16243268 01 -2.759507 value 2.65 FILTRO DE SA.4	4 2361E-01 72024E-01 72024E-01 72024E-01 9165E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 9455E-01 94576E-01 94576E-01 94576E-01 02748E-02 76643E-02 76642E-	2.46704385207E+00 1.27471852339E+01 7.04087135280E+01 7.46306553559E+02 6.38896930522E+02 1.24780236500E+01 1.49453404797E+00 1.96507009148E-01 6.9300500508E+01 5.34374791766E+02 5.25733043047E+02 1.03616494618E+01 9.99364443228E+01 2.27700524437E+01 7.77558235774E+01 7.37558235774E+01 7.30748504E+02 7.307485040E+02 7.22959396240E+01 2.2789396240E+01 2.279074220	L 0.513680235 0.070838282 0.0043294526 0.0043589061 0.003928596 0.007672774 0.091899340 0.042613083 0.00328586 0.003228586 0.003223785 0.006371409 0.061451215 0.061451215 0.061451215 0.061451286 0.0051286847 0.0051286847 0.0051286847 0.0051286847 0.0051286847 0.0051286847 0.0051286847 0.0051286847 0.0051286847 0.0051286847 0.0051286847 0.0051286847 0.0051286847 0.0051286847 0.005128847 0.00518847 0.00518847 0.0
11 12 13 14 15 16 17 17 20 21 21 21 23 23 24 25 26 27 28 29 0 Derived fro c CORRIENTE C C 1	-1.85561622888E- -2.05700335987E- -3.98759041431E- 6.81358797628E- 1.27989474104E- -3.36032127002E- 1.4470170892E- 1.5533270649E+ 1.84177352015E- 4.60723346530E- 2.21042694773E- 2.21042694773E- 4.72377852317E- 9.59661247806E- 7.751144007002E- 7.7511391547E- 7.80065513453E- 6.710916513453E- 6.710916513453E- 6.7109163195477E- 1.87395438773E- 6.739533130E- 1.87395353130E- 1.8748553130E- 1.8748553130E- 1.874854553130E- 1.87485453130E- 1.87485453130E- 1.87485453130E- 1.87485453130E- 1.87485453130E- 1.87485453130E- 1.874854553130E- 1.87485453130E- 1.8748545553130E- 1.8748545553130E- 1.8748545553130E- 1.8748545553130E- 1.8748545553130E- 1.8748545553130E- 1.8748545553130E- 1.874854555545454555555555555555555555555	00 8.719759 01 1.774510 02 7.352497 02 5.4331800 01 1.779511 00 6.341313 01 6.341313 01 6.341313 01 9.56419 01 -5.176774 02 4.770132 02 4.770132 02 5.591016 01 2.7888909 02 2.141016 01 -7.270502 02 -2.929169 02 2.742388 01 6744 01 -2.169415 01 1.775597 value = 2.65 FILTRO DE SA. 3 4	42561E-01 700264E-02 972618-00 91263E-04 91263E-04 91263E-04 9179197E-01 98749E-01 98749E-01 98749E-01 68039E-02 70970E-02 70970E-02 69172E-01 027748E-02 76499E-02 78043E-02 78043E-02 70712E-01 0277E-01 370142E+01 ARMONICA 5	2.467043852075+00 1.27471852339E-01 7.04087135280E-01 7.46306553558E-02 6.38896930522E-02 1.24780236500E-01 1.49453404797E+00 1.96507009148E-01 6.93005005058E-01 5.33774791766E-02 5.25739043047E-02 5.25739043047E-02 5.2577304307E-01 7.77558235774E-01 8.3409789504E-02 7.25777403430E-02 7.2577740340E-02 7.25777403430E-02 7.2577740340E-02 7.25777403430E-02 7.2577740340E-02 7.25777403430E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.2577740340E-02 7.257774040E-02 7.257774040E-02 7.257774040E-02 7.257774040E-02 7.257774040E-02 7.257774040E-02 7.257774040E-02 7.257774040E-02 7.257774040E-02 7.257774040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7.2577740740E-02 7.2577740040E-02 7.2577740040E-02 7	0.014538946 0.114538946 0.0079838252 0.0079838252 0.00328596 0.00328596 0.00328596 0.00328596 0.0012083274 0.042613083 0.00328586 0.00328586 0.00328586 0.00323785 0.006371409 0.061451215 0.061451215 0.061451215 0.061451215 0.061451215 0.05128649 0.005128649 0.0047812286 0.005128649 0.00462827 0.006367224 0.042289182 0.013709939 VE+02 %
11 12 13 14 14 15 16 17 19 20 21 20 21 22 23 24 25 27 27 27 27 27 29 29 29 29 29 29 29 29 29 20 20 27 27 27 27 27 27 27 20 27 27 27 27 27 27 27 27 27 27 27 27 27	-1.855616224888 -1.967603359675 -3.968759041431E -6.81356797628 -1.27989474104E -3.36032127802E -1.24780170892E -1.24780170892E -1.35333270649E -2.21042694773E -2.21042694773E -8.72377852317E -9.59661247806E -7.55114400780E -7.55134538E -7.5513454785133E -3.756513453E -4.90964568548E -4.90964568548E -4.90964568548E -1.34845953130E 1.34845953130E -1.3484595312E -1.34856 -1.3484555528 -1.3484555528 -1.34856	00 a.710759 02 1.210739 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433800 01 1.279581 00 6.341313 01 5.479581 02 5.453180 03 6.341313 04 1.618159 02 4.770132 02 5.91016 01 2.7888090 02 2.742108 02 2.929169 02 2.742308 03 1.6744 01 -2.169115 01 -7.7597 value 2.65 FILTRO DE 5A.433 3 490123456700	42361E-01 72024E-01 72024E-01 72024E-01 91263E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 6039E-01 76135E-02 8419E-01 02778E-01 02778E-01 02778E-02 40077E-01 370142E+01 370142E+01 370142E+01	2.46704385207E+00 1.27471852339E+01 7.04087135280E+01 7.46306553559E+02 6.38896930522E+02 1.24780236500E+01 1.49453404797E+00 1.96507009148E+01 6.33074791766E+02 5.337374791766E+02 5.25733043047E+02 1.0361494618E+01 9.99364443228E+01 2.77052843374E+01 8.34090789504E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 1.0354437139E+01 6.87737492105E+01 2.2795936240E+01 2.2795936240E+01 2.2777403430E+01 2.2795936240E+01 2.2795936240E+01 2.2795936240E+01 2.2795936240E+01 2.2795936240E+01 2.2795936240E+01 2.279596240E+01 2.299596240E+01 2.299596240E+01 2.299596240E+01 2.299596240E+01 2.299596240E+01 2.299596240E+01 2.299596240E+01 2.29596240E+01 2.299540E+01 2.299596240E+01 2.299596240E+01 2.299596240E+01 2.299596240E+01 2.299596240E+01 2.299596240E+01 2.299596240	C 105130975 C 105130975 C 0043294526 C 0043599061 C 003928596 C 007672774 C 00312083274 C 042613083 C 003228586 C 003228586 C 003228586 C 006371409 C 061451215 C 014001373 C 041451215 C 014001373 C 061451215 C 014001373 C 061451215 C 014001373 C 061451215 C 014001373 C 061451215 C 016367224 C 004462891 C 006367224 C 004289182 C 0013709939 DE+02 S
11 12 13 14 15 16 16 17 20 20 21 22 22 22 23 24 24 24 25 26 26 27 28 29 30 Derived fro C CORRIENTE C 1 C 345678900	-1.85561622888E- -3.98769041431E- 6.81358797628E- 1.27989474104E- -3.36032127802E- 1.24780170892E- 1.3533270649E+ 1.84177352015E- 4.60723346530E- 2.21042694773E- 2.21042694773E- 2.21042694773E- 2.75671391547E- 7.5571391547E- 7.80965513453E- 4.9099645854E- 6.7197165518453E- 4.9099645854E- 1.34845953130E- 1.34845953120E- 1.34845953120E- 1.34845955120E- 1.348	00 8.719759 01 1.774510 02 7.352497 02 5.4331800 01 1.774510 00 6.341313 01 6.341313 01 6.341313 01 6.341313 01 6.341313 02 4.770132 02 5.591016 01 7.788109 02 2.4770132 02 6.591016 01 7.788109 02 2.2929169 02 2.2429169 02 2.2429169 02 2.2429169 02 2.2429169 02 2.2429169 03 4000 04 1.775597 04 1.00 2.469115 04 1.775597 04 1.00 2.469115 04 1.775597 04 1.00 2.46915 04 1.775597 04 1.00 2.46915 04 1.775597 04 1.00 2.46915 04 1.775597 04 1.00 2.46915 04 1.00 2.46955 04 1.00 2.469555 04 1.00 2.4695555 04 1.00 2.46955555 04 1.00 2.469555555555555555555555555555555555555	42561E-01 7701E-01 7701241-01 770244-01 912618E-02 912618E-02 912618E-02 912618E-02 912618E-02 912618E-02 912618E-02 70970E-02 70970E-02 70970E-02 70970E-02 70970E-02 70970E-02 70970E-02 70970E-02 780438E-02 780458E-02 7	2.447043852075+00 1.274718523398-01 7.040871352808-01 7.45065535598-02 6.38969305228-02 1.247802355008-01 1.47570091488-01 6.93005005088-01 5.337747917666-02 5.337747917667-02 1.03614946188-01 9.0364432288-01 2.37706524437748-01 7.775592357748-01 8.340970895048-02 7.05544371298-01 2.22593962408-01 2.22593962408-01 2.27577402408-01 2.27577402408-01 2.27577402408-01 2.27577402408-01 2.27577402408-01 2.27577402408-01 2.27577402408-01 2.27577402408-01 2.27577402408-01 2.27577402408-01 2.27577402408-01 2.27577402408-01 2.27577402408-01 2.27577402408-01 2.27577402408-01 2.2757402408-01 2.2757402408-01 2.2757402408-01 2.2757402408-01 2.2757402408-01 2.2757402408-01 2.2757402408-01 2.2757402408-01 2.2757402408-01 2.27577408-01 2.27577408-01 2.27577408-01 2.27577408-01 2.27577408-01 2.27577408	0.01430946 0.014309262 0.0070930262 0.001920526 0.001920526 0.001920526 0.001920574 0.001672774 0.001672774 0.0012089374 0.00233785 0.00233785 0.00237785 0.00237785 0.00237785 0.00237785 0.00237785 0.00237785 0.00237785 0.00237785 0.0023785 0.0037785 0.0037785 0.0037785 0.0037785 0.0037785 0.0037785 0.0037785 0.003785 0.003785 0.003785 0.0037785 0.003785 0.003785 0.003785 0.003785 0.0037785 0.003
11 12 13 14 15 16 16 17 19 20 21 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 29 20 27 28 29 20 27 28 29 29 20 27 20 21 22 23 24 25 26 26 27 28 29 29 20 20 21 22 23 24 25 26 26 27 27 28 29 20 20 21 22 23 24 25 26 26 26 27 27 27 28 29 20 20 21 20 21 22 23 24 25 26 26 26 27 27 28 29 20 20 21 20 21 20 21 20 21 20 20 21 20 20 21 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20 20	-1.855616224888 -2.057003359875 -3.98759041431E 6.81359797628 -1.27989474104E -3.36032127005 -1.24780170692E -1.24780170692E -1.353327064592 -1.35332706459 203764551345 203764551345 20376531345 20376531345 20376531345 20376531345 20376531345 203764551345 109716551345 109716551345 109716551345 109716551345 109716551345 10976551345 10976551345 10976551345 10976551345 10976551345 10976551345 10976551345 10976551345 10976551345 109855136 10976551345 109765533 109765555 109765555 10976555 109765555 10	00 8.710759 01 1.774510 02 1.210739 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433800 01 1.279581 00 6.341313 01 9.56419 01 -5.176774 01 6.341313 02 4.770132 02 5.591016 01 2.7888099 02 2.141016 01 -7.270502 02 -2.929169 02 2.742388 02 -2.929169 02 2.742388 01 -2.169415 01 -7.5597 value - 2.65 FILTRO DE SA 3 4890123456789 1 8052	42561E-01 72024E-01 72024E-01 72024E-01 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84361E-02 66039E-02 79135E-02 66039E-02 79135E-02 66139E-01 663172E-01 663172E-01 663172E-01 878043E-02 67291E-02 26499E-02 26499E-02 78043E-02 67291E-02 730442E-01 370142E+01 370142E+01 370142E+01 370142E+01	2.46704385207E+00 1.27471852339E+01 7.04087135280E+01 7.46306553559E+02 6.38896930522E+02 1.24780236500E+01 1.9453404797E+00 1.96507009148E+01 6.33074791766E+02 5.25739043047E+02 1.03616494618E+01 9.99364443228E+01 2.77052843774E+01 8.34090789504E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+01 2.27959396240E+01 2.277053952425F01 2.2770742437129E+01 6.7737492105E+01 2.2777402430E+01 2.27707402437129E+01 2.2777402430E+01 2.2777402430E+01 2.2777402430E+01 2.27959506240E+01 2.27577402430E+01 2.275774024024E+01 2.2757740240000000000000000000000000000000	0.05138945 0.15138945 0.001932222 0.001929222 0.001929556 0.001928596 0.001672774 0.091899340 0.012083274 0.042613083 0.003285886 0.003228586 0.003212785 0.061451215 0.061451215 0.061451215 0.061451215 0.05128649 0.005128649 0.004462827 0.005128649 0.004462827 0.006367224 0.0047812286 0.00532849 0.00446289182 0.013709939
11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 22 23 26 27 28 29 30 Derived from C CORRIENTE C 145678901 C 345678904	-1.85561622888E- -3.90769041431E- 6.81358797628E- 1.27989474104E- 3.36032127802E- 1.24780170629E- 1.3533270649E+ 1.84177352015E- 4.60723346530E- 2.21042694773E- 2.21042694773E- 2.21042694773E- 4.097317852317E- 9.59661247806E- 7.75114400780E- 7.75114400780E- 7.55134531E- 4.90965513453E- 4.9096456854E- 6.87395318773E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845953140E- 1.34845953130E- 1.34845953140E- 1.34845953140E- 1.34845953140E- 1.34845953140E- 1.34845953140E- 1.34845953140E- 1.34845953140E- 1.34845953140E- 1.348455540E- 1.348459	00 a.71975 01 1.271975 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433190 01 1.279581 00 6.341313 01 6.341313 01 -5.176774 01 -5.176774 01 -5.176774 02 4.770132 02 5.591016 01 2.7861969 02 2.47910 02 2.79930 02 2.41015 01 -2.169115 01 -72597 value - 2.65 FILTRO DE 5A 4 33 4901234567890 81 BUS2 	42561E-01 72024E-01 72024E-01 72024E-01 96381E-02 81881E-02 81881E-02 81891E-01 96719E-01 96719E-01 96719E-01 96719E-01 969172E-01 027708F-02 76919E-02 76949E-02 78043E-02 78043E-02 40077E-01 370142E+01 972142E-01 972142E-01 972142E-02 40077E-01 370142E+01 872142E-02 9772142E-02 9772142E-02 9772142E-02 9772142E-02 9772142E-02 9772142E-02 9772142E-02 9772142E-02 9772142E-02 9772142E-02 9772142E-02 9772142E-02 9772142E-02 97772072E-02 97772072E-02 97772072E-02 97772072E-02 97772072E-02 97772072E-02 97772072E-02 97772072E-02 97772072E-02 97772072E-02 97772072E-02 97772072E-02 977772072E-02 977772E-02 977772E-02 977772E-02 9777772E-02 9777777777777777777777777777777777777	2.46704385207E+00 1.27471852339E+01 7.04087135280E+01 7.46306553559E+02 6.38896930522E+02 1.24780236500E+01 1.49453404797E+00 1.94557009148E-01 6.33074791766E+02 5.25737043047E+02 1.03616494618E+01 9.99364443228E+01 2.27700524437E+01 7.77558235774E+01 7.77558235774E+01 7.27558235774E+01 7.27558235774E+01 7.27558235774E+01 7.22959396240E+01 2.22959396240	0.051680235 0.070838282 0.043294526 0.004589061 0.03928596 0.07672774 0.051899340 0.042613083 0.03228586 0.042613083 0.03223785 0.006371409 0.061451215 0.061451215 0.061451215 0.061451286 0.0051288847 0.005128847 0.005128847 0.005128847 0.005128847 0.005128847 0.005128847 0.005128847 0.005128847 0.005128847 0.005128847 0.005128847 0.00512890
11 12 13 14 15 16 17 19 20 21 21 22 23 24 25 26 27 28 29 Derived fro C CORRIENTE C CORRIENTE C 1 C 45678901 C HPIHMIN C +	-1.85561622888E- -2.05700335987E- -3.98759041431E- 6.81358797628E- 1.27989474104E- -3.36032127802E- 1.247801706992E- 1.3533270649E- 1.8533270649E- 2.21042694773E- 2.21042694773E- 2.21042694773E- 4.60723346530E- 4.60723346530E- 5.9561624780E- 2.21042694773E- 4.7567131547E- 6.9797645854E- 7.55114400780E- 7.551336773E- 4.9093645854E- 6.87395338773E- 1.34845553130E- 1.34845553130E- m table: 1) RMS EFASE "A" EN EL 223456789012345677 HMAX BUS	00 8.719759 01 1.774510 02 1.210739 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433800 01 1.279581 00 6.341313 01 -5.176774 01 -5.176774 01 -5.176774 01 -5.176774 02 -5.91016 01 2.7888090 02 2.141016 01 -7.270502 02 -2.929169 02 -2.929169 02 -2.742388 02 -2.929169 02 -2.742388 01 1.775597 value - 2.65 FILTRO DE SA 4 89012345678900 3 4857 18 48 4857 18 48577 18 48577 18 48577 18 48577 18 48	42561E-01 7701E-01 70054E-02 91263E-04 91263E-04 91263E-04 91263E-04 91370E-01 98749E-01 98749E-01 98749E-01 68039E-02 70970E-02 90470E-02 69172E-01 027748E-02 78043E-02 78043E-02 78043E-02 78043E-02 7370142E+01 ARMONICA 5 12345678900	2.46704385207E+00 1.27471852339E+01 7.04087135280E+01 7.46306553559E+02 6.38896930522E+02 1.24780236500E+01 1.49453404797E+00 1.96507009148E+01 6.33074791766E+02 5.25739043047E+02 1.03616494618E+01 9.99364443228E+01 2.277052843374E+01 8.3409708504E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+01 2.2979396240E+01 2.2979396240E+01 2.2979396240E+01 2.2979396240E+01 2.2977402437139E+01 6.77 12345678901234567890123	0.05150045 0.15150045 0.001930252 0.001930252 0.0019294526 0.001929556 0.00192956 0.001672774 0.091899340 0.042613083 0.003285886 0.00322745 0.0013285886 0.00321785 0.061451215 0.061451215 0.061451215 0.061451215 0.061286849 0.004162827 0.0051286849 0.004462827 0.005128649 0.004462827 0.006367224 0.004362827 0.006367224 0.00436289182 0.013709939 15+02 %
11 12 13 14 15 16 17 10 20 20 20 22 22 22 23 24 25 25 26 26 26 26 27 27 27 27 27 27 27 27 27 27	-1.85561622888E- -3.90760335987E+ -3.908765041431E- 6.81358797628E- 1.27989474104E- -3.36032127002E+ 1.85333270645E+ 1.84177352015E- 4.60723346530E- 5.09285784764E- 2.21042694773E- 2.21042694773E- 8.72377852317E- 9.59661247806E- 7.75114400700E- 7.75114400700E- 7.7511391547E- 7.80965513453E- 4.909964658548E- 6.87395318073E- 1.34845953130E- 1.34845953130E- 1.34845951330E- 1.34845951345E- 1.34845551345E- 1.34845551345E- 1.34845551345E- 1.3484555145E- 1.3484555555E- 1.34845555555555555	00 a.710759 01 1.774510 02 7.352497 02 5.4331800 01 1.279581 00 6.341313 01 6.341313 01 5.176774 01 6.341313 01 5.176774 01 6.18159 02 4.770132 02 5.591016 01 2.7881899 02 2.141016 01 2.7881899 02 2.293169 02 2.293169 02 2.742388 02 6.591674 01 2.76597 Value 2.65 FILTRO DE SA. 3 4 4 8901234567890 S1 BUS2 	42361E-01 72024E-01 72024E-01 72024E-01 91263E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 84281E-02 70970E-02 70970E-02 709135E-02 709172E-01 027708F-02 78043E-02 78045E-02 780	2.46704385207E+00 1.27471852339E+01 7.04087135280E+01 7.46306553559E+02 6.38896930522E+02 1.24780236500E+01 1.49453404797E+00 1.96507009148E+01 6.33074791766E+02 5.25733043047E+02 1.03616494618E+01 9.99364443228E+01 2.277052843774E+01 8.340397374E+01 8.34039738504E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 2.279396240E+01 2.2793952425 6.7 123456789901234567890123 equidistant points.	C 15130975 C 15130975 C 004329422 C 043294526 C 043589061 C 003928596 C 007672774 C 091899340 C 042613083 C 003228586 C 006371409 C 061451215 C 014001373 C 061451215 C 014001373 C 061451215 C 014001373 C 0614512286 C 006367224 C 004462827 C 004462827 C 004462827 C 004462827 C 004462827 C 004462827 C 004462827 C 00446387 C 00446387 C 00446387 C 00446387 C 00367524 C 003779839 DE+02 %
11 12 13 14 15 16 17 19 19 20 21 22 23 24 24 25 26 27 28 29 30 Derived fro C CORRIENTE C CORRIENTE C 10 355789001 C +0741MIN C +	-1.85561622888E- -2.05780335987E- -3.98759041431E- 6.81358797628E- 1.27989474104E- -3.36032127802E- -1.24780170892E- 1.35333270649E+ 1.84177352015E- 4.60723346530E- 2.21042694773E- 2.21042694773E- 2.21042694773E- 4.575671391547E- 7.556144007802E- 7.551144007802E- 7.55134531E- 4.90956513453E- 4.90956513453E- 4.90956513453E- 4.90956456554E- 6.87395138778E- 1.34045953130E- 1.34045953130E- 1.34045953137E- 22345678901234567: IIMAX BUS Sourier series co two. are:	00 8.719759 01 1.774510 02 1.210739 01 1.774510 02 7.352497 02 5.433800 01 1.279581 00 6.341313 01 9.56419 01 -5.176774 01 -5.176774 02 4.770132 02 4.770132 02 5.591016 01 2.7888090 02 2.141016 01 -7.270502 02 -2.929169 02 2.742388 02 -2.929169 02 2.742388 01 6744 01 -2.169115 01 1.775597 value = 2.65 FILTRO DE SA 4 89012345678900 18052 	42561E-01 7701E-01 7702F4E-02 91263E-04 91263E-04 91263E-04 91263E-01 94739E-01 94739E-01 94739E-01 94739E-02 70970E-02	2.46704385207E+00 1.27471852339E+01 7.04087135280E+01 7.46306553558E+02 6.38896930522E+02 1.24780236500E+01 1.49453404797E+00 1.96507009148E+01 6.93005005058E+01 5.33374791766E+02 5.25739043047E+02 1.03616494618E+01 9.99364443228E+01 2.77052843774E+01 8.3409789504E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+02 7.25777403430E+01 2.2795936240E+01 2.277059396240E+01 2.276793956457890123 6.7 12345678901234567890123 equidistant points.	0.0111699252 0.0079539252 0.0079539252 0.003925556 0.003925556 0.003925556 0.00392556 0.001672774 0.091899340 0.042613083 0.003235866 0.003235866 0.00323785 0.006371409 0.061451215 0.061451215 0.061451215 0.061451215 0.05128649 0.0047812286 0.005128649 0.0047812286 0.004362827 0.006367224 0.00436289182 0.013709939 1E+02 %

_



3.13190460	20507810E+02	3.028563537	976560E+02 3	. 3786950683593750E+0	2 3.318844909667969	0E+02
Coefficien	ts of the res	ultant Fourie	er series follo	w. "Complex amplit	ude" is the square	root of the
sum of the	squares of th	ie				
cosine and	the sine coef	ficients.	Fraction of fu	ndamental" applies	to this amplitude.	
Harmonic		osine	Sine	Complex	Fraction of	
number	coeffi	icient	coefficient	amplitude	fundamental	
0	-1.2585246189	JSE+00 0.000	000000000000000000000000000000000000000	1.25852461895E+00	0.002785351	
1	3.9263325944	1E+02 2.23	97267407E+02	4.51836933430E+02	1.000000000	
2	1.7752524114	6E+00 1.950	17453884E+00	2.63717687240E+00	0.005836568	
3	1.5/60359182	26E+00 2.371	40515714E+00	2.84735871203E+00	0.006301740	
4	7.3170175323	34E-02 6.142	50249924E+00	6.14293828943E+00	0.013595476	
5	-6.9112192940	D2E+01 -1.766	44678539E+02	1.89683519762E+02	0.419805257	
6	-6.1221453955	51E-01 -8.4B4	51545678E+00	8.50657446795E+00	0.018826647	
7	-7.1158547723	34E+00 -5.309	61015176E+00	8.87847673335E+00	0.019649737	
6	-2.0094248254	11E-01 -6.030	36035092E-01	6.35633810389E-01	0.001406777	
9	-9.7228148756	52E-02 -6.571	25858867E-01	6.64279841108E-01	0.001470176	
10	1.8029373493	38E-01 -7.832	75388817E-01	8.03757529099E-01	0.001778866	
11	-2.1715607208	37E+00 5.705	00817798E+00	6.10432871453E+00	0.013510026	
12	-3.1244084166	50E-01 -3.035	99749450E-01	4.35651336969E-01	0.000964178	
13	-3.9213703895	55E-01 1.280	70327482E+00	1.33939252479E+00	0.002964327	
14	-1.7378621503	32E-01 -1.553	42151100E-01	2.33360806830E-01	0.000516471	
15	-1.2864201913	32E-01 -2.325	44788482E-01	2.65755240281E-01	0.000588166	
16	-2.8518744886	55E-02 -3.786	13453943E-01	3.79686010167E-01	0.000840316	
17	-1.0493847215	3E+00 2.089	37318799E+00	2.338095082006+00	0.005174644	
18	-3.2958458440	02E-01 -1.105	25684082E-01	3.47623251692E-01	0.000769356	
19	7.4170085652	6E-01 5.36	520570788-01	9.15662422605E-01	0.002026533	
20	-4.7488820811	3E-02 -5.614	525064936-02	7.35355510791E-02	0.000162748	
21	-8.8485645674	8E-02 -9.136	389719226-02	1.271891158895-01	0.000281493	
22	-9.6870345371	4E-02 -2.254	35940648E-01	2.45367534830E-01	0.000543044	
23	-3.5426531565	2E-01 1.052	24971043E+00	1.11028526378E+00	0.002457270	
24	-2.7226426233	2E-01 -1.427	21621141E-02	2.72638080896E-01	0.000603399	
25	7.8320208332	2E-01 1.993	07499639E-01	8.08163957828E-01	0.001788619	
26	6.6556756624	1E-03 -1.423	37984369E-02	1.57130212392E-02	0.000034776	
27	-5.2663979953	2E-02 -2.448	88062278E-02	5.80792253303E-02	0.000128540	
28	-1.1507181699	3E-01 -1.378	208086586-01	1.79544140437E-01	0.000397365	
29	-7.2467212642	1E-04 5.660	41928487E-01	5.66042392366E-01	0.001252758	
30	-1.8695139916	3E-01 4.078	56418910E-02	1.91348619628E-01	0.000423490	
Derived fro	om table: 1)	RMS value = 3	.46694011E+02	2) THD = 4.2128361	17E+01 %	

Para el filtro de 7^a armónica, aunque la corriente también fue superior al valor nominal, no alcanzó un valor de consideración como para producir sobretensiones en el banco de capacitores del filtro. La corriente tuvo un valor de 154.96 A, y aunque es superior a los 125.94 A de corriente nominal, la tensión en el banco de capacitores fue de 277.68 V. A continuación se presenta el análisis de espectro obtenido con el ATP para la corriente y el voltaje en el filtro de 7^a armónica.

c													
C VOLTA IE V		BANCO F	E CADA	CITOPEC	DEL E		5 78 80M	ONTER					
C VOLINGE	AVIA PIA PI	, BANCO L	CAPP	CITOKES	DEN F	LINO D	S IN AND	UNICA					
č i		7	2				c	-	,				
C 34567890	122456780	01224567	990123	4567890	123456	,	45670001	274567900	1234567	800			
C UDIUMI	17. 34 30 10 3	10123430	G1 B1	192.030	12 3430	0 9012 9	130/0901	234307030	123430	0.50			
1 4-111/1/	/												
1841 026 9	543 1	F74											
Begin the	Fourier s	ories CC	moutat	100 1151	ng 33	2	idistant	noints	The	first to	vo points	fol10	hew
by the last	t two		pacae		ng 55			pornear			to poinca,	10110	
-2.27608270	636718750	E+02 -2	.24596	6949462	8900E+0	12 -2.	29598083	496093806	+02 -2	280001	831054688)E+02	
Coefficient	ts of the	e result	ant Fo	urier s	eries	follow.	"Comp	lex ampli	tude"	is the	square r	oot of	the
sum of the	squares	of the					comp.				oquare r		
cosine and	the sine	coeffic	ients.	"Fra	ction d	of fund.	amental"	applies	to thi	s ampli	tude.		
Harmonic		Cosi	ne		Si	ne		Complex		Fracti	on of		
number		oefficie	nt	co	efficie	nt	a	mplitude		fundam	ental		
0	6.77842	291723E-	01 0	.000000	00000E	00 6	.7784229	17236-01		0.0017	35023		
1	-1.91610	339621E+	02 3	.404671	58142E	02 3	.9068197	B114E+02		1.0000	00000		
2	-6.97707	124740E-	01 1	.946887	91157E	00 2	.0681314	6877E+00		0.0052	93644		
3	-4.48135	290160E-	01 1	.316638	54134E	00 1	.3908135	3417E+00		0.0035	59963		
4	-6.08084	711014E-	01 9	. 377363	47343E-	01 1	.1176387	9357E+00		0.0028	60738		
5	-1.18108	420347E+	00 -9	.103685	07384E-	01 1	.4912178	6300E+00		0.0038	16961		
6	-2.00639	9012236+	00 1	.442714	59769E4	00 2	. 4712471	3590E+00		0.0063	25470		
7	-2.68700	924219E+	01 -2	.707373	32929E	01 3	.9578646	6527E+01		0.1013	06558		
8	-1.05687	033595E-	01 -1	.238116	52079E+	00 1	.2426191	1628E+00		0.0031	80641		
9	4.14370	394577E-	02 -5	.499667	32843E-	01 5	. 5152555	2874E-01		0.0014	11699		
10	9.20235	903279E-	02 -2	.711088	46566E-	01 2	.8630114	89038-01		0.0007	32824		
11	-1.25930	341499E+	00 -6	.458616	03802E-	01 1	. 4152675	7268E+00		0.0036	22557		
12	-2,87780	3579928-	03 -2	.181612	41567E-	01 2	.1818022	1550E-01		0.0005	58460		
										1.7	1. A. 7. A.		
								1	,	1.1			1
								1		A 24 1 1			1
						156)		1771 E 1 1	1 8 25	m. 733377	S 7137	1
								ł	HΔ		IF I MAL	N	1
									$\Gamma \Gamma I I$	m U	EF (211)E	1111	1

12 -7 472702036005 01 1 070410	1 3 6 0 0 3 101 3 3	001070-01 0 00079380	,
13 -2.4/3/0293600E-01 -1.8/0418	313506-01 3.101237	293976-01 0.00079380.	
14 -1.56953537363E-02 -1.286630	583B1E-01 1.296168	55749E-01 0.00033177.	L
15 -2.1/602058544E-03 -1.03893/	9422E-UI 1.039165	54938E-01 0.000265988	
16 1.69831324362E-02 -7.825457	01601E-02 8.007625	08293E-02 0.00020496	5
17 -2.55531418938E-01 -1.792510	58073E-01 3.121333	81561E-01 0.00079894	5
10 -1.10912770634E-02 -9.137395	34220E-02 9.204464	02071E-02 0.000235600	2
19 -7.159596987998-02 2.025268	9717E-02 7.440533	63046E-02 0.000190450	2
20 -1.34851172702E-02 -5.076959	4766E-02 5.252999	63570E-02 0.00013445	7
21 -9.364500274648-03 -4 992859	8774F-02 5 079920	128555-02 0.00013002	7
22 3 202541007028-02 -4 672505	44105-02 4 697700	100025-02 0 00011987	
22 2.292341997028-03 -4.077303	44106-02 4.683200	189022-02 0.00011907	-
23 -9.62893368/936-02 -6.293/84	103466-02 1.150339	0.00023444	
24 -1 31300042162E-02 -5.335255	01388E-02 5.494444	99234E-02 0.00014063	<u></u>
25 -2.71964956757E-02 2.395955	2148E-02 3.624513	03136E-02 0.000092774	1
26 -1.17557536431E-02 -2.870592	39255E-02 3.101980	17272E-02 0.000079399)
27 -1.05702698607E-02 -3.082440	6336E-02 3.258641	24958E-02 0.000083409	•
28 -3.12077321869E-03 -3.303491	0660E-02 3.318199	86907E-02 0.00008493	1
29 -4.486525100895-02 -2 447465	4644F-02 5 110674	38157E-02 0.00013081	4
10 -1 211088828815-02 -2 308661	70775-07 3 647957	631616-02 0.00009326	à
30 -11314080020818-02 -31398031	3,043832	0.000000000	, ,
Derived from table: 1) RMS value = 2,77	5H6732E+02 2) THE	= 1.01952/066+01 %	
с			
C VOLTAJE VAN EN EL REACTOR DEL FILTRO D	7A ARMONICA		
c			
c 1 2 1 4	5 6	7 8	
G 345(7000133456300013345(700013345(70001334567000	3345 (3800) 3345 (3800	12245678901224567890	
C 34367890123436789012343678901234367890	23436/030123430/030	15242810201524201020	
C HPIHMINHMAX BUSI BUS2			
C +-***////++++******			
1841.026.543.1 BUS1A F7A			
Begin the Fourier series computation usi	ng 332 equidistan	nt points. The first two po	oints, followed
by the last two, are :		•	
4.7340480804443360E+01 4.9656475067138	570E+01 4.87833137	51220700E+01 3.48935890197	75390E+01
Configurate of the resultant Fourier a	rion follow "Com	play amplitude" is the sou	are root of the
coefficiences of the resultant routier a	ries torrow. com	blex amplicane is the sda	are root or the
sum of the squares of the			
cosine and the sine coefficients. "Fra	ction of fundamental	" applies to this amplitude.	
Harmonic Cosine	Sine	Complex Fraction of	2
number coefficient co	fficient	amplitude fundamenta:	L
0 1.34403992848E-02 0.000000	0000E+00 1.344039	92848E-02 0.001624968	3
1 5.58254992124E+00 -6.103076	4526E+00 8.271179	44320E+00 1.000000000	0
2 1.022897517116-01 -1 787058	87685-01 2.059100	93344E-01 0.024894889	a
3 1 375470476375.01 -2 351514	07175.01 3 027780	160735-01 0.03666695	
3 1.2/34/34/0220-01 -2./31330			
4 2.430419/1/36E-01 -3.4/5998	8848E-01 4.241403	55354E-01 0.0512/930	
5 6.10289074633E-01 4.336497	9617E-01 7.486687	07734E-01 0.09051535	
6 1.55198480018E+00 -1.088514	0666E+00 1.895658	48364E+00 0.229188412	2
7 2.82889395995E+01 2.822624	52523E+01 3,996229	57443E+01 4.83151115	5
8 1.11864599114E-01 1.538415	3705E+00 1.542477	44507E+00 0.186488210)
9 -7.55132472039E-02 8.049119	3968E-01 8.084463	12226E-01 0.09774256	7
10 -1 880983123826-01 4 300323	31678-01 4 693706	423415-01 0.056747728	3
11 7 134360208108+00 1 545310	12128-00 2 404500	012225:00 0 42249232	5
11 5.154200205102,00 1.545519			
12 6.034552/1512E-03 4.998606	23156-01 4.998970	869655-01 0.060438428	
13 8.63575561384E-01 5.072955	19529E-01 1.001554	54901E+UU 0.121089685	,
14 5.91195417665£-02 3.482969	15028E-01 3.532787	20376E-01 0.04271201:	3
15 3.00805544779E-03 2.971068	1408E-01 2.971220	28534E-01 0.03592257	L
16 -1.00230501570E-01 2.139093	84176-01 2.362273	992918-01 0.028560304	1
17 1 522790789175+00 8 885347	94295-01 1 763061	490996+00 0 21315720	
10 5 522790100170.00 0.000001		121000-01 0.04305334	
18 5.576515598926-02 5.926912	84806-01 1.966307		
13 21582828280308-01 -21883238	0314E-01 0.503408	/0/836-01 0.0/9333724	
20 8.77634130989E-02 1.740774	5755E-01 1.949496	78843E-01 0.023569750	b
21 5.61526765464E-02 1.978366	i9979E-01 2.056513	33747E-01 0.02486360	1
22 -5.97491800730E-02 1.978831	90022-01 2.067067	71413E-01 0.024991209	e
23 1.03732881138E+00 4.230888	8000E-01 1,120292	48176E+00 0.135445312	2
24 1.12069625384E-01 3 481662	6129E-01 3.657586	14021E-01 0.04422085	3
2. 3 160122364300-01 -6 372661	79475-01 7 117164	271146-01 0 08604775	5
23 3.109122304396-01 -0.372031			
26 1.112363450446-01 8.291854	21946-02 1.38/40/	9/06/12-01 0.016//400	
27 9.94604384044E-02 1.366422	22686-01 1 690073	48694E-01 0.02043328	•
	22001 01 1.050075		
28 -2.08435433629E-02 1.977575	0033E-01 1.988530	05297E-01 0.02404167	5
28 -2.08435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027E-01 7.705198	0033E-01 1.988530 0315E-02 7.404866	05297E-01 0.02404167 80714E-01 0.08952612	5
28 -2.08435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027E-01 7.705198 30 1.67738814105E-01 2.779044	0033E-01 1.988530 0315E-02 7.404866 9782E-01 3.246031	05297E-01 0.02404167 80714E-01 0.08952612 40041E-01 0.03924508	5
28 -2.08435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027E-01 7.705198 30 1.67738814105E-01 2.779044 Derived from table: 1. BMC value - 2.00	0033E-01 1.988530 00315E-02 7.404866 9782E-01 3.246031	05297E-01 0.02404167 80714E-01 0.08952612 40041E-01 0.03924508 - 4 87354898E+02	5 9 5
28 -2.08435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027E-01 7.705198 30 1.67738814105E-01 2.779044 Derived from table: 1) RMS value = 2.90	0033E-01 1.988530 0315E-02 7.404866 9782E-01 3.246031 973256E+01 2) THD	05297E-01 0.024041675 80714E-01 0.089526125 40041E-01 0.039245085 - 4.87354898E+02 %	5
28 -2.08435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027F.01 7.705198 30 1.67738814105E-01 2.779044 Derived from table: 1) RMS value = 2.90	00335-01 1.988530 00315E-02 7.404866 9782E-01 3.246031 973256E+01 2) THD	05297E-01 0.024041675 80714E-01 0.089526125 40041E-01 0.039245085 - 4.87354898E+02 %	5
28 -2.08435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027F-01 7.705190 30 1.67738814105E-01 2.779044 Derived from table: 1) RMS value = 2.90 C	1.98850 1.98850 1.98850 10315E-02 7.404866 9782E-01 3.246031 173256E+01 2) THD	05297E-01 0.02404167 80714E-01 0.08952612 40041E-01 0.03924508 - 4.87354898E+02 %	5 9 5
28 -2.08435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027E-01 7.705198 30 1.67738814105E-01 2.779044 Derived from table: 1) RMS value = 2.90 C C CORRIENTE FASE "A" EN EL FILTRO DE TA	10033E-01 1.988530 10315E-02 7.404866 19782E-01 3.246031 173256E+01 2) THD	05297E-01 0.024041677 80714E-01 0.08952612 40041E-01 0.03924508 - 4.87354898E+02 %	5
28 -2.08435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027E-01 7.705190 30 1.67738814105E-01 2.779044 Derived from table: 1) RMS value - 2.90 C C CORRIENTE FASE "A" EN EL FILTRO DE 7A .	1.0033E-01 1.988530 10315E-02 7.404866 9782E-01 3.246031 973256E+01 2) THD	05297E-01 0.024041677 80714E-01 0.08952612 40041E-01 0.03924508 - 4.87354898E+02 %	5 9 5
28 -2.08435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027Fc-01 7.705190 30 1.67738814105E-01 2.779044 Derived from table: 1) RMS value - 2.90 C CORRIENTE FASE "A" EN EL FILTRO DE 7A - C C ORRIENTE FASE "A" EN EL FILTRO DE 7A - C 1 2 3 4	100338-01 1.988530 10315E-02 7.404866 19782E-01 3.246031 173256E+01 2) THD SRMONICA	05297E-01 0.02404167; 80714E-01 0.08952612; 40041E-01 0.03924508; - 4.87354898E+02 %	5
28 -2.08435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027E-01 7.705190 30 1.67738814105E-01 2.779044 Derived from table: 1) RMS value - 2.90 C C CORRIENTE FASE "A" EN EL FILTRO DE 7A . C 1 2 3 4 C 1456270012345578011245578011245578011245780112457801140000000000000000000000000000000000	10033E-01 1.988530 1033E5-02 7.404863 19782E-01 3.246031 173256E+01 2) THD IRMONICA 5 66 2345678901234567890	05297E-01 0.02401467 80714E-01 0.08952612 40041E-01 0.03924508 - 4.87354898E+02 %	5
28 -2.08435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027E-01 7.705190 30 1.67738814105E-01 2.779044 Derived from table: 1) RMS value - 2.90 C CORRIENTE FASE "A" EN EL FILTRO DE 7A C CORRIENTE FASE "A" EN EL FILTRO DE 7A 2 3 4 3 5 346679901234567890123456789012345678901234567890	0033E-01 1.988530 10335E-02 7.404865 19782E-01 3.246031 173256E+01 21 THD IRMONICA 5 6 2345678901234567890	05297E-01 0.024041677 80714E-01 0.08952612 40041E-01 0.03924508 - 4.87354898E+02 %	5
28 -2.08435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027F-01 7.705190 30 1.67738814105E-01 2.779044 Derived from table: 1) RMS value - 2.90 C C CORRIENTE FASE "A" EN EL FILTRO DE 7A . C 1 2 3456769012345678901234567890 2 HPIHMININAX BUSI BUS2	00315-01 1:98530 10315-02 7:40486 9782E-01 3:246031 73256E-01 2:110 INMONICA 5 2345678901234567890	05297E-01 0.02401467 80714E-01 0.08952612 40041E-01 0.03924508 - 4.87354898E+02 % 7 8 12345678901234567890	5
28 -2.08435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027F-01 7.705190 30 1.67738814105E-01 2.779044 Derived from table: 1) RMS value - 2.90 C CORRIENTE FASE "A" EN EL FILTRO DE TA C 1 2 34 C 34567690123456789012345678901234567890 C HPTHMINIMAX BUS1 BUS2 C 1	10033E-01 1.988530 10315E-02 7.404866 9782E-01 3.246031 973256E+01 2)THC IRMONICA 5 6 2345678901234567890	05297E-01 0.02404167 80714E-01 0.08952612 40041E-01 0.03924508 - 4.87354898E+02 % 7 8 12345678901234567890	5
28 -2.08435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027F-01 7.705190 30 1.67738814105E-01 2.779044 Derived from table: 1) RMS value - 2.90 C C CORRIENTE FASE "A" EN EL FILTRO DE 7A . C 1 2 3 C 34567890123456789012345678901234567890 2 HP1HMINHMAX BUSI BUS2 3 +-**////****	00315-01 1:98530 0315-02 7:04866 097825-01 3:246031 7732562+01 2:710 INMONICA 5 6 2345678901234567890	05297E-01 0.02401467 80714E-01 0.08952612 40041E-01 0.03924508 - 4.87354898E+02 % 7 8 12345678901234567890	5
28 -2.08435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027F-01 7.705190 30 1.67738814105E-01 2.779044 Derived from table: 1) RMS value - 2.90 C C CORRIENTE FASE "A" EN EL FILTRO DE 7A . C 1 2 3 C 345670890123456789012345678901234567890 C HPTIMINIMAX BUS1 BUS2 C +	00315-01 1.98530 10315-02 7.40486 97828-01 3.246031 1732568+01 2)THC IRMONICA 5 6 2345678901234567890	05297E-01 0.024041673 80714E-01 0.089526123 40041E-01 0.039245083 - 4.87354898E+02 % 7 8 12345678901234567890 nt points. The first two po	o o o ints, followed
28 -2.00435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027E-01 7.705190 30 1.67738014105E-01 2.779044 Derived from table: 1) RMS value - 2.90 C CORRIENTE FASE "A" EN EL FILTRO DE 7A. C 1 2 3 4 5 C 34567090123456709012345670901234567090 C HPINNIMMAX BUSI BUS2 C +	0033F-01 1:98530 1033F-02 7:40486 9782E-01 3:246031 773256E+01 2:1THD RMONICA 5 2345678901234567890	05297E-01 0.024041677 80714E-01 0.089526127 40041E-01 0.039245089 - 4.87354898E+02 % 7 8 12345678901234567890	s s sints, followed
28 -2.08435433629E-02 1.977575 29 7.36466914027F-01 7.705190 30 1.67738814105E-01 2.779044 Derived from table: 1) RMS value - 2.90 C CORRIENTE FASE "A" EN EL FILTRO DE 7A . C 1 2 3 C 14567890123456789012345678901234567890 C HPIHMINHMAX BUSI BUS2 C I	10035E-01 1:088550 10315E-02 7:404866 19782E-01 3:246031 173256E+01 2:1110 REMONICA 5 6 23456789001234567890	05297E-01 0.02401467 80714E-01 0.08952612 40041E-01 0.03924508 - 4.87354898E+02 % 7 8 12345678901234567890	s s s sints, followed


of the

6.260345077514648	0E+01 8.266	3574218750000E+01	2.9832788467407220E+01 4	.7243568420410160E+01
Coefficients of t	he resultant	Fourier series fo	llow. "Complex amplitude"	is the square root
sum of the square	s of the			-
cosine and the si	ne coefficien	ts. "Fraction of	fundamental" applies to th:	is amplitude.
Harmonic	Cosine	Sine	Complex	Fraction of
number	coefficient	coefficient	amplitude	fundamental
0 1.369	62520430E-01	0.0000000000000000000000000000000000000	1.36962520430E-01	0.000767016
1 1.556	81171348E+02	8.74585165938E+01	1,78565448049E+02	1.00000000
2 2.051	41049057E+00	6.31812720542E-01	2.14650234443E+00	0.012020816
3 2.077	30508006E+00	6.06026190205E-01	2.16390021462E+00	0.012118247
4 1.986	82128152E+00	1.10037170975E+00	2.27118398733E+00	0.012719056
5 -1.805	26636632E+00	2.68451114764E+00	3.23505591222E+00	0.018116920
6 4.229	24472692E+00	5.48513963254E+00	6.92627372752E+00	0.038788432
7 -0.635	54275880E+01	9.23590948889E+01	1.26441537015E+02	0.708096322
8 -4.255	73184902E+00	3.65879044465E-01	4.27143079611E+00	0.023920814
9 -1,990	79010977E+00	-1.94016752141E-01	2.00022192801E+00	0.011201618
10 -9.672	27696743E-01	-4.47287220605E-01	1.06564312744E+00	0.005967801
11 -2.980	59615566E+00	6.31706524023E+00	6.98493140213E+00	0.039116926
12 -9.261	68057396E-01	-1.54097552220E-02	9.26296243702E-01	0.005187433
13 -8.415	63981950E-01	1.44140719855E+00	1.66909695577E+00	0.009347256
14 -5.530	93333465E-01	6.43848605079E-02	5.56828201321E-01	0.003118342
15 -4.422	07220495E-01	-2,41475327361E-02	4.42866039786E-01	0.002480133
16 -3.019	84021996E-01	-1.66781520863E-01	3.44978876516E-01	0.001931946
17 -1.129	08745105E+00	1.95562036160E+00	2,25816063884E+00	0.012646123
18 -4.841	36216256E-01	4.49085684753E-02	4.86214618675E-01	0.002722893
19 4.514	82059584£-01	5.77891734330E-01	7.33345012074E-01	0.004106870
20 -1.951	52167700E-01	7.21263651896E-02	2.08054274442E-01	0.001165143
21 -2.110	54785627E-01	3.58003362065E-02	2.14069583567E-01	0.001198830
22 -2.026	90844560E-01	-8,12267331211E-02	2.18360620631E-01	0.001222860
23 -3.974	29768279E-01	9.66549288815E-01	1.04506839414E+00	0.005852579
24 -3.2071	B1829525E-01	8.30683142380E-02	3.31362832834E-01	0.001855694
25 5.525	508253826-01	2.50216485108E-01	6.06564674251E-01	0.003396876
26 -7.3776	833849926-02	7.35972598035E-02	1.04210363603E-01	0.000583598
27 -1.144	35734297E-01	6.16247681052E-02	1.29973648592E-01	0.000727877
28 -1.584	352949796-01	-3.34700457812E-02	1.61932043338E-01	0.000906850
29 -5.8419	93704443E-02	5.32110099849E-01	5.35307370773E-01	0.002997822
30 -2.043	70490340E-01	1.05007929083E-01	2.29769368046E-01	0.001286752
Derived from table	e: 1) RMS val	ue = 1.54968415E+0	2 2) THD = 7.11571273E+01	1

5.4.4 Cuarto caso. Cálculo de los filtros para 5^a y 7^a armónica con el método propuesto en el capítulo cuatro y simulación del sistema eléctrico con los filtros

a) Obtención de parámetros del filtro de 5ª armónica

Corriente de 5ª armónica que se desea filtrar:

$$I_{max} = 106.3738 \text{ A}$$

Factor de proporción entre la corriente de 5^a armónica y la corriente del orden de sintonía (valor propuesto):

Orden de sintonia del filtro:

$$-\frac{R\sqrt{1-a^2}}{aX_{LI}} + \sqrt{\frac{R^2(1-a^2)}{a^2X_{LI}^2}} + 4\frac{X_{CI}}{X_{LI}}$$



$$n_{x} = \frac{-\frac{0.005877\sqrt{1 - 0.20^{2}}}{0.20 \times 0.03526} + \sqrt{\frac{0.005877^{2}(1 - 0.20^{2})}{0.20^{2} \times 0.03526^{2}} + 4\frac{0.8815}{0.03526}}{2} = 4.608$$

Frecuencia de sintonía del filtro:

 $f_5 = 60 \times 4.6084 = 276.504 \text{ Hz}$

Porcentaje de la desviación entre la sintonía del filtro y la 5ª armónica:

$$p_5 = \frac{300 - 276.504}{300} \times 100 = 7.83\%$$

Reactancia inductiva a frecuencia fundamental por fase (en estrella):

$$X_{L1} = \frac{X_{C1}}{n_X^2} = \frac{0.8815}{4.6084^2} = 0.04151 \,\Omega$$

요즘 물건지 문서 결정 물건을 걸 못 없는 것은 것은 것이다.

Inductancia del reactor en serie:

$$L = \frac{X_{L1}}{120\pi} = \frac{0.04151}{120\pi} = 0.1101 \text{ mH}$$

Factor de calidad del reactor (valor supuesto):

Q = 30

Resistencia del reactor:

$$R = \frac{n_X X_{L1}}{Q} = \frac{4.6084 \times 0.04151}{30} = 6.376 \text{ m}\Omega = 0.006376 \Omega$$

Corriente de componente fundamental en el filtro:

$$I_1 = \frac{480}{\sqrt{3}\sqrt{0.006376^2 + (0.04151 - 0.8815)^2}} = 329.9088 \text{ A}$$

Tensión en el banco de capacitores:

 $V_{C} = 329.9088 \times 0.8815 = 290.68 V$

Aunque la tensión en el banco de capacitores queda dentro del 10% máximo permitido, se tendría una tensión permanente del 104% del valor nominal y de acuerdo a la gráfica de la figura 3.27 este voltaje adicional disminuiría la vida útil de los capacitores al 50%. Para que la vida útil del banco de capacitores no se vea disminuida se considera el uso de capacitores con tensión nominal o de diseño de 600 V.



Potencia de operación del banco de capacitores:

$$Q_{C \text{ oper}} = 329.9088^2 \times 0.8815 = 95.942 \text{ kVAR}$$

Potencia de discito o nominal del banco de capacitores:

الم المراجع المراجع المراجع . المراجع ا

$$Q_{C \text{ nom}} = \frac{600^2}{480^2} \times 95.942 = 149.909 \text{ kVAR}$$

Tensión en el reactor:

$$V_{L} = 329.9088 \times \sqrt{0.006376^{2} + 0.04151^{2}} + 106.3738 \times \sqrt{0.006376^{2} + (5 \times 0.04151)^{2}} = 35.94 \text{ V}$$

Potencia del reactor:

$$Q_1 = 329.9088^2 \times 0.04151 + 106.3738^2 \times 5 \times 0.04151 = 2.536 \text{ kVAR}$$

Potencia del filtro:

$$Q_F = |2.536 - 95.942| = 93.406 \text{ kVAR}$$

b) Obtención de parámetros del filtro de 7ª armónica

Corriente de 7^ª armónica que se desea filtrar:

$$1_{max} = 56.918 \text{ A}$$

Factor de proporción entre la corriente de 7^a armónica y la corriente del orden de sintonía (valor propuesto):

$$a = 0.15$$

Orden de sintonía del filtro:

$$n_{X} = \frac{\frac{R\sqrt{1-a^{2}}}{aX_{L1}} + \sqrt{\frac{R^{2}(1-a^{2})}{a^{2}X_{L1}^{2}} + 4\frac{X_{C1}}{X_{L1}}}{2}$$

$$n_{\rm X} = \frac{\frac{0.01047\sqrt{1-0.15^2}}{0.15\times0.04488} + \sqrt{\frac{0.01047^2(1-0.15^2)}{0.15^2\times0.04488^2} + 4\frac{2.1995}{0.04488}}{2} = 6.273$$

TE	313	CON
FALLA	DĽ	ORIGEN

Frecuencia de sintonía del filtro:

$$f_7 = 60 \times 6.2731 = 376.38$$
 Hz

Porcentaje de la desviación entre la sintonía del filtro y la 7ª armónica:

$$\mathbf{p}_7 = \frac{420 - 376.38}{420} \times 100 = 10.38\%$$

Reactancia inductiva a frecuencia fundamental por fase (en estrella):

$$X_{L1} = \frac{X_{C1}}{n_X^2} = \frac{2.1995}{6.2731^2} = 0.05589 \ \Omega$$

Inductancia del reactor en serie:

$$L = \frac{X_{L1}}{120\pi} = \frac{0.05589}{120\pi} = 0.1483 \,\text{mH}$$

Factor de calidad del reactor (valor supuesto):

Q = 30

Resistencia del reactor:

$$R = \frac{n_{sint} X_{L1}}{Q} = \frac{6.2731 \times 0.05589}{30} = 0.01168 \ \Omega$$

Corriente de componente fundamental en el filtro:

$$I_1 = \frac{480}{\sqrt{3}\sqrt{0.01168^2 + (0.05589 - 2.1995)^2}} = 129.2193 \text{ A}$$

Tensión en el banco de capacitores:

$$V_{\rm C} = 129.2193 \times 2.1995 = 284.21 \text{ V}$$

Aunque la tensión en el banco de capacitores queda dentro del 10% máximo permitido, se tendría una tensión permanente del 102% del valor nominal y de acuerdo a la gráfica de la figura 3.27 este voltaje adicional disminuiría la vida útil de los capacitores al 75%. Para que la vida útil del banco de capacitores no se vea disminuida se considera el uso de capacitores de 600 V.

Potencia de operación del banco de capacitores:

$$Q_{c} = 129.2193^{2} \times 2.1995 = 36.726 \text{ kVAR}$$

161

Potencia de diseño o nominal del banco de capacitores:

1	TESIS COL
	FALLA DE ORIGEN

 $Q_{C-nom} = \frac{600^2}{480^2} \times 36.726 = 57.384 \text{ kVAR}$

Tensión en el reactor:

$$V_{L} = 129.2193 \times \sqrt{0.01168^{2} + 0.05589^{2}} + 56.918 \times \sqrt{0.01168^{2} + (5 \times 0.05589)^{2}} = 23.29$$

Potencia del reactor:

$$Q_1 = 129.2193^2 \times 0.05589 + 56.918^2 \times 7 \times 0.05589 = 2.2 \text{ kVAR}$$

Potencia del filtro:

$$Q_F = |2.2 - 36.726| = 34.526 \text{ kVAR}$$

c) Análisis de los resultados de la simulación

Se realizó la simulación del sistema eléctrico con los valores calculados para los elementos del filtro. El código utilizado para realizar la simulación es igual al código anterior en la sección donde se especifica el cálculo de la serie de Fourier, la diferencia radica en la parte en donde se implementa el filtro, misma que se muestra a continuación.

С																	
с	FILTRO	DE DE	5A.	ARM	ONICA	TABLER	o BUS	1.	ORDEN	DE	SINTON	IA:	4.6	5084			
c																	
č		1			2	3			4		5		6		7		8
ċ	345676	901	2345	6789	01234	5678901	23456	789	012345	6789	9012345	678	9012	23456	7890	12345	67890
с	NOMBR.	NO	DO R	EFER	ENCIA	S RES	IND		CAP								
C	NOD-I	NOD	- F	BRA	NCH	[0HM]	(MH	! .	[UF]								
c							LOHW	1 1	OHM J								
C	BUSIA	F5A			• / / / /	0.006	30.11	01									з
	BUS1B	F5B	в	USIA	F5A	0.000											
	BUSIC	F5C	6	US1B	F5B												
	F5A							3	008.8								2
	F5B		F	5A													
<i>.</i> •	P DC		r	38													
č																	
ċ	FILTRO	DE DE	7A.	ARMO	ONICA	TABLER	O BUS	1.	ORDEN	DE	SINTON	IA:	6.2	688			
Ç																	
C C		,			~	2					<u>د</u>		٤		-		
è	345678	19013	245	6789	e 01234	5678901	23456	789	12345	6789	012345	6789	2012	3456	7890	12345	67890
č	NOMBR.	NOI	ЮR	EFER	ENCIA	S RES	IND		CAP			0.0.					
С	NOD-I	NOD	÷F –	BRAD	NCH	[OHM]	[MH	ł	UF]								
С							[OHM	1 [0	(MHC								
с	++++++		••	••••	•////	//+++++	*	*									-
	BUSIA	1 /A	n	11915	575	0.011	00.14	53									د
	BUSIC	F7C	B	USIA	F78												
	F7A							1	205.9								2
	F7B		F	7 N													
	E 1 M							- 1	203.9								

Se analizaron los valores de voltaje y de corriente en los elementos del filtro de quinta armónica. El análisis de espectro del voltaje al neutro en el banco de capacitores del filtro muestra que la tensión aumentó ligeramente subiendo a 284.47 V (contra 282.87 V en el caso de sintonía a 300 Hz),

TE	SIS	CON
FALLA	DE	ORIGEN

mientras que el análisis de espectro de la corriente en la fase A del filtro muestra que la corriente eficaz total a través del filtro disminuyó a 338.61 A (contra 346.69 A en el caso de sintonía a 300 Hz). La tensión desarrollada en el reactor es de 26.35 V

Comparando el contenido de la 5^a armónica en el filtro para los casos de sintonía a 300 y 261.46 Hz (n = 4.6084) se observa una disminución notable en el contenido de 5^a armónica, desde 134.124 A hasta 104.97 A. Se mantuvo la componente de 5^a armónica de corriente dentro del valor esperado de 106.3738 A. Se presentan a continuación los análisis de espectro generados por el ATP para el voltaje en el banco de capacitores y la corriente de la fase A del filtro de 5^a armónica.

```
VOLTAJE VAN EN EL BANCO DE CAPACITORES DEL FILTRO DE 5A ARMONICA
С
    HPIHMINHMAX
                         BUS1 BUS2
C +-***////++++
 1841.026.543.1
                         F5A
                                                                                                   followed
Begin the Fourier series computation using
                                            332
                                                    equidistant points.
                                                                           The first two points,
by the last two,
                  are :
-1.6868214416503900E+02
                         -1,6256346130371100E+02 -1.9034922790527340E+02 -1.8380368041992190E+02
                                                          "Complex amplitude"
Coefficients of the resultant Fourier series follow.
                                                                                is the square root of the
sum of the squares of the
cosine and the sine coefficients.
                                     "Fraction of fundamental"
                                                                applies to this amplitude.
                                                                Complex
 Harmonic
                       Cosine
                                              Sine
                                                                                Fraction of
   number
                  coefficient
                                       coefficient
                                                              amplitude
                                                                                fundamental
            7.00342754643E-01
                                 0.0000000000E+00
                                                     7.00342754643E-01
        0
                                                                                0.001744597
           -1.97542984157E+02
                                 3.49466717295E+02
                                                     4.01435196621E+02
                                                                                1.000000000
                                                     2.00534406164E+00
           -7.35320288945E-01
                                 1.86566580025E+00
                                                                                0.004995437
           -5.25458709257E-01
                                 1.08474566371E+00
                                                     1.20531324148E+00
                                                                                0.003002510
           -1.40841728793E+00
                                 1.70980996809E-01
                                                     1.41875782226E+00
                                                                                0.003534214
            2.60191915614E+01
                                 2.31370749509E+00
                                                     2.61218600387E+01
                                                                                0.065071175
        6
            8.10149440873E-01
                                 1.58338688201E+00
                                                     1.77861073163E+00
                                                                                0.004430630
           -3.22414964775E-01
                                -2.67203696679E+00
                                                     2.69141839211E+00
                                                                                0.006704490
        8
            5.99008383219E-02
                                 3.79043543812E-01
                                                      3.83747467141E-01
                                                                                0.000955939
        q
            7.39955701601E-02
                                 3.33668619126E-01
                                                      3.41774913931E-01
                                                                                0.000851383
       10
            6.60313668563E-02
                                 3.30095539693E-01
                                                      3.36635124035E-01
                                                                                0.000838579
           -5.56194684453E-02
                                -4.90688233854E-02
                                                     7.41705783891E-02
                                                                                0.000184764
       11
       12
            4.79054058539E-02
                                 2.46559956350E-01
                                                     2.51170738713E-01
                                                                                0.000625682
           -2.30807415162E-03
                                 6.34847402541E-02
                                                     6.35266829877E-02
                                                                                0.000158249
       13
       14
            3.65523053538E-02
                                 1.98733619161E-01
                                                     2.02067123530E-01
                                                                                0.000503362
            3.69768735540E-02
                                 1.89076814084E-01
                                                     1.92658586110E-01
                                                                                0.000479925
       15
            3.55583724241E-02
                                 1.87980342981E-01
                                                     1.91313897030E-01
                                                                                0.000476575
       16
       17
            4.08043275472E-02
                                 6.839693418996-02
                                                      7.96437929355E-02
                                                                                0.000198398
            3.77681451921E-02
                                 1.55281332942E-01
                                                     1.59808401379E-01
                                                                                0.000398093
       18
            1.89076174839E-03
                                 1.14250259113E-01
                                                                                0.000284643
       19
                                                     1.14265903433E-01
       20
21
22
23
            3.02368148452E-02
                                 1.38585713912E-01
                                                     1.41845920183E-01
                                                                                0.000353347
            3.06007927230E-02
                                 1.32629854898E-01
                                                     1.36114242185E-01
                                                                                0.000339069
            2 98391258651E-02
                                 1.31653411292E-01
                                                     1.34992570674E-01
                                                                                0.000336275
                                                     9.24779141574E-02
            4.25569396113E-02
                                 8.21040285115E-02
                                                                                0.000230368
       24
            3.38418340195E-02
                                 1.14770606228E-01
                                                     1.19656014407E-01
                                                                                0.000298071
       25
            1.05715916672E-02
                                 9.68389334954E-02
                                                     9.74142576367E-02
                                                                                0.000242665
       26
            2.78632970690E-02
                                 1.05764964626E-01
                                                     1.09373630578E-01
                                                                                0.000272457
       27
            2.86424737368E-02
                                 1.01631114930E-01
                                                     1.055901265456-01
                                                                                0.000263032
       28
            2. R3613464576E-02
                                 1.01066895213E-01
                                                     1.04970868725E-01
                                                                                0.000261489
       29
            3.68882443177E-02
                                 7.686176892286-02
                                                     8.52553464058E-02
                                                                                0.000212376
            3.14520782182E-02
                                 9.11674989370E-02
                                                     9.644037581158-02
                                                                                0.000240239
       30
Derived from table:

    RMS value = 2.84475125E+02

                                                       2) THD = 6.59541446E+00 %
 VOLTAJE VAN EN EL REACTOR DEL FILTRO DE 5A ARMONICA
с
c
C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
c
   HPIHMINHMAX
                         BUS1
                                BUS2
  +-+++////++++
 1841.026.543.1
                        BUSIA F5A
Begin the Fourier series computation using 332
                                                   equidistant points.
                                                                          The first two points.
                                                                                                  followed
by the last two.
                  ATO .
                        -1.0868329048156740E+01 -2.2735311508178710E+01
                                                                            -2.3597293853759760E+01
-2.3134558200836180E+00
Coefficients of the resultant Fourier series follow.
                                                         "Complex amplitude"
                                                                               is the square root of the
sum of the squares of the
```

DE ORIGEN

FALLA DE OLIGEN

	the sine coefficies	and "Exaction of	fundamental# applies	to this amplitude.
cosine and	che sine coefficie	nes, reaction of	Complex	Fraction of
narmonic	coefficient	coefficient	amplitude	fundamental
0	6.20392630079E-02	0.0000000000E+00	6.20392630079E-02	0.003223869
ĩ	1.20086176845E+01	-1.50370978957E+01	1,92437317540E+01	1.00000000
ž	2.95523431683E-01	-7.95086800536E-02	3.06032235030E-01	0.015902957
3	3.83351157247E-01	-5.59134352457E-02	3.87407307628E-01	0.020131610
4	1.21969201713E+00	4.39066344549E-01	1.29631318422E+00	0.067362880
5	-3.06789360252E+01	-3.02248319767E+00	3.08274637347E+01	1.601948319
6	-1.14935189756E+00	-1.95267339251E+00	2.26582063770E+00	0.117743308
7	8.03635550221E-01	7.17425355947E+00	7.21912350865E+00	0.375141558
8	4.42456530423E-02	-1.00478366564E-01	1.09788797063E-01	0.005/051/2
9	-3.75281286084E-02	-1.02082313705E-01	1.08/61938233E-01	0.003651611
10	-4.05741768054E-02	-2.55980096114E=01	2.591/5/5//982-01	0.015466661
11	5.95593938904E-01	1.746423233498+00	1.045190031012400	0.005816507
12	-1.68272439175E-03	-1.119186577406-01	1.119313071116-01	0.065743332
13	3.640066003826-01	1.211650217356+00	5 21422220049F=02	0.002709569
14	3.019647869536-02	-1.411118200138-02	6 426221421215-02	0.003340943
15	3.191639704306-02	-1 437360085228-01	1 96857959771E-01	0.010229719
10	-6 616071300628-02	1 10542937700E+00	1 30710530922E+00	0.067923692
19	-3 126253427676-02	-3 885643394976-02	4 98715200159E-02	0.002591572
10	5 719426789065-01	5. 363182131958-01	7.84063552118E-01	0.040743841
20	7 288951523685-02	-2 57336427158E-02	7.72987826481E-02	0.004016829
20	5 767077459925-02	-4 448001520198-02	7.28383700406E-02	0.003785044
21	6 782228311325-02	-1 699296897936-01	1.82964372378E-01	0.009507739
23	-2 76563429086F-01	9.51457257492E-01	9,90837142593E-01	0.051488825
24	-6.16655977238E-02	-2.88419633621E-02	6.80771973073E-02	0.003537630
25	6. 34573490118E-01	3.80042358648E-01	7.39672703787E-01	0.038437072
26	1.00995939221E-01	-1.51148617172E-02	1.06926298227E-01	0.005556422
27	6.92309768925E-02	-3.48296081306E-02	7,74985791097E-02	0.004027212
28	7.49389859712E-02	-1.62251021333E-01	1.78721139046E-01	0.009287239
29	-2.92965302219E-01	6.93002979776E-01	7.52384076308E-01	0.039097618
30	-7.60739636720E-02	-4.77900602149E-02	8.98395113751E-02	0.004668508
Derived fro	m table: 1) RMS v	alue = 2.63582754E+0	1 2) THD = 1.65896	779E+02 %
с				
C CORRIENTE	FASE "A" EN EL FI	LTRO DE 5A ARMONICA		
ċ				
C 1	2	3 4	567	8
C 345678901	2345678901234567890	01234567890123456789	012245678901224567890	1774567890
		01231301030100130100	0123430/030123430/030	123430,030
C HPIHMIN	HMAX BUS1	BUS2	012343070301234307030	1234301030
C HPIHMIN C +-***////	HMAX BUSI	BUS2	0123430/030123430/030	1234301030
C HPIHMIN C +-***//// 1941.026.5	HMAX BUS1 ++++	BUS2 F5A	012343070301234307030	1234301030
C HPIHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the F	HMAX BUS1 ++++ 43.1 BUS1A ourier series comp	BUS2 F5A utation using 332	equidistant points.	The first two points, followe
C HPIHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the F by the last	HMAX BUS1 ++++ BUS1A 43.1 BUS1A ourier series comp two, are :	BUS2 F5A utation using 332	equidistant points.	The first two points, followe
C HPIHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the F by the last 3.702209167	HMAX BUS1 ++++ +43.1 BUS1A 'ourier series comp two, are : 4804690E+02 3.66	BUS2 F5A utation using 332 17434692382810E+02	equidistant points.	The first two points, followe 02 3.8806158447265620E+02
C HPIHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the F by the last 3.702209167 Coefficient	HMAX BUS1 ++++ BUS1A 'ourier series comp two, are: 4804690E+02 3.66 s.s of the resultant	BUS2 F5A utation using 332 17434692382810E+02 Fourier series fol	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli	The first two points, followe 02 3.0806158447265620E+02 tude" is the square root of th
C HPIHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the F by the last 3.702209167 Coefficient sum of the	HMAX BUSI ++++ BUSIA ourier series comp two, are: 4804690E+02 3.66 s of the resultant squarce of the	BUS2 F5A utation using 332 17434692382810E+02 Fourier series fol	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli	The first two points, followe 02 3.8806158447265620E+02 tude" is the square root of th
C HPIHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the f by the last 3.702209167 Coefficient sum of the cosine and	HMAX BUS1 ++++ BUS1A ourier series comp two, are: 4804690E+02 3.66 s of the resultant squares of the the sine coefficient	BUS2 F5A utation using 332 17434692382810E+02 Fourier series fol nts. "Fraction of	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies	The first two points, followe 02 3.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude.
C HPIHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the B by the last 3.702209167 Coefficient sum of the cosine and Harmonic	NMAX BUS1 ++++ US1A ouriet series comp two, are : 4804690E+02 3.66 s of the resultant squares of the the sine coefficient Cosine	BUS2 F5A utation using 332 17434692382810E+02 Fourier series fol nts. "Fraction of Sine	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies Complex	The first two points, followe 02 3.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of
C HPIHMID C +-**//// 1941.026.5 Begin the F by the last 3.702209167 Coefficient sum of the cosine and Harmonic number	MMAX BUSI **** BUSIA **** BUSIA **** BUSIA **** BUSIA **** Comp **** Comp **** Comp **** Comp ***** BUSIAN ***** Comp ************************************	BUS2 F5A utation using 332 17434692382810E+02 - Fourier series fol nts. "Fraction of Sine coefficient	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies Complex amplitude	The first two points, followe 02 3.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamenta
C HPIHMID C +-**//// 1941.026.5 Begin the F by the last 3.702209167 Coefficient sum of the cosine and Harmonic number 0	MMAX BUS1 +++ BUS1A +0urier series comp two, are: 4804690E+02 3.66 s of the resultant squares of the the sine coefficient Cosine coefficient -1.598832780348+00	hUS2 F5A utation using 332 17434692382810E+02 - Fourier series fol nts. "Fraction of Sine coefficient 0.0000000000E+00	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies Complex amplitude 1.598822780348+00	The first two points, followe 02 J.8806158447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518338 0.003518338
C HPIHMID C +-**//// 1941.026.5 Begin the B by the last 3.702209167 Coefficient sum of the cosine and Harmonic number 0 1	<pre>MMAX BUSI **** BUSIA duricg series comp two, are: 4804690E*02 3.66 s of the resultant squares of the Cosine Cosine Cosine coefficient -1.5983278034E*00 3.9480307324E*02</pre>	005 1415 153 17434692382810E+02 Fourier series fol nts. "Fraction of Coefficient 0.00000000000E+00 2.250080638980E+02	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies Complex amplitude 1.5980376034E+00 4.54402620416E+00	The first two points, followe 02 3.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003010000 1.00006614
C HPIHMID C +-**//// 1941.026.5 Begin the 1 by the last 3.702209167 Coefficient sum of the cosine and Harmonic number 0 1 2	MMAX BUS1 **** BUS1A *0uriet series comp two, are : 4804590c2 3.66 s of the resultant squares of the Cosine coefficient -1.5983278034E.00 1.0522593975E.00	h053 -1 F5A utation using 332 T434692382810E+02 - Fourier series fol- nts. "Fraction of Sine Coefficient 0.000000000E+00 2.25008063890E+02 1.733554535284E+00	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies complex amplitude 1.59883278034E+00 4.5440620416F+02 2.02963062075E+00 1.0504842688+-00	The first two points, followe 02 3.8806158447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.000000000 0.004466414 0.004300198
C HPIHMID C +-**//// 1941.026.5 Begin the J by the Last 3.702209167 Coefficient sum of the cosine and Harmonic number 1 2 3 3	MMAX BUS1 ****	0053 -0053 -0000 F5A 17434692382810E+02 -Fourier series follow to coefficient 0.0000000000000 2.2508064809E+02 1.7355451538E+00 1.7355451538E+00 0.48563265571E+00 0.6853265571E+00 0.685326571E+00 0.6900002900E+00 0.6500002900E+00 0.6500002900E+00 0.5500002900E+00 0.5500002900E+00 0.5500002900E+00 0.5500002900E+00 0.5500002900E+00 0.5500002900E+00 0.5500002900E+00 0.5500000000000 0.5500000000000 0.550000000000	equidistant points. 1.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies complex amplitude 1.5983278034E+00 4.59420620416E+02 2.0265062075E+00 1.9540942448E+00 6.027942448E+00	The first two points, followe 02 3.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466414 0.004300198 0.015144511
C HPIHMID C +-**//// 1941.026.5 Begin the F by the last 3.702209167 Coefficient sum of the cosine and Harmonic 0 1 2 3 4	MMAX BUS1 ***+ BUS1A *ouriet series comp two, are : 4804590c2 3.66 s of the resultant squares of the Cosine coefficient -1.5983278034E*00 1.632293975E*00 5.034667059139E*01 -2.41340509189E*01 -2.41340509189E*01	h052 -+++++ F5A utation using 332 T434692382810E+02 - Fourier series fol- nts. "Fraction of Sine Coefficient 0.000000000E+00 2.2508063890E+02 1.7355451539E+00 1.88653662970E+00 0.536136629765707	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies Complex amplitude 1.59983278034E+00 4.54420620416E+00 6.097286334931E+00 1.484346342F+02	The first two points, followe 02 3.8806158447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466414 0.004300198 0.015344511 0.326690383
C HPTHMID C +-**'//// 1941.026.5 Begin the J by the Last 3.702209167 Coefficient sum of the cosine and Harmonic number 0 1 2 3 4 4 5	MMAX BUS1 ****	1003 1013 1014 1014 1014 1014 1014 1014 1014 1014 1014 1014 1015	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies complex amplitude 1.5983278034E+00 4.5984278034E+00 5.9409842488E+00 1.95409842488E+00 1.95409842488E+00 1.954034234981E+00 1.48454846323491E+00 1.4845484632469E+00	The first two points, followe 02 3.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466414 0.004300198 0.015344511 0.326690383 0.020525681
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the Jast 3.702209167 Coefficient sum of the cosine and Harmonic 1 2 3 4 5 6 6	HMAX BUS1 43.1 BUS1A Jouriet series comp busia 43.1 BUS1A Jouriet series comp busia t804590:2 3.66 s of the resultant cosine squares of the Cosine coefficient -1.5983278034E:00 1.652239375E:00 5.09466706949E:01 2.41840508189E:00 9.9665871113E:00 7.633798073E:00 7.633798073E:02	h052 	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies Complex amplitude 1.59883278034E+00 4.54420620416E+02 2.0260162075E+00 1.9540942480E+00 1.9540942480E+00 1.42729257876E+00 2.4678637512E+01	The first two points, followe 02 3.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466144 0.00430418 0.23650303 0.20525681 0.00432821
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the F by the last 3.702209167 Coefficient Harmonic number 1 2 3 4 4 5 6 7 7 7	MMAX BUS1 ****	10037 10037 1004	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" appliesa complex amplitude 1.5983278034E+00 4.5983278034E+00 4.5984278034E+00 5.960562075E+00 1.95409842488E+00 1.95409842488E+00 1.4845484637491E+00 2.32729257876E+00 2.46878637512E+01 4.0173169138E-01	The first two points, followe 02 3.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.00446614 0.00446614 0.326590383 0.20525681 0.006884053
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the Jast Sum of the cosine and Harmonic 1 2 3 4 5 6 7 8 8 8 8 7 8 8 8 7 8 8 8 7 8 8 8 7 8 8 8 7 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8 8	HMAX BUS1 43.1 BUS1A Jouriet series comp busia 43.1 BUS1A Jouriet series comp busia t804590c2 3.66 s of the resultant cosine squares of the Cosine -1.5983278034E+00 3.6940379324E+02 1.632293975E+00 2.41840508189E+01 -2.41840508189E+01 2.41840508189E+01 -2.41840508189E+01 2.41840508189E+01 -2.4184059211115±00 7.6337984073E+02 2.4301436032E+01 2.623257453E+01 -2.452357453E+01 2.623257453E+01	h053 F5A utation using 332 17434692382810E+02 Fourier series fol nts. "Fraction of Sine coefficient 0.00000000000000000000000000000000000	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" appliess Complex amplitude 1.59883278034E+00 4.54420620416E+02 2.0260162075E+00 1.9540942488E+00 1.9540942488E+00 1.4572357876E+00 2.46978627452F+01 4.0173169134E+01 4.0173169134E+01	The first two points, followe 02 J.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466144 0.004306198 0.32654303 0.026225681 0.026225681 0.0064221 0.0001864053 0.001186341
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the Bas S.702209167 Coefficient Sum of the cosine and Harmonic number 1 2 3 4 5 6 7 8 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9 9	MMAX BUS1 4:+++ 43.1 BUS1A burjer areis comp t8045690:2 3.66 soft the resultant squares of the t-5.9983778:0034:00 1.052279375:2003 2.4184508189E:00 2.4184508189E:00 2.4301436022E:01 2.4530143602E:01 2.4530143602E:01 2.30564063174E:02 2.30564063174E:02 2.30564053174E:01	10037 10037 17434692382810E+02 F5A Totation using 332 17434692382810E+02 Fourier series follow 17434692382810E+02 Congroup of the test Congroup of test Congro	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" appliesa complex amplitude 1.5983278034E+00 4.5983278034E+00 4.5984278034E+00 5.9309842488E+00 1.95409842488E+00 1.95409842488E+00 2.32729257876E+00 2.46878637512E+01 4.073169138E+01 5.39097979648E-01 5.39097979648E-01	The first two points, followe 02 3.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466414 0.004466414 0.326690383 0.02525681 0.00584653 0.00884653 0.00186341 0.001604128
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the base by the base 3.702209167 Coefficient sum of the cosine and Harmonic number 0 1 2 3 4 5 6 6 8 9 9 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	HMAX BUS1 43.1 BUS1A Jouriet series comp EWG. 43.1 BUS1A Jouriet series comp EWG. 43.1 BUS1A Jouriet series comp EWG. 43.1 BUS1A Superstand Cosine signars of the Cosine -1.598327034E:00 3.9403079324E:02 1.632293975E:00 5.09466706949E:01 -2.41840508189E:00 7.6333798073E:00 -2.438013603E:00 2.623227493E:01 -2.632257459E:01 2.632257459E:01 -2.632257459E:01 2.632257459E:01 -2.632257459E:01 2.53267459E:01 -3.0604045174E:01 2.3064045174E:01 5.72876322248E:01 2.532257459E:01	hu52 	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" appliess Complex amplitude 1.59883278034E+00 4.54420620416E+02 2.0260162075E+00 1.95405942488E+00 1.95405942488E+00 2.466736212E+01 2.46737912648E-01 7.28948946984848E-01 7.2894894698E-01 7.28948946984848848848848484848484848484848	The first two points, followe 02 J.08066150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466144 0.004306198 0.015364311 0.35452681 0.05422621 0.001884053 0.00186341 0.00186941
C HPIHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the last Sum of the Coefficient Sum of the Coefficient Anumber 1 3 4 5 6 7 8 9 10 11 11	<pre>HMAX BUS1 **** 43.1 BUS1A ourier series comp two, are : 48045690c 23.66 s of the resultant squares of the the sine coefficien Cosine coefficient -1.59882778034E*00 1.0522593975E*00 5.0406706545E*01 -2.41840508180E*00 9.96598711112E*00 7.6337988073E*00 2.43501436022E*01 2.6232597492E*01 2.33664045174E*01 3.8459554947E*0005555555555555555555555555555555555</pre>	10037 10	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" appliesa complex amplitude 1.59803278034E+00 4.59803278034E+00 4.59803278034E+00 5.9309842488E+00 1.954058234891E+00 1.954058234891E+00 1.48458464342E+02 3.2729257876E+00 2.46878637512E+01 5.39097979648E-01 7.28948946098E-01 1.95206942213E+00 1.4714764142E-01	The first two points, followe 02 3.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.00446614 0.00446614 0.026525681 0.053428221 0.000884053 0.00186341 0.008696941 0.008696941 0.008763934
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the base by the base 3.702209167 Coefficient sum of the cosine and Harmonic number 0 1 2 3 4 5 6 6 7 8 9 9 9 10 11 12 12 12 12 12 12 12 12 12	MMAX BUS1 **** -43.1 BUS1A >Ouriet series comp tB0.450/02 3.66 s of the resultant squares of the	h053 F5A utation using 332 17434692382810E+02 Fourier series fol nts. "Fraction of Sine coefficient 0.00000000000000000000000000000000000	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" appliess Complex amplitude 1.5980278034E+00 4.5980278034E+00 4.5980278034E+00 4.5980278034E+00 5.9202787876E+00 1.95405842488E+00 1.48454464342E+02 2.3272927876E+00 2.46978637512E+01 5.3107975648E-01 5.320942213E+00 3.47147364142E+01 2.29162663012E+00	The first two points, followe 02 J.0806156447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466144 0.004300198 0.015344511 0.326690383 0.02525691 0.00186414 0.00186311 0.00186311 0.001604128 0.000669611 0.000763934 0.005047355
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the last Sum of the Cosine and Sum of the Cosine and 1 1 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 13	HMAX BUS1 43.1 BUS1A Juriet refes comp Events comp two, are: : 43.1 BUS1A Juriet refes comp Events comp two, are: : 4804500:2 3.66 soft the resultant Cosine coefficien - 1.5983278034E:00 . 1.052293975E:00 . 2.418405081805E:00 . 2.4380328:01 . 2.4380328:02 . 2.43845081805E:00 . 2.43845081805E:00 . 2.438450828:01 . 2.43845093128:01 . 2.632257493E:01 . 2.632257493E:01 . 3.8459559474:00 . 3.8459559474:00 . 3.8459559474:00 . 3.8459559474:00 . 3.8459559474:00 . 3.845955974:00 . 3.8259146416262:01 . 3.8359559746670 .	10037 10037 17434692382810E+02 Fourier series following 17434692382810E+02 Fourier series following 17434692382810E+02 Fourier series following 0.00000000000000 2.2500804890E+00 1.73554515385490 1.8855265571E+00 1.8855265571E+00 1.8855265571E+00 2.78615711137E+00 2.3607804022898E+00 1.487286780048E+01 -3.04251740458E+01 -3.04261740458E+01 -3.2483032248-01 4.50754129695E+01 1.0333243855E+00 2.9264303224E+01 4.29706402937E+01 -1.6010646271E+01	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies amplitude 1.5983278034E+00 4.5983278034E+00 4.5983278034E+00 5.9396278034E+00 1.95405278034E+00 1.954054234891E+00 1.954054234891E+00 1.954054234891E+00 2.327257876E+00 2.46878637512E+01 5.39097979648E-01 1.95206942213E+00 3.47147364142E-01 2.2936266312E+00 1.60445843097E-01	The first two points, followe 02 3.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.00446614 0.00446614 0.02525681 0.05328221 0.000884053 0.00186341 0.008696941 0.008696941 0.000533078
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the base by the base Sum of the cosine and Harmonic number 0 1 2 3 4 4 5 6 6 7 7 8 9 9 10 11 12 13 14 14 14 14 14 14 14 14 14 14	HMAX BUS1 **** -43.1 BUS1A >Ouriet series comp tB0.450/02 3.66 s of the resultant squares of the	hU63 F5A utation using 332 17434692382810E+02	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" appliess Complex amplitude 1.5980278034E+00 4.5980278034E+00 4.5980278034E+00 4.5980278034E+00 5.927278786+00 1.954058234891E+00 1.48454464342E+02 3.27292578766+00 2.46878637512E+01 4.0713691384E-01 7.2508942213E+00 3.47147364142E-01 2.29162633012E+00 1.60445843097E-01 1.60412649F-01	The first two points, followe 02 J.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466144 0.004306198 0.015344511 0.326690383 0.0042525681 0.004366414 0.004362426 0.000866311 0.001604128 0.0005047365 0.000547355 0.000543745
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the bat by the last Coefficient Sum of the cosine and firmonic number 1 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15	HMAX BUS1 43.1 BUS1A Jurier acies comp LWGA 43.1 BUS1A Jurier acies comp LWGA 18004500:02 3.66 s of the resultant squares of the 1.5983778034E:00 1.0522593975E:00 2.41306508189E:00 2.41306508189E:00 2.41306508189E:00 2.41306508189E:00 2.41306508189E:00 2.430645074E:00 3.63027449E:01 2.300446:02 3.664064527-01 3.845954947E:00 1.8641664052E:01 2.52014763754:00 1.8641664052E:01 2.62227949E:01 3.845954947E:00 1.8641664052E:01 2.6201790466E:02 2.501476375E:00 1.022790466E:02 2.501476379046E:02 2.501476379046E:02 2.5002790466502 2.5002790466502 2.5002790466502 2.5002790466502 2.5002790466502 2.5002790466502	10037 10137 17434692382810E+02 Fourier series following 17434692382810E+02 Fourier series following 17434692382810E+02 Fourier series following 0.00000000000000 2.2500803890E+00 1.7355451539E+00 1.8855326571E+00 0.54004022898E+00 1.48118540562E+02 2.3601740458E+01 -3.0426185424E+01 -3.04261844444444444444444444444444444444444	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies amplitude 1.5988278034E+00 4.5988278034E+00 4.5988278034E+00 5.93984278034E+00 5.939842082016E+02 5.93984203881E+00 1.954058234891E+00 1.954058234891E+00 2.46878637512E+01 5.39097979648E+01 1.95206942213E+00 3.47147364142E+01 2.2936266312E+00 1.60445843097E+01 1.67063122945E+01 1.025226549E+01	The first two points, followe 02 3.8806158447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.00446614 0.004300198 0.015344511 0.326590383 0.02525681 0.0058428221 0.000884053 0.00186341 0.008696941 0.008696941 0.00053378 0.00053378 0.00053378 0.000411527 0.00066676
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the base by the base 3.702209167 Coefficient Sum of the cosine and Harmonic number 0 1 2 3 4 4 5 6 6 7 7 8 9 9 10 11 12 13 14 14 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16	HMAX BUS1 43.1 BUS1A Jouriet series comp EWGA 43.1 BUS1A Jouriet series comp EWGA 1804590:2 3.66 s of the resultant Cosine squares of the Cosine -1.5983278034E:00 3.9403079324E:02 1.692793975E:00 5.09466706939E:01 -2.41840508189E:00 7.633798073E:00 2.3004670693955:00 2.623257493E:01 2.623257493E:01 2.623257493E:01 3.72876322238E:01 3.664045174E:01 3.8641660162E:00 2.64223238E:01 -1.8641660162E:00 2.6422734512:01 1.8641661162E:00 2.53014764782:00 -0.4227530147638811E:01 2.1042927381E:01 -0.4227476488:01 2.01439381E:01 -0.4227476488:01 2.014392831E:01 -0.42274893881E:01 2.014393881E:01 -0.42274893881E:01 2.014393881E:01	hU63 F5A utation using 332 17434692382810E+02	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" appliess Complex amplitude 1.5980278034E+00 4.5980278034E+00 4.5980278034E+00 4.5980278034E+00 5.9309842488E+00 1.48454846342E+02 3.2729257876E+00 2.46878637512E+01 3.39097979648E-01 3.293042931E+00 1.48458430978-01 2.2916642218-00 1.604458430978-01 1.604458430978-01 1.60458430978-01 1.60251226549E-01 3.029512265498-01	The first two points, followe 02 J.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003510398 1.00000000 0.00446614 0.004300198 0.015344511 0.32650303 0.02525631 0.035122622 0.000816311 0.0064128 0.00054735 0.000547555 0.00054755 0.000547555 0.000555
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the base Begin the base Sum of the Cosine and harmonic numbeo 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17	HMAX BUS1 43.1 BUS1A Jouriet series comp BUS1A Juriet series comp EWSA 1804590:20 3.66 soft the resultant Gosing squares of the Cosing 1.5085278161000 3.94803079248:00 3.948030703248:00 3.948030708498:00 9.966598711312:00 7.633379880732:00 2.453014360238:00 1.8450225974398:00 2.30604045174E-01 2.32604045174E-01 2.7376322238E-01 -3.814505358:00 3.841645045184E-02 -3.8145954974500 2.233014763758:00 -8.2325374391E-01 2.233014763758:00 -8.245311312:00 -1.81459549745920 -2.233191E-02 -1.8145974673758:00 -1.8454974673758:00 -1.4613748412:02 -1.4613748412:02 -1.4613748412:03 -1.4613748412:03	<pre>butch butch</pre>	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies amplitude 1.5983278034E+00 4.5983278034E+00 4.5983278034E+00 5.93984278034E+00 1.954058278034E+00 1.954058278034E+00 1.954058234891E+00 1.954058234891E+00 1.4845843042E+01 5.39097979648E+01 1.95206942213E+00 1.6045843097E+01 1.60512945E+01 1.025226549E+01 1.88257639494E+00 2.32410954704E+01	The first two points, [ollowe 02 3.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466144 0.004466144 0.026525681 0.053428221 0.000884053 0.00186341 0.008696941 0.008696941 0.008696941 0.00053344 0.00053348 0.00053348 0.00053378 0.000411527 0.000666766 0.00414280 0.00056676
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the base by the base Sum of the cosine and Harmonic number 0 1 2 3 4 4 5 6 7 8 9 9 10 11 12 13 14 15 16 16 16 16 17 10 12 10 12 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	HMAX BUS1 43.1 BUS1A Jouriet series comp EWSA 43.1 BUS1A Jouriet series comp EWSA 1804590c2 3.66 s of the resultant squares of the Cosine coefficient -1.5983278034E:00 1.0522593975E:00 2.41840508189E:00 2.43840508199E:01 2.43840508199E:01 2.43840508199E:01 2.43840508199E:01 2.43840508199E:02 2.43840508199E:01 2.6232574939E:01 2.6232574939E:01 3.0664045174E:01 3.0664045174E:01 3.0664045174E:01 3.0664045174E:01 3.0664045174E:01 3.064405122:01 3.06640162E:01 3.082231E:02 3.082231E:02 3.082231E:02 3.082231E:02 3.082231E:02 3.082231E:02 3.082231E:02 3.082231E:02 3.0841660162E:01 3.082231	hU62 F5A utation using 332 17434692382810E+02 Fourier series fol	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" appliess Complex amplitude 1.59803278034E+00 4.59803278034E+00 4.59803278034E+00 4.59803278034E+00 5.930942480E+00 1.948548464342E+02 3.32729257876E+00 2.46878637512E+01 3.30979796482-01 3.9370972512E+00 3.4937642543012E+00 3.4937646312E+00 1.4045843097E+01 3.02951226549E+01 3.02951226549E+00 3.8240954704E+00 2.32410954704E+00 2.32410954704E+00 2.32410954704E+00 2.32410954704E+00 2.32410954704E+00 2.32410954704E+00 2.32410954704E+00 2.32410954704E+00 2.32410954704E+00 2.32410954704E+00 2.32410954704E+00 2.32410954704E+00 2.32410954704E+00 2.32410954704E+00 2.3240	The first two points, followe 02 3.8806158447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.00446614 0.004300198 0.015344511 0.326590383 0.02525681 0.05428221 0.00186531 0.00186531 0.00166491 0.000753934 0.000753934 0.000753934 0.000753934 0.000547355 0.000411527 0.000666676 0.000511445 0.001942757
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the base Begin the base Sum of the Cosine and harmonic numbeo 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 19 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10	HMAX BUS1 43.1 BUS1A Jouriet series comp BUS1A Juriet series comp EWSA Buditon Cosine 180459052 3.66 soft the resultant Cosine Suparts Cosine 1.5085771101 Cosine 1.94803070248-02 S.66 1.948030702348-02 S.67 1.94803070248-02 S.66 2.94803070248-02 S.60764988-01 2.45014360238-01 S.2325974938-01 2.45014360238-01 S.2325974938-01 2.30640405174E-01 S.2325974938-01 2.23014763758-00 S.8416401622-01 2.23014763758-00 S.8416640162E-01 2.23054045174E-01 S.2325974938E-01 2.2305404767378-00 S.841180378E-01 2.25014763758-00 S.441179348E-02 2.4501348118-02 S.44118039E-01 3.65234413039E-01 S.6523441303E-01 3.65937481839E-01 S.659374952812-01 3.659374818392-01 S.65937492482-01	10037 10137 17434692382810E+02 Fourier series following 17434692382810E+02 Fourier series following 17434692382810E+02 Fourier series following 17434692382810E+02 1743469238890E+02 1.7355451539E+00 1.8855326571E+00 1.8855326571E+00 1.8855326571E+00 1.865326571E+00 1.48118540562E+02 2.3604784048E+01 -3.04261740458E+01 -3.04261740458E+01 -3.04261740458E+01 -3.04261740458E+01 -3.04261740458E+01 -3.04261740458E+01 -1.600548271E+00 -1.600548271E+00 -1.78997476500E+01 -1.658155428E+01 -2.31815680330E+01 -2.31815680330E+01 -2.31815680330E+01 -3.9384638982E+00 -8.45411792071E+02 -8.45411792071E+	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies amplitude 1.5988278034E+00 4.5988278034E+00 4.5988278034E+00 5.938278034E+00 1.9580362075E+00 1.95409842488E+00 1.954054234891E+00 1.48454364312E+02 3.2729257876E+00 2.46878637512E+01 1.95206942213E+00 1.4073169138E+01 5.39097979648E+01 1.95206942213E+00 1.60445843097E+01 1.807573949E+01 1.807573949E+01 1.807573949E+01 1.807573949E+01 1.807573949E+01 1.807573949E+01 1.807573949E+01 1.807573949E+01 1.807573949E+01 1.807573949E+01 1.807573949E+01 1.807573949E+00 2.32410754704E+01 8.82829002409E+01 1.842500024394E+00 1.842500024394E+00 1.945954704E+01 1.842500024394E+00 1.945954704E+01 1.945954704E+01 1.945954704E+01 1.945950024394E+00 1.945954704E+01 1.9459	The first two points, followe 02 3.8806158447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466144 0.004300198 0.015344511 0.326590383 0.02452621 0.006884053 0.00186341 0.008696941 0.008696941 0.008696941 0.008696941 0.008696941 0.00053344 0.00053348 0.00053348 0.000411527 0.00041527 0.00041527 0.000186149
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the base by the last 3.702209167 Coefficient sum of the cosine and Harmonic number 0 1 2 3 4 4 5 6 7 8 9 9 10 11 12 13 14 15 16 16 16 16 16 16 16 17 17 17 17 17 17 17 17 17 17	HMAX BUS1 43.1 BUS1A Jouriet series comp EWSA 43.1 BUS1A Jouriet series comp EWSA 1804590c2 3.66 s of the resultant squares of the Cosine coefficient -1.5983278034E:00 1.0522593975E:00 2.41840508189E:00 2.41840508189E:00 2.43840508198E:00 2.623257493E:01 2.623257493E:01 2.623257493E:01 2.623257493E:01 2.623257493E:01 2.623257493E:01 2.623257493E:02 1.04227750466:02 2.623257493E:01 2.623257493E:01 2.62227743E:02 1.0421750466:02 2.5001476375E:00 1.04227750466:0162 2.50014763782 2.50038239942831E:01 2.500382394231E:01 2.500382394231E:01 2.6303824231E:02 2.6303824231E:02 2.6303824231E:02 2.63038242231E:02	hubs/ 	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" appliess Complex amplitude 1.59803278034E+00 4.59803278034E+00 4.59803278034E+00 4.59803278034E+00 5.939842488E+00 5.939842488E+00 1.48454846342E+02 3.32729257876E+00 2.46878637512E+01 3.9397979648E-01 3.93704541412E+00 3.4714541412E+00 3.4714541412E+00 3.471454142E+00	The first two points, followe 02 3.8806158447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466144 0.004300198 0.015344511 0.326590383 0.002525681 0.05428221 0.00186531 0.00186531 0.00166478 0.000547355 0.00014527 0.0002466676 0.000511445 0.001942757 0.000166149 0.00024133
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the base Begin the base Sum of the cosine and harmonic number 1 1 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 16 17 18 19 20 21 21 21 21 21 21 21 21 21 21	HMAX BUS1 43.1 BUS1A Jouriet series comp 43.1 BUS1A Jouriet series comp tB045002 3.66 s of the resultant squares of the Cosine Cosine 1.9483276024 3.06 3.9483276024 3.06 3.9483270042 3.06 3.9483270042 3.06 3.9483270042 3.06 3.9483270042 3.06 3.9483270044 3.0007 2.93047064980-01 2.4501436028:00 2.4501436028:01 2.6301430028:01 2.4501436028:01 2.230640451742-01 5.728763222386-01 3.81459594712:00 2.253014763758:00 2.253014763758:00 2.253014763758:00 2.2530147837818:00 2.2530147837818:00 1.864166401622:01 2.2530147839418:00 0.1 1.86419748139418:00 0.1 2.5301478839478:00 1.864184839400 1.8641844138194:00 0.65984722:01 2.936477724482942032 0.	h 1052 	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies amplitude 1.5981278034E+00 4.5981278034E+00 4.5981278034E+00 5.909842488E+00 1.95409842488E+00 1.95409842488E+00 1.95409842488E+00 1.954098429312E+01 3.2729257876E+00 2.46878637512E+01 1.95206942213E+00 1.4013169138E+01 5.39097979648E+01 1.95206942213E+00 1.60445843097E+01 1.60512949E+01 1.6025763949E+01 1.825763949E+01 1.825763949E+01 1.825763949E+01 1.825763949E+01 1.825763949E+01 1.825763949E+01 1.825763949E+01 1.825763949E+01 1.825763949E+01 1.825763949E+01 1.825763949E+01 1.825763949E+01 1.825763949E+00 1.301954704E+01 8.4500043341E+02 9.91241873550E+02 1.7031213822E+0	The first two points, [ollowe 02 3.8806158447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.00446614 0.00446614 0.02525681 0.05328221 0.00886531 0.00186341 0.008696941 0.008696941 0.008696941 0.008696941 0.00053344 0.00053348 0.00053348 0.00053348 0.000547365 0.00018634 0.0005676 0.000411527 0.00066676 0.000411527 0.00066676 0.000414280 0.000513445 0.0005152
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the base by the last 3.702209167 Coefficient sum of the cosine and Harmonic number 0 1 2 3 4 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 16 16 17 18 10 20 20 20 20 20 20 20 20 20 2	HMAX BUS1 ***+ -43.1 BUS1A >Duriet series comp -40.1 BUS1A >Duriet series comp t80.4500:2 3.66 s of the resultant squares of the -1.5983278034E:00 1.0522593975E:00 5.094657063940E:01 -2.418405081802:00 7.633798073E:00 -2.4530145008180E:00 -2.623257493E:01 -3.8459954974E:00 -1.8641660162E:01 -2.623257493E:01 -1.0422779486E:02 -1.0422779446E:02 -1.0422779446E:02 -1.65329544133E:02 -1.65329544133E:02 -1.0422779446E:02 -2.8530147677244E:03 -2.8530177244E:03 -2.87364777244E:03 -2.8736477724E:03 -1.126827395477724E:03 -1.126827395477724E:03 -1.41385002177947545:04	hubs/ 	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" appliese complex amplitude 1.59803278034E+00 4.59803278034E+00 4.59803278034E+00 4.59803278034E+00 5.939842488E+00 1.95405942488E+00 1.95405942488E+00 2.026036234891E+00 1.95105942213E+00 2.32729257876E+00 2.46878637512E+01 3.9397979648E+01 3.93064320378E+01 2.93126633012E+00 1.82257639494E+00 2.824054704E+01 1.82250202409E+01 8.8262002409E+01 8.8262002409E+01 8.8262002409E+01 1.931213822E+01 1.0931213822E+01 1.9031213822E+01 1.093121382E+01 1.0931213822E+01 1.0931213822E+01 1.0931213822E+01 1.0931213822E+01 1.0931213822E+01 1.0931213822E+01 1.0931213822E+01 1.0931213822E+01 1.0931213822E+01 1.0931213822E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.093121382E+01 1.09	The first two points, followe 02 3.8806158447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466114 0.004300198 0.015344511 0.326690383 0.02525681 0.05428221 0.00186531 0.00186531 0.00186531 0.00186531 0.00076573 0.001942757 0.001942757 0.001942757 0.00028133 0.002416757
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the base Sum of the cosine and harmonic number 1 1 3 4 4 5 6 6 7 8 9 10 11 12 13 14 16 17 18 19 20 21 22 23 	HMAX BUS1 ***+	http://www.second.com/second/s	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies Complex ampli tudget applies 1.5980278034E+00 4.5980278034E+00 4.5980278034E+00 4.5980278034E+00 4.5980278034E+00 4.59804278034E+00 1.945484637512E+01 4.01731691394E+01 7.28948946037512E+01 1.95206302213E+00 1.95206302213E+00 1.95206302213E+00 1.847147364142E+01 1.95206302218+00 1.95206302218+00 1.847147364142E+01 1.8250542213E+00 1.8250542213E+00 1.8250542213E+00 1.8250542213E+00 1.8250543294E+00 2.3241054704E+01 3.82505202409E+01 8.8262024408E+00 2.3241054704E+01 3.82502244085+00 2.7251213822E+01 1.0922244087E+00 2.0231213822E+01 1.0922244087E+00 2.023493536E+00 2.02493556E+00 2.0249556E+00	The first two points, [ollowe 02 3.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.00446614 0.00446614 0.02525681 0.05328221 0.000884053 0.001604128 0.001604128 0.000569941 0.00056941 0.00053344 0.0005334 0.00053378 0.00041527 0.00066676 0.00011527 0.00016149 0.000218133 0.000218133 0.000218133 0.000218133 0.000216152 0.000246757 0.000246757 0.000445522
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the base by the last Sum of the cosine and Harmonic number 0 1 2 3 4 4 5 6 7 8 9 9 10 12 13 14 15 16 16 16 17 12 12 13 14 15 16 16 16 17 12 12 12 12 12 12 12 12 12 12	HMAX BUS1 ***+ -43.1 BUS1A >Ouriet series comp -43.1 BUS1A >Ouriet series comp -100riet series comp t804500:2 3.66 s of the resultant squares of the -1.5983278034E:00 1.0522593975E:00 5.09465706949E:01 -2.41840508189E:00 -2.41840508189E:00 -2.4380358003E:00 2.623257493E:01 -3.8459947E:00 -3.84594947E:00 -1.0422779486E:02 -1.0422779486E:02 -1.0422779486E:02 -1.0422779486E:02 -2.85301476375E:00 -1.0422779486E:02 -1.0422779486E:02 -2.853017704765:02 -1.04227770486E:02 -2.8736477244E:03 -2.8736477244E:03 -2.8736477244E:03 -2.8736477244E:03 -1.01224220770E:00 -1.022422242:07070E:00 -1.02242242:07070E:00	huss 	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" appliese complex amplitude 1.59803278034E+00 4.59803278034E+00 4.59803278034E+00 4.59803278034E+00 5.939842488E+00 1.95403942488E+00 5.9399422488E+00 2.026036234891E+00 1.48454846342E+02 3.27292578764+00 2.46878637512E+01 3.9397379648E+01 3.93126433097E+01 1.6045433097E+01 1.6295122649E+01 1.6295122649E+01 1.6295122649E+01 1.6229520249E+00 1.622902409E+01 1.622902409E+01 1.622912763944E+00 1.8222002409E+01 8.8262902409E+01 1.99121487350E+02 1.7031213822E+01 1.99122440087E+00 2.02349935361E+01 1.624531271E+01	The first two points, followe 02 3.8806158447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466144 0.004300198 0.015344511 0.326690383 0.020525681 0.054328221 0.00186531 0.00186531 0.00186531 0.00054305 0.0011527 0.000145282 0.001942757 0.001942757 0.001942757 0.001942757 0.001942757 0.001942757 0.001942757 0.001942757 0.001942757 0.001942757 0.00216157 0.002416757 0.00041522 0.00131202
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the base Begin the base Sum of the cosine and Narmonic number 0 0 1 1 1 3 4 4 5 6 6 7 8 9 10 11 12 13 14 16 17 18 19 20 21 22 23 24 24 25 25 25 25 25 25 25 25 25 25	HMAX BUS1 43.1 BUS1A Jouriet series comp 43.1 BUS1A Jouriet series comp tB045002 3.66 s of the resultant squares of the LB045002 3.66 s of the resultant squares of the LB0450702 3.66 State Cosine Cosine Cosine State State State Cosine State State State State State Cosine State State State Cosine State Cosine State Cosine State Cosine State Cosine State Cosine	h 1052 - 10111 F5A utation using 332 17434692382810E+02 Fourier series fol nts. "Fraction of Coufficient 0.00000000000000 1.735525551E+00 1.735525551E+00 1.530040224908E+00 2.7865711137E+00 -3.4261740458E+01 -4.87286780048E+01 -4.87286780048E+01 -4.87286780048E+01 -4.87286780048E+01 -1.63123238585E+00 -2.92848303224E+01 -1.66058155428E+01 -1.65058155428E+01 -1.65058155428E+01 -2.79797611731E+01 -2.79797611731E+01 -2.31815660330E+01 -2.970714731E+01 -2.31815660330E+01 -2.9284638932E+02 -3.1815660330E+01 -2.92797518731E+01 -2.92797518731E+01 -2.3181566098E+01 -2.92797518731E+01 -2.022797518731E+01 -2.022797518732E+02 -4.45411792071E+03 -3.90908098E+01 -2.02279751873E+01 -2.02279751873E+01 -2.02279751873E+01 -3.9090897372E+02 -3.909087972E+02 -3.909087972E+02 -3.909087972E+02 -3.909087972E+02 -3.909087972E+02 -3.909087972E+02 -3.909087972E+02 -3.9090872E+02 -3.9090879772E+02 -3.9090879772E+02 -3.9090879772E+02 -3.9090879772E+02 -3.9090879772E+02 -3.9090879772E+	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" applies Complex ampli tudget applies 1.5980278034E+00 4.5980278034E+00 4.5980278034E+00 4.5980278034E+00 4.5980278034E+00 1.97286339120 1.9454846395120 2.4687848637512E+01 4.01731691394E-01 7.28949946937512E+01 1.95206302213E+00 1.60445843097E-01 1.8773631948E+00 1.8273639494E+00 1.8273639494E+00 2.3241054704E-01 1.8250024097E+01 1.8250024097E+01 1.8250024097E+01 1.82520024097E+01 1.82520024097E+01 1.82520024097E+01 1.82520024097E+01 1.8252024097E+01 1.8252024097E+01 1.8252024097E+01 1.8252024087E+00 2.0241935361E+01 1.0922244087E+00 2.0243935361E+01 1.0922244087E+00 2.0243935361E+01 1.0922244087F+00 2.0243935361E+01 1.092244087F+00 2.0243935361E+01 1.092244087F+00 2.0243935361E+01 1.092244087F+00 2.0243935361E+01 1.092244087F+00 2.0243935361E+01 1.092244087F+00 2.0243935361E+01 1.092244087F+00 2.0243935361E+01 1.092244087F+00 2.0243935361E+01 1.092244087F+00 2.0243935361E+01 1.092541271E+01 2.092541271E+01 2.092647746E+02 2.0935361E+01 2.0935361E+01 2.0935371E+01 2.0935371E+01 2.0935371E+01 2.0942747087F+00 2.0244087F+00 2.024493531E+01 2.094274087F+00 2.024493531E+01 2.0942741087F+00 2.024493531E+01 2.094274087F+00 2.0244087F+00	The first two points, followe 02 3.8806158447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466144 0.004301988 0.015344511 0.326590383 0.02525681 0.00186341 0.006866941 0.008669641 0.0068696941 0.000866766 0.00011527 0.000666766 0.00011527 0.00011527 0.00011425 0.00018145 0.00018128 0.00018128 0.00018128 0.00018128 0.00018128 0.00018128 0.00018128 0.00018128 0.00018128 0.00018128 0.00018128 0.00018128 0.00018128 0.00018128 0.00018128 0.00018128 0.00018128 0.000218133 0.000216757 0.000445592 0.000131202 0.00086043
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the base by the last Sum of the cosine and Harmonic number 0 2 3 4 4 5 6 6 7 8 9 9 10 12 13 14 16 16 16 16 16 16 16 16 16 16	HMAX BUS1 ***+ -43.1 BUS1A >Durier series comp -43.1 BUS1A >Durier series comp -40.1 BUS1A >Durier series comp t804590c2 3.66 s of the resultant -1.5983278034E:00 1.0522593975E:00 5.09466706949E-01 -2.41840508189E:00 -2.41840508189E:00 -2.43840508198E:01 2.623257493E:01 2.623257493E:01 -3.845954947E:00 -1.042475948E:02 -1.0424779486E:02 -1.0424779486E:02 -2.5301476375E:00 -1.042273948E:01 -2.632397494E:01 -2.632397494E:01 -2.632397494E:01 -2.632397494E:02 -1.0424727948E:02 -2.632397494E:01 -2.63239744E:03 -2.63239744E:03 -3.63239744E:04 -3.63239744E:04 -2.63239744E:04 -3.633794E:02 -4.643374E:04	hubs/ 	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli fundamental" appliess complex amplitude 1.59803278034E+00 4.59803278034E+00 4.59803278034E+00 4.59803278034E+00 5.939842488E+00 5.939842488E+00 5.939942488E+00 2.026036234891E+00 1.48454846342E+02 3.27292578764E+00 2.3916946296E+01 3.95206942213E+00 3.47147364142E+01 2.936266302E+00 3.47147364142E+01 3.6295122649E+00 3.82902409E+01 3.82902409E+01 8.8282002409E+01 8.8282002409E+01 1.0932147350E+02 9.9124187350E+02 1.031213822E+01 1.0922440087E+00 2.02349935361E+01 3.90998647746E+02	The first two points, followe 02 3.8806158447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466144 0.004300198 0.015344511 0.326690383 0.020525681 0.05428221 0.00186531 0.00186531 0.00186531 0.00166428 0.00086653 0.0011527 0.00024653 0.001942757 0.000186149 0.000214133 0.00276152 0.000216157 0.000241575 0.000313202 0.000386043
C HPTHMIN C +-***//// 1941.026.5 Begin the base Begin the base Sum of the cosine and Narmonic number 1 1 1 3 4 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26	HMAX BUS1 ***+	hU63	equidistant points. 3.9970907592773440E+ low. "Complex ampli Complex amplitude 2.02460162740348+00 4.59882780348+00 4.59882780348+00 4.59882780348+00 4.59882780348+00 4.59882780348+00 1.9874846035128+00 1.4845846375128+01 4.017316913948+01 2.29766370128+00 1.952063012949460 1.9520630128+00 1.8471473641428-01 1.807363129498-01 1.8275394944+00 2.32410547048+01 1.825024398+00 2.32410547048+00 2.32410547048+00 2.32410547048+00 2.32410547048+00 2.32410547048+00 2.32410547048+00 2.32410547048+00 2.32410547048+00 2.32410547048+00 2.32410547048+00 2.32410547048+00 2.324105471048+01 3.909986477468+00 2.02199353618+00 3.909986477468+00 2.02199353618+00 3.909986477468+00 3.909986477468+00 3.909986477468+00 3.909986477468+00 3.909986477468+00 3.909986477468+00 3.909986477468+00 3.90986477468+00 3	The first two points, followe 02 J.0806150447265620E+02 tude" is the square root of th to this amplitude. Fraction of fundamental 0.003518398 1.00000000 0.004466149 0.015344511 0.226590303 0.026525681 0.001884053 0.00186311 0.001604128 0.0008696911 0.00547365 0.000533078 0.000547365 0.000511445 0.000547365 0.000511445 0.000511445 0.000511445 0.000511445 0.00013275 0.000131275 0.000218133 0.000218133 0.002416757 0.000216132 0.000216132 0.0001331202 0.000086043

FALLA DE ORIGE

	27	-2.826872	74949E-0	3 -6.517	71255934E-0	2 6.52384005	794E-02	0.000143564
	28	1.027243	021168-0	1 -5.852	236286575-0	2 1.18224993	9762-01	0.000260166
	29 -	-5.934852	63325E-C	1 -3.496	09981512E-0	1 6.88804687	0905-01	0.001515787
	30	3.605195	84747E-C	3 -1.714	68167576E-0	1 1.71506063	825E-01	0.000377417
Derived	fro	n table:	1) RMS	value = 3	.38617630E+	02 2) THD =	3.32433942E+01	8

El análisis de espectro del voltaje al neutro en el banco de capacitores del filtro de séptima armónica muestra que la tensión tuvo un aumento de poca consideración llegando a 278.05 V (contra 277.68 V en el caso de sintonía a 420 Hz), mientras que el análisis de espectro de la corriente en la fase A del filtro muestra que la corriente eficaz total a través del filtro disminuyó a 135.41 A (contra 154.96 A en el caso de sintonía a 420 Hz). La tensión desarrollada en el reactor es de 19.08 V

Comparando el contenido de la 7^a armónica en el filtro para los casos de sintonía a 420 y 376.38 Hz (n = 6.2731) se observa una disminución notable en el contenido de 7^a armónica, desde 89.4065 A hasta 40.3899 A. Se mantuvo la componente de 7^a armónica de corriente dentro del valor esperado de 56.91 A. Se presentan a continuación los análisis de espectro generados por el ATP para el voltaje en el banco de capacitores y la corriente de la fase A del filtro de 7^a armónica.

C							
C VOLTAJE V	VAN EN EL BANC	O DE CAPAC	TTORES DEL FI	LTRO DE 7A ARM	DNICA		
c ı	2	٦	4	5 6	7	e	
C 345678901	2345678901234	5678901234	5678901234567	90123456789012	23456789012	34567890	
C HPIHMIN	IHMAX	BUS1 BUS	32				
C +-***////	/++++	****	•••				
1841.026.5	543.1	F7A					
Begin the H	Fourier series	computat:	ion using 332	equidistant	points.	The first two points,	followed
by the last	two, are:			-	•		
-2.15604675	29296880E+02	-2.123547	6684570310E+0	2 -2.179051208	34960940E+0	2 -2.1522445678710940	5+02
Coefficient	s of the resu	ultant Fou	rier series f	ollow. "Compl	lex amplitu	de" is the square ro	ot of the
sum of the	squares of th	e					
cosine and	the sine coef	ficients.	"Fraction o	fundamental"	applies to	o this amplitude.	
Harmonic	C	osine	Si	ne	Complex	Fraction of	
number	coeffi	cient	coefficies	nt ar	nplitude	fundamental	
0	7.3582018714	4E-01 0.	00000000000E+0	0 7.3582018	7144E-01	0.001874466	
1	-1.9232707624	9E+02 3.	42206245842E+0	02 3.92549129	9348E+02	1.00000000	
2	-5.7221624218	2E-01 2.	04310191021E+0	0 2.1217202	5567E+00	0.005404980	
3	-2.8052552580	3E-01 1.	43605672322E+0	0 1.46319974	130E+00	0.003727431	
4	-4.4651157836	8E-01 1.	20026264689E+0	0 1.28062602	2314E+00	0.003262333	
5	-1.2938915330	5E+01 -2.	55932751939E+0	0 1.31896052	2739E+01	0.033599884	
6	~3.3219425334	8E+00 -4.	15120516391E+0	0 5.3167477	3792E+00	0.013544159	
7	-4.2058849618	5E+00 -1.	74977652739E+0	01 1.79961456	5399E+01	0.045844314	
8	~1.5320628411	1E-01 -7.	53404278298E-0	01 7.68823888	9838E-01	0.001958542	
9	-2.2449003301	9E-02 -4.	34989731359E-0	01 4.35568621	617E-01	0.001109590	
10	-5.6299275304	5E-03 -2.	17073986934E-0	01 2.17146982	221E-01	0.000553171	
11	-2.6928900841	7E-01 -9.	31502051908E-0	9.69645627	414E-01	0.002470126	
12	-1.4669647688	9E-02 -1.	67732591718E-C	01 1.68372862	682E-01	0.000428922	
13	-1.1386675942	6E-01 -4.	79304534508E-0	01 4.92644370	0416E-01	0.001254988	
14	-2.2830474738	OE-02 -1.	37234946772E-0	1.39121030	734E-01	0.000354404	
15	-1.6795323140	9E-02 -1.	10747725955E-C	1.12014024	495E-01	0.000285350	
16	-1.56183001220	OE-02 -7.	50311080217E-0	2 7.66394054	627E-02	0.000195235	
17	-3.0764239438	5E-03 -2.	80496135904E-0	2.80513006	5189E-01	0.000714593	
18	-5.8023552580	1E-03 -0.	07251551701E-C	2 8.09433913	725E-02	0.000206199	
19	-7.41087926179	9E-02 -1.	36937737505E-C	1 1.55705032	341E-01	0.000396651	
20	-1.6767610890	1E-02 -6.	87667218599E-C	2 7.07814580	968E-02	0.000180312	
21	-1.45950916489	9E-02 -6.	19086841248E-C	2 6.36058320	463E-02	0.000162033	
22	-1.4790862246	9E-02 -4.	74012814690E-0	4.96553226	860E-02	0.000126495	
23	1.04284017640	0E-02 -1.	278140776866-0	1.28238800	0751E-01	0.000326682	
24	-5.1848858118	1E-03 -5.	17705708137E-C	5.2029559	3222E-02	0.000132543	
25	-4.8840915703	3E-02 -7.	37419591708E-C	2 8.84494860	0872E-02	0.000225321	
26	-1.5095714558	4E-02 -4.	57201953621E-C	2 4.81478645	630E-02	0.000122654	
27	-1.2988267910	7E-02 -4.	34157092672E-0	2 4.53168722	938E-02	0.000115443	
28	-1.29559196992	2E-02 -3.	51231828334E-C	2 3.74365306	565E-02	0.000095368	
29	3.5860723541	6E-03 -7.	22961205011E-C	2 7.23850050	386E-02	0.000184397	
30	-6.1957083297	7E-03 -3.	71659045987E-0	12 3.76787906	5700E-02	0.000095985	
Derived fro	m table: 1) f	RMS value	= 2.78058013E	02 2) THD -	5.9011589	4E+00 %	
C			_				
C VOLTAJE V	AN EN EL REACT	TOR DEL FI	LTRO DE 7A ARM	IONICA			
C					-		
					1	T1111615	
					1	- 軍犯名曰: 「法」、	1
					-		

الإراب المأسم فيتعجب فيهيده أشكرت بالرابي

C 34567890		2 3	4		6	7	8	
	123456789	01234567890	12345678901234	1567890	12345678901234567	8901234567	890	
C REIHMI	NHMAX	BUS1	BUS2					
1941 026	543 1	9/1518	575					
Begin the	Fourier a	eries compu	tation using	132	equidistant noin	ts. The f	first two points.	followed
by the las	t two, a	re :	reaction ability		equilarbeane poin			
4,46090736	38916020E	+01 3.892	29812622070308	2+01	4.820578098297119	0E+00 7.3	8234796524047850E	+00
Coefficien	ts of the	resultant	Fourier serie	es fol	low. "Complex an	plitude"	is the square ro	oot of the
sum of the	squares	of the						
cosine and	the sine	coefficien	ts. "Fractic	on of f	'undamental" appl	ies to thi	s amplitude.	
Harmonic		Cosine		Sine	Comp1	ex	Fraction of	
number	C	oefficient	coeffi	cient	amplitu	de	fundamental	
0	2.65600	2822956-02	0.0000000000	10E+00	2.65600282295E-	02	0.002572265	
1	6.79270	9116556+00	-7.7766260411	116+00	1.032554161906+	01	0.000000000	
2	1.32419	9997596-01	-2.5694333699	JOE-01	2.89058/046956~	01	0.027994552	
	1.30410	4648/66-01	-4.0722393389	46-01	4.301030242386-	01	0.041034333	
4	2.57785	9707486-01	-5.9021508655	255-01	0.440334/31036-	00	0.002374302	
5	2 99274	0647545+00	3 7919199061	55400	4 8166016678654	00	0.466474481	
7	4 69710	5974685+00	2 1000082710	195100	2 2403736922954	01	2 179455887	
Á	2.57352	9365022-01	1.0319692888	16E+00	1.06357470216E+	00	0.103004253	
ă	5.89171	339116E-02	6.6657537699	93E-01	6.69174089368E-	01	0.064807650	
10	3,10859	3638305-02	2,9118941338	4E-01	2.92844002683E-	01	0.028361128	
ii	8.09264	315278E-01	2.6288570376	50E+00	2.75059958121E+	00	0,266387923	
12	6.08935	710875E-02	3.0237462502	2E-01	3.08445199115E-	01	0.029872060	
13	4.75564	923571E-01	1,7544383364	3E+00	1.81775022291E+	00	0.176044056	
14	1.09580	066229E-01	3.2185666619	98E-01	3.39999271310E-	01	0.032927984	
15	8.56881	325248E-02	2.4401393725	7E-01	2.58621842912E-	01	0.025046806	
16	8.60959	480663E-02	6.9274225102	21E-02	1.10505341667E-	01	0.010702135	
17	-2.22887	3402226-02	1.6543220595	53E+00	1.65447220113E+	00	0.160231033	
18	1.23072	394611E-02	1.9715939139	91E-01	1.97543144039E-	01	0.019131504	
19	6.47940	054646E-01	7.8750552762	26E-01	1.01979962270E+	00	0.098764758	
20	1.19894	122615E-01	1,8161933586	50E-01	2.17623950419E-	01	0.021076275	
21	1.02875	250761E-01	1.5005919094	2E-01	1.81937016589E-	01	0.01/620094	
22	1.12452	962595E-01	9.1255749810	06E-03	1.12822625901E-	01	0.010926558	
23	-2.44435	151843E-01	1.1613763712	22E+00	1.18682080327E+	00	0.114940295	
24	-2.26380	1942486-02	1.3/69/52128	166-01	1.395460042136-	01	0.013514643	
25	6.93985	/3262/E-01	5.5062302529	10-3E-01	8.85890463360E-	01	0.085796029	
20	1.43953	0035142-01	1.163/00/093	102-01	1.0310/2004315-	01	0.01/92/120	
21	1.10001	0076108-01	-2 6060021057	168-02	1.101412127078-	01	0.013139037	
20	-7 59662	5897745-01	9 4216157959	115-01	8 912936007595-	01	0.085349867	
	-2.33002	5051746-01	0.121013/030	16-01				
70	-3 84254	5757378-07	9 0545423109	175-02	8 024169759226-	02	0 009642910	
30 Derived fr	-3.84254	525733E-02	8.0545423108	2E-02	8.92416975922E-	02 463414E+02	0.008642810	
30 Derived fr	-3.842549 om table:	525733E-02 1) RMS Va	8.0545423108 lue = 1.908196	2E-02 86E+01	8.92416975922E- 2) THD = 2.41	02 463414E+02	0.008642810	
30 Derived fr	-3.84254 om table:	525733E-02 1) RMS VA	8.0545423108 lue = 1.908196	2E-02 86E+01	8.92416975922E- 2) THD = 2.41	02 463414E+02	0.008642810	
30 Derived fr C C CORRIENT	-3.84254 om table: E FASE "A	525733E-02 1) RMS Va	8.0545423108 lue = 1.908196	12E-02	8.92416975922E- 2) THD = 2.41	02 463414E+02	0.008642810	
30 Derived fr C C CORRIENT C	-3.84254 om table: E FASE "A	525733E-02 1) RMS VA " EN EL FIL	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO	12E-02 586E+01 DNICA	8.92416975922E- 2) THD = 2.41	02 463414E+02	0.008642810	
30 Derived fr C CORRIENT C C 1	-3.84254 om table: E FASE "A'	525733E-02 1) RMS Va " EN EL FIL 2 3	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4	12E-02 186E+01 DNICA 5	8.92416975922E- 2) THD = 2.41	02 463414E+02 7	0.008642810 %	
30 Derived fr C CORRIENT C C 1 C 34567890	-3.84254 om table: E FASE "A" 1234567890	525733E-02 1) RMS va " EN EL FIL 2 3 51234567890	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345678901234	12E-02 186E+01 DNICA 567890	6 6 6 6 6 12345678901234567	02 463414E+02 7 89012345678	0.008642810 %	
30 Derived (r C CORRIENT C 1 C 34567890 C HPIHMI	-3.842549 om table: E FASE "A" 1234567890	525733E-02 1) RMS VA " EN EL FIL 2 3 01234567890 BUS1	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345678901234 BUS2	12E-02 586E+01 DNICA 567890	8.92416975922E- 2) THD = 2.41 12345678901234567	02 463414E+02 7 89012345678	0.008642810 % 890	
30 Derived fr C CORRIENT C 1 C 34567890 C HPIHMIS C +-***///	-3.84254 om table: E FASE "A' 123456789(NHMAX /++++	525733E-02 1) RMS va " EN EL FIL 2 3 51234567090 BUS1	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345678901234 BUS2	12E-02 586E+01 DNICA 567890	8.92416975922E- 2) THD = 2.41 12345678901234567	02 463414E+02 7 89012345678	0.008642810 % 8	
30 Derived fr C C CORRIENT C 1 C 34567890 C HPIHMI C +-***/// 1941.026,5	-3.84254 om table: E FASE "A" 1234567896 NHMAX /++++ 43.1	525733E-02 1) RMS VA " EN EL FIL 2 3 01234567890 BUS1A F	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345678901234 BUS2 7A	12E-02 586E+01 DNICA 567890	8.92416975922E- 2) THD = 2.41 12345678901234567	02 463414E+02 7 89012345678	0.008642810 % 8 890	
30 Derived (r C CORRIENT C 1 C 34567890 C HPIHMI C +-**/// 1941.026.5 Begin the	-3.84254 om table: E FASE "A" 1234567890 NHMAX /++++ 43.1 Fourier se	525733E-02 1) RM5 va " EN EL FIL 2 3 01234567890 BUS1 BUS1A F eries compu	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE TA ARMO 12345678901234 BUS2 TA Tation using	12E-02 586E+01 DNICA 567890 332	8.92416975922E- 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point	02 463414E+02 7 8901234567 53. The f	0.008642810 1 8 890	followed
30 Derived fr C CORRIENT C 1 C 34567890 C HPIHMI C +-**/// 1941.026.5 Begin the by the las	-3.84254 om table: E FASE "A" 1234567890 NHMAX /++++ 43.1 Fourier so t two, an	525733E-02 1) RMS VA " EN EL FIL 2 3 01234567890 BUS1 BUS1A F eries compu	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345678901234 BUS2 ***** 7A teation using	12E-02 186E+01 DNICA 567890 332	8.92416975922E- 2) THD = 2.41 12345678901234567 equidistant point	02 463414E+02 7 89012345674 :3. The f	0.009642810 % 8990 first two points,	followed
30 Derived fr C CORRIENT C 34567890 C HPIHMI C +-**//1 1941.026.5 Begin the by the las 7.14935226	-3.84254 om table: E FASE "A" 1234567890 NHMAX /++++ 43.1 Fourier st t two, at 44042970E	525733E-02 1) RMS va " EN EL FIL 2 3 01234567890 BUS1A F BUS1A F eries compu- ce: 01 8.526	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345678901234 BUS2 TA tation using 8569946289060E	12E-02 186E+01 DNICA 567890 332 :+01	8.92416975922E 2) THD = 2.41 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055	02 463414E+02 89012345674 :\$. The f 0E+01 6.	0.008642810 8 890 first two points, 55917282104492206	followed +01
30 Derived fr C CORRIENT C 34567890 C HPIHMI C +-**/// 1941.026.5 Begin the by the las 7.14935226 Coefficien	-3.84254 om table: E FASE "A" 1234567809 NHMAX /++++ 43.1 Fourier Se t two, au 44042970E: ts of the	525733E-02 1) RMS va " EN EL FIL 2 3 01234567890 BUS1A F aries compu 00 8.526 resultant	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 12345678901234 BUS2 TA tation using 8569946289060E Fourier serie	12E-02 586E+01 0NICA 567890 332 :+01 25 foll	8.92416975922E 2) THD = 2.41 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex am	02 463414E+02 89012345670 :s. The f 0E+01 6.1 plitude"	0.009642810 8 890 (irst two points, 5591728210449220E 15 the square rc	followed +01 bot of the
30 Derived fr C CORRIENT C C 1 C 34567890 C 1074567890 C 107477890 C 107477990 C 10747990 C 1074990 C 10747990 C 10747990 C 1074790 C 107470 C 1074700 C 1074700 C 1074700 C 107470000000000000000000000000000000000	-3.84254: om table: E FASE "A' 1234567890 NNMAX /++++ 43.1 Fourier Se t two, a 44042970E ts of the squares of	525733E-02 1) RMS va " EN EL FIL 2 3 D1234567890 BUS1 BUS1A F eries compu re: 001 8.526 resultant of the	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345678901234 BUS2 7A tation using 8569946289060E Fourier serie	12E-02 186E+01 DNICA 5 5567890 332 1401 15 foll	8.92416975922E 2) THD = 2.41 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex am	02 463414E+02 7 89012345674 cs. The f 0E+01 6.! plitude"	0.008642810 8 890 first two points, 5591728210449220E is the square ro	followed +01 bot of the
30 Derived fr C CCORRIENT C 1 C 31567890 C HPIHMI C/// 1941.026.5 Begin the by the las Begin the by the las C	-3.84254: om table: E FASE "A' 123456789(NRMAX ///// Fourier set t two, au 44042970; ts of the squares of the sine	225733E-02 1) RMS va " EN EL FIL 2 3 D1234567890 BUS1A F eries compu- re : 0 0 0.526 resultant of the coefficien	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 12345678901234 BUS2 TA tation using 8569946289060E Fourier serie ts. "Fractio	12E-02 1866E+01 DNICA 5 567890 3322 :+01 es follon of f	8.92416975922E 2) THD = 2.41 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex am undamental" _appi	02 463414E+02 7 89012345674 .s. The f 0E+01 6.! plitude" ies to thi:	0.009642810 8 8 8 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	followed +01 pot of the
30 Derived fr C C CORRIENT C 1 C 34567890 C HPTHMI C +-**/// 1941.026.5 Begin the by the las 7.14935226 Coefficien num of the cosine and Harmonic	-3.84254 om table: E FASE "A 1234567896 NHMAX /++++ 43.1 Fourier si t two, a 440429708: ts of the squares of the sine	225733E-02 1) RMS va "EN EL FIL 2 3 3 3 3 3 3 3 3 4 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5 5	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345678901234 BUS2 ***** 7A taction using 8569946289060E Fourier serie ts. "Fractio	12E-02 186E+01 INICA 5 5567890 332 1401 155 follow 5 follow	8.92416975922E 2) THD = 2.41 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex am undamental" appl Compl	02 463414E+02 89012345674 :s. The f 0E+01 6. plitude" ies to this ex	0.008642810 8 890 Girst two points, 5591728210449220E is the square ro s amplitude. Fraction of	followed +01 pot of the
30 Derived {r C C CORRIENT C C 345678900 C HPIHMIC C +/// 1911.026,5 Begin the by the las Begin the by the las Coefficien sum of the Cosine and Harmonic number	-3.84254: om table: E FASE "A' 11234567899 XMMAX /++++ 43.1 Fourier set t two, al 44042970E ts of the squares of the sine	225733E-02 1) RMS va * EN EL FIL 2 3 BUS1A 567890 BUS1A F refers computed to 1 8.526 resultant 1 the cosine poficient	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 12345678901234 BUS2 TA TA tation using 8569946289060E Fourier serie ts. "Fractio	12E-02 186E+01 INICA 55567890 332 1401 155 follow 5 ine cient	8.92416975922E 2) THD = 2.41 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex an undamental" appl Compl Complex an Complex	02 463414E+02 7 89012345670 :s. The f 0E+01 6.1 plitude" ies to thi: ex	0.008642810 8 8 90 55591728210449220E 15 the square rc s amplitude. Fraction of fundamental	followed +01 bot of the
30 Derived fr C C CORRIENT C 34567890 C HPIHMI C +-***/// 1941.026.5 Begin the by the las 7.14935226 Coefficien sum of the Cosine and Harmonic number 0	-3.842541 om table: E FASE "A" 1234567809 NHMAX /++++ 43.1 Fourier si 44042970E squares of the sine 2.34074	225733E-02 1) RMS va " EN EL FIL 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 4 5 3 5 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345678901234 BUS2 ***** 7A tation using 8569946289060E Fourier serie ts. "Fractio 0.000000000	12E-02 186E+01 ONICA 5567890 332 1+01 25 foll on of f Sine cient 0E+00 OT 02	6.92416975922E 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex am undamental" appl Complitu 2.34076450145	02 463414E+02 89012345670 :s. The f 0E+01 6.1 plitude" ies to thi: ex de 02	0.008642810 8 8 90 first two points, 5591728210449220E is the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.001302410	followed +01 pot of the
30 Derived {r C C CORRIENT C 1 C 34567890 C HPIHMIC C +/// 1941.026,5 Begin the by the las Begin the by the las r.14935226 Coefficien aum of the cosine and Harmonic 0 1 2	-3.842541 om table: E FASE "A" 11234567899 NNMAX /++++ 43.1 Fourier s: 44042970E ts of the squares of the sine cc 2.340744 1.566699	225733E-02 1) RMS va " EN EL FIL 2 3 BUS1A F67890 BUS1A F rries compu te : pries compu te : coefficien coefficient 45004E-02 06624E+020	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 12345678901234 BUS2 TA tation using 85699462890606 Fourier serie ts. "Fractio 0.000000000 8.778233805	12E-02 186E+01 ONICA 5 5567890 332 :+01 25 foll on of f Sine cient 0E+00 0E+01 (7 c)	8.92416975922E 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex and Complex and undamental" appl Complex 1 2.34074645014E 1.7356455074742 1.7356455074742	02 463414E+02 7 89012345670 	0.008642810 8 8 90 55591728210449220E 13 the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.001303410 1.000000000	followed +01 apt of the
30 Derived {r C CORRIENT C 145667890 C 34567890 C HPIHMI: Begin the Begin the Begin the Saum of the cosine and Narmonic number 0 1 2	-3.842543 om table: E FASE "A" 123456789 NHMAX //I++ 43.1 Fourier si ttwo, ai 44042970E ts of the squares of the sine cc 2.34074 1.566669 2.333477	225733E-02 1) RMS va " EN EL FIL 2 3 1)234567890 BUS1A F Pries compu Coll 8.526 resultant 50 the Cosine cofficient Cosine cofficient 250 in 260 in 26	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345678901234 BUS2 ***** 7A tation using 8569946289060E Fourier serie ts. "Fractio 0.000000000 8.7783834806 5.1356503603	12E-02 186E+01 ONICA 5 5567890 3322 332 332 332 332 332 332 3	6.92416975022E 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex am undamental" appl 2.34074645014E 1.79586307474E 2.389321654832E	7 463414E+02 7 89012345670 0E+01 6.1 plitude ies to this ex de 01 02 02 02	0.008642810 8 8 90 first two points, 5591728210449220E is the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.00130410 1.000000000 0.013304580	followed +01 pot of the
30 Derived {r C CORRIENT C 1 C 34567990 C HPHIMI C	-3.842541 om table: E FASE "A 12345678 NHMAX /++++ 43.1 Fourier s t two, a t 40429708 ts of the squares of the sine C2.340744 1.566699 2.33477 2.43509	225733E-02 1) RMS va " EN EL FIL 2 3 BUS1A 567890 BUS1A F resultanto f the coefficient Cosine coefficient 645014E-01 202224E+02 707746E+00 016745E+00	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 12345676901234 BUS2 TAN tation using 85699462890606 Fourier serie ts. "Fractio Coeffi 0.00000000 8.7783834806 5.136503604 3.709387854	12E-02 186E+01 0NICA 5567890 332 101 105 follor 10E+00 10E+00 10E+01 15E-01 15E-01	8.92416975922E 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex appl ampliant 2.340746546 1.79586307476 2.40346548 2.403465468 2.4034556688 2.403456688 2.403456688 2.40345688 2.40345688 2.4145688 2.4145688 2.4145688 2.4145688 2.4145688 2.4145688 2.4145688 2.4145888 2.41458888 2.4145888 2.4145888 2.4145888 2.41458888 2.41458888 2.41458888 2.41458888 2.4145888 2.41458888 2.41458888 2.41458888 2.41458888 2.41458888 2.414588888 2.41458888 2.41458888 2.41458888 2.414588888 2.414588888 2.41458888888 2.41458888888 2.414588888888888888888888888888888888888	02 463414E+02 89012345677 es. The f 0E+01 6. plitude" ies to thi: de 01 02 00 00	0.008642810 8 8 90 (irst two points, 55591728210449220E is the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.00130400 0.0130400 0.01304588 0.013745888	followed +01 act of the
30 Derived {r C CORRIENT C C 34567890 C HPIHMI: Segin the Begin the Begin the Begin the Coefficien sum of the cosine and Harmonic number 1 2 3 3 4 6	-3.842543 om table: E FASE "A. 1234567899 NNMAX //+++ 13.1 Fourier si t two, a t t t two, a t t two, a t t t t t two, a t t t t t t two, a t t t t t two, a t t t t t t t t t t t t t t t t t t t	225733E-02 11 RMS va " EN EL FIL 2 3 BUSIA F Pries compu- Cosine cofficient Cosine cosine	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345678901234 BUS2 ***** 7A taction using 8569946289060E Fourier serie ts. "Fractio 0.000000000 8.7783834806 5.1356503604 3.7093874803	12E-02 1386E+01 1312 132 132 132 1401 15567890 132 1401 15567890 132 1401 15567890 132 1401 15567890 132 1401 15567890 132 1401 15567890 15567890 1556790 1557900 155790 1557900 1557900 155790 1557900 1557900 15579	6.92416975922E- 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex am undamental" applitu 2.34074645014E- 1.79586307474E+ 2.38921654832E+ 2.46318576309E+ 2.4731641809E+ 2.77764164097E+ 2.77764194097E+ 2.77764100000000000000000000000000	7 463414E+02 7 89012345670 0E+01 6.1 plitude" ies to thi: ex de 01 00 00 00 00	0.008642810 8 8 90 first two points, 5591728210449220E is the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.00130410 0.0130410 0.01371588 0.0124587 0.01371588	followed +01 pot of the
30 Derived {r C CORRIENT C 1 C 34567990 C HPHIMI C	-3.84254 om table: E FASE "A' 123456789 NNMAX 7/+++ 13.1 7/+++ 13.1 7/+++ 13.1 7/+++ 13.1 7/+++ 13.1 7/++ 140429702 7/- 7/++ 140429702 7/- 7/- 2,43509 2,34354 2,34359 2,34354 2,34359 2,34354 2,34359 2,34354 2,34574 2,34359 2,34359 2,34359 2,34359 2,34359 2,34574 2,34359 2,345746 2,34574 2,34576 2,34576 2,3457676 2,34576767676767676767676767676767676767676	225733E-02 11 RMS va " EN EL FIL 2 3 BUS1A 567890 BUS1A F erites compu cv: cv: confficient Cosine cofficient Cosine cofficient Cosine cofficient Cosine cofficient Cosine cofficient Cosine cofficient Cosine cofficient Cosine cofficient Cosine c	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345676901234 BUS2 7A Itation using 85599462890606 Fourier serie ts. "Fractio coeffi 0.00000000 8.7783834806 5.1356503604 1.7093878549 1.95803604 1.95804 1	12E-02 186E+01 19NICA 5567890 332 1401 155 foll 155 foll 1	8.92416975922E 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex an undamental" appl amplitu 2.34074450145 1.39586307474E- 2.39032165403E+ 2.46318576309E+ 2.4756457166457= 3.00146189066E+ 3.4016575760155	02 463414E+02 7 8901234567 8901234567 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	0.008642810 8 8 90 (irst two points, 5591728210449220E is the square ro s amplitude, Fraction of fundamental 0.00130410 1.000000000 0.013304507 0.013715888 0.015465923 0.0157122001 0.070052560	followed +01 bot of the
30 Derived {r C CORRIENT C C 34567890 C HPIHMI: Segin the Begin the By the las Sum of the cosine and Harmonic number 1 1 2 3 3 5 5 5 5 7	-3.84254 om table: E FASE "A' 123456709 NNHAX 123456709 NNHAX 1234570 1245670 1245670 124570 2.33077 2.35077 2.35077 2.35077 2.35077 2.35077 2.35077 2.35077 2.35077 2.35077 2.35077 2.35077 2.35077 2.55077 2.55077 2.55077 2.55077 2.55077 2.55077 2.55077 2.55077 2.55077 2.55077 2.55077 2.55077 2.550777 2.550777 2.55077777777777777777777777777777777777	225733E-02 11 RMS va " EN EL FIL 2 3 BUS1A F Pries compu Coll 8.526 resultant 5 the Cosine cofficient Cosine cofficient 2453/0E+00 1760EF+00 24370E+01 24370E+01 24370E+01	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345678901234 BUS2 ***** 7A 8569946289060E Fourier serie ts. "Fractio 0.000000000 8.135650364 3.1356356164 3.2958030101 2.958030100 2.958030101 2.958030101 2.958030100 2.9580301000 2.9580301000 2.9580301000 2.9580301000 2.9580301000 2.95803010000 2.9580301000 2.95803000000 2.9580300000000 2.9580300000000000000000000000000000000000	12E-02 1366E+01 1312 1567890 132 1401 15567890 132 1401 155 155 167 167 167 167 167 167 167 167	6.92416975922E 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex am undamental" applitu 2.34074645014E 1.79586307474E 2.46318576309E 2.77661669575 3.7416669575 3.41967573601E 1.7308921063 3.741967573601E 3.7409829106	7 463414E+02 7 89012345670 0E+01 6.1 plitude" ies to thi: ex de 01 02 00 00 00 00 00 00 01	0.008642810 8 8 90 first two points, 5591728210449220E is the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.00130410 0.0130410 0.01371588 0.01371588 0.01371588 0.013715586 0.0137052560	followed +01 pot of the
30 Derived {r C CORRIENT C 1 C 34567890 C HPTHMI C	-3.84254 om table: E FASE "A 123456789 WMMAX /+1++ Squares of the site of the squares of the site of the squares of the site of the squares of 1.566695 2.333477 2.63058 2.63058 2.63058 -1.09127 -5.55204 -2.28814	225733E-02 1) RMS va " EN EL FIL 2 3 BUS1A F67890 BUS1A F Prites compu- re: compu-	8.0545423100 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345676901234 BUS2 7A Itation using 85699462890600 Fourier serie ts. "Fractio coeffi 0.00000000 8.7781834806 6.1356503604 1.7093878549 7.9788141015 2.952938301 9.087713634 1.3426756133 5.249946885	12E-02 1386E+01 1386E+01 15567890 1332 1567890 1332 155701 155701 155-01 15E	8.92416975922E 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex an undamental" appl amplitu 2.3407465014E 1.79586307474EP 2.346316546309EF 2.79764766457 2.797646518 5.771664575 3.00146189066EF 3.40167573601EF 5.71208982190EF 2.34704004850*	02 463414E+02 7 89012345670 0E+01 6. plitude" ies to thi: ex 01 02 00 00 00 00 01 01 01 00 00	0.008642810 8 8 90 (irst two points, 55917282104492206 is the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.00130410 1.000000000 0.01304507 0.013715888 0.01546923 0.167132001 0.070052560 0.318069340 0.01307489	followed +01 pot of the
30 Derived {r C CORRIENT C C 34567890 C 191677 C//1 1911.026.5 Begin the by the las Begin the by the las Samo of the Cosfileien Number (Harmonic number 1 1 3 4 5 6 7 8 8 9	-3.84254 om table: E FASE "A' 123456709 NUMMAX 13.1 Fourier sr t two, ai t t	225733E-02 11 RMS va " EN EL FIL 2 3 BUS1A F BUS1A F BUS1A F BUS1A F BUS1A F BUS1A F State Confficient State Confficient State Confficient State Confficient State Confficient State Confficient State State Confficient State State Confficient State Confficient State Confficient State Confficient State Confficient State Confficient State Confficient State Confficient State Confficient State Confficient State Confficient State	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345679901234 BUS2 7A BUS2 Fourier serie ts. "Fractio 0.000000000 6.7703914606 5.79788141015 2.9529039301 9.0807713634 1.32656133 5.2499836885 5.247980803	12E-02 1386E+01 1312 15567890 1332 1+01 15567890 1332 1+01 15567890 1557780 15	6.92416975922E- 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex am undamental" appl Compl 1.795865761 2.4074645014E- 1.795821057415 2.40318576308 2.40318576308 2.40318576308 2.40318576308 2.40368761896308 2.41967573601E- 5.71209821908- 1.3418963508- 1.3241896508- 1.3241896508- 1.3241896508- 1.3241896508- 1.3241896508- 1.3241896508- 1.3241896508- 1.3241896508- 1.3241896508- 1.3241896508- 1.3241896508- 1.3241896508- 1.3241896508- 1.3241896508- 1.3241896508- 1.3241896508- 1.3241896508- 1.324189508- 1.324189508- 1.324189508- 1.324189508- 1.324189508- 1.324189508- 1.324189508- 1.324189508	7 463414E+02 7 89012345670 0E+01 6.5 plitude" ies to thi: ex de 02 02 00 00 00 00 01 01 01 00 00	0.008642810 8 8 900 first two points, 5591728210449220E is the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.00100400 0.01315887 0.1315887 0.1315887 0.1315867 0.1315867 0.1315867 0.1315867 0.1312201 0.031806340 0.031072489 0.007302248	followed +01 pot of the
30 Derived [r C CORRIENT C 1 C 34567990 C HPHIMI C	-3.84254 om table: E FASE "A. 123456789 WMMAX /+1++ WMMAX /+1++ 1.566639 2.334774 1.566639 2.33477 2.33477 2.4350958 2.4350958 2.4350958 -1.5665958 -1.323091 -5.255204 -1.2323091	225733E-02 1) RMS va " EN EL FIL 2 3 BUS1A 567890 BUS1A F Prites compu- ce: compu-	8.0545423100 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 1234567901234 BUS2 ****** 7A Itation using 85699462890606 Fourier serie ts. "Fractio coeffi 0.00000000 8.7781834806 5.1356503604 3.7093878549 4.7978141015 2.9529038301 9.0877713634 1.3426756130 5.2477630805 5.2477630805 5.247785 5.2477855 5.2477855 5.247785 5.2477855 5.2477855	12E-02 1386E+01 1386E+01 1586E+01 15567890 1332 1401 15567890 1332 1401 15567890 1332 1401 155701 156701 157700000000000000000000000000000000000	<pre>8.92416975922E 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex am undamental" appl 2.34074645014E 2.349321654815 2.349321654815 2.349321654815 2.77764766457 2.3493216548 3.00146189066E 3.41967573601E 5.3126982190E 5.3296833246 1.32413898370E 5.25960833246</pre>	02 463414E+02 7 89012345670 0E+01 6.1 plitude" ies to thi: ex de 01 02 00 00 00 01 01 01 01 01 01 01 01 01	0.008642810 8 8 90 (irst two points, 55917282104492206 is the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.001304507 0.013715888 0.015466923 0.015466923 0.0157122001 0.073072749 0.007373274 0.007373274 0.007373274	followed +01 pot of the
30 Derived {r C CORRIENT C C 34567890 C 34567890 C +-***/// 1931.026.5 Begin the by the las Begin the by the las Saum of the Cosfileien Number (Harmonic 1 1 3 4 5 6 7 8 9 10	-3.84254 om table: E FASE "A' 123456709 NUMMAX 13.1 Fourier sr t two, ai t t	225733E-02 11 RMS va * EN EL FIL 2 3 BUS1A F BUS1A F BUS1A F BUS1A F BUS1A F BUS1A F STICE CONTINUE 5 5 1 1 5 5 1 1 2 5 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1 2 3 2 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 3 2 2 3 2 3 2 2 3 3 2 3 3 2 3 3 2 3 3 2 3 3 2 3 3 3 2 3 3 3 3 2 3 3 3 3 3 3 3 2 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3 3	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345576901234 BUS2 ***** 7A 8569946289060E Fourier serie ts. "Fractio 0.000000000 8.7703814605 8.79834605 8.7978141015 2.952908301 9.0807713634 1.32656133 5.2497830803 -1.8660945892 1.30605909	12E-02 1366E+01 137 132 132 132 132 132 132 132 132	6. 92416975922E- 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex am undamental" appl Compl 2.34074645014E- 1.79586015474E- 2.36025474E- 2.34074645014E- 2.340746561545 2.014618906657E- 3.001461890650E+ 1.324168963190E- 2.34764084850E+ 1.3241898370E- 5.722698219055E- 5.225960831246E- 5.225960831246E- 5.225960831246E- 5.2259121955E- 5.2251219355E- 5.225121935E- 5.225121935E- 5.225121935E- 5.225121935E- 5.225121935E- 5.225121935E- 5.22512135E- 5.225121935E- 5.225121935E- 5.225121935E- 5.225121935E- 5.225121935E- 5.225121935E- 5.225121935E- 5.225121935E- 5.225121935E- 5.22512195E- 5.22512195E- 5.22512195E- 5.22512195E- 5.22512195E- 5.22512195E- 5.22512195E- 5.22512195E- 5.22512195E- 5.22512195E- 5.22512195E- 5.22512195E- 5.22512195E- 5.255121955E- 5.25512195E- 5.25512195E-	7 463414E+02 7 89012345670 0E+01 6.5 plitude" ies to thi: ex de 02 02 00 00 00 00 01 01 00 00 00 00 00 00 00	0.008642810 8 8 900 first two points, 5591728210449220E is the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.00100400 0.01319587 0.015465923 0.15415201 0.03182061 0.031022560 0.318069340 0.031072489 0.002928736 0.022481901	followed +01 pot of the
30 Derived fr C CORRIENT C 1 C 34567990 C HPHIMI C	-3.84254 om table: E FASE "A. 123456789 WMMAX /++++ 13.1 Fourier s: two, a. 1.56663 2.33147 2.4350970E: the sine squares of the sine squares of the sine squares of 1.56663 -3.371102 2.435091 -5.255204 -1.32309 -5.255204 -3.23209 -4.225733 -4.54541	225733E-02 1) RMS va * EN EL FIL 2 3 3 2 3 1234567800 - - - - - - - - - - - - -	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 1234567901234 BUS2 ****** 7A tation using 85699462890606 Fourier serie ts. "Fractio coefíi 0.00000000 8.7783834806 5.1356503604 3.7393878549 1.952938301 0.82756333 5.2497803885 5.2477830805 5.24788413 5.24784	12E-02 1866E+01 1981CA 5567890 332 1401 15567890 332 1401 155701 155-01 15E-02 15E-00 15E	<pre>8.92416975922E 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex am undamental" appl complitu 3.4074645014E 2.36932165483216548 2.77664573766157 3.00146189066E 3.41967573601E 5.71209982190E 3.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464393 2.347464333 2.347464333 2.347464333 2.347464333 2.34746433 2.347464333 2.347464333 2.347464333 2.347464333 2.347464333 2.34746433 2.34746433 2.34746433 2.34746433 2.34746433 2.34746433 2.34746433 2.34746433 2.34746433 2.34746433 2.34746433 2.34746433 2.34746433 2.34746433 2.34746433 2.3474643 2.34746433 2.34746454 2.3474645454444444444444444444444444444444</pre>	02 463414E+02 7 89012345670 0E+01 6.1 plitude" ies to thi: ex de 01 02 00 00 00 01 01 01 01 01 01 01 01	0.008642810 8 8 90 Cirst two points, 55917282104492206 is the square ro 5 amplitude. Fraction of fundamental 0.00130410 1.00000000 0.013304507 0.013715888 0.015466923 0.167132001 0.073052560 0.318069340 0.00377274 0.003737274 0.00292736 0.00292736 0.029263612	followed +01 pot of the
30 Derived {r C CORRIENT C C 34567890 C 34567890 C HPIHMI 1931.026.5 Begin the by the las Begin the by the las Samo of the Cosfileien Sum of the Cosfileien Larmonic number 1 1 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13	-3.84254 om table: E FASE "A' 123456709 NUMMAX 13.1 Fourier sr t two, ai t t	225733E-02 11 RMS va * EN EL FIL 2 3 BUS1A F BUS1A F BUS1A F BUS1A F BUS1A F BUS1A F Fries compu- Conficient Conf	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 1234557991234 BUS2 ***** 7A 8569946289060E Fourier serie ts. "Fractio 0.000000000 8.7703814605 8.79834606 8.793834606 8.793834606 8.793834606 8.793834605 8.79783460 1.32656130 5.2497830803 5.2497830803 -1.8660945892 1.30660919093 2.7312528413 6.2120105430	12E-02 1366E+01 137 137 137 137 137 137 137 13	6. 92416975022E- 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6. 371308517456055 low. "Complex am undamental" appl Compl 2. 3407445014E- 1. 79586307474E+ 2. 393166403E+ 2. 41967573601E+ 5. 7120892190E+ 2. 3476408450E+ 1. 3241649850E+ 1. 3241649850E+ 1. 3241649850E+ 2. 3476408450E+ 5. 7120892190E+ 5. 7220892190E+ 5. 7220892190E+ 5. 725193550E+ 5. 725193550E+ 5. 52519355E+ 4. 55361164994E+ 2. 46973692001E+	7 463414E+02 7 89012345670 0E+01 6.1 plitude" ies to thi: ex de 02 02 00 00 00 00 01 01 01 00 00 00 00 00 00	0.008642810 8 8 900 first two points, 5591728210449220E is the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.001304687 0.01374687 0.01374687 0.01374687 0.03104687 0.03104687 0.03104687 0.0317201 0.0310725560 0.03107274 0.002928736 0.022433612 0.02253612 0.03253612	followed +01 pot of the
30 Derived {r C CORRIENT C C CORRIENT C C 1 C 105 C 105 DIMMI C	-3.84254 om table: E FASE "A. 123456789 WiMAX /+1++ Squares of the sine squares of the sine squares of the sine squares of the sine squares of 1.566639 -3.377102 -3.33477 2.43509708: -3.37102	225733E-02 1) RMS va * EN EL FIL 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 12345678901234 12345678901234 12345678901234 12345678901234 12345678901234 1234567890600 Fourier serie 5.0000000000 0.7703814806 5.1356503604 3.703871384806 5.1356503604 3.703871384806 5.24778038030 5.2477803803 5.2477803803 5.2477803803 5.2477803803 5.2477803803 5.2477803803 5.2477803803 5.247780385 5.247785 5.24778	12E-02 1866E+01 1875 1866E+01 1875 18567890 3322 1901 1902	<pre>8.92416975922E 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex an undamental" appl complex .3407465014E 2.3693216548320 2.77664507E 2.16596302474E 2.7764766457F 3.00146189066E 1.41967573601E 5.3126982190E 2.347646315E 5.25960831246E 4.2325219355E 4.5361164994E 2.45973164998E 2.45973164998E 2.45973164998E 2.45973164998E 2.45973164998E 2.45973164998E 2.45973164998E 2.45973164998E 2.45973164998E 2.45973164998E 2.45973164998E 2.4597360201E 4.224766083124 2.5361164994E 2.4697362001E 4.2247660831246 2.536164994E 2.4697362001E 4.2247660831246 2.536164994E 2.4597660831246 2.536164994E 2.4597660831246 2.536164994E 2.4597660831246 2.536164994E 2.4597660831246 2.536164994E 2.4597660831246 2.536164994E 2.536164994E 2.536164994E 2.536164994E 2.536164994E 2.536164994E 2.536164994E 2.536164994E 2.536164994E 2.5366164994E 2.536676494E 2.536676494E 2.536676494E 2.536676494E 2.53676494E 2.53676494E 2.53676494E 2.53676494E 2.53676494E 2.53676494E 2.53676494E 2.53676494E 2.53676494E 2.53676494E 2.53676494E 2.53676494E 2.53676494E 2.53676494E 2.53676494E 2.53676494E 2.53676494E 2.5367644E 2.53676494E 2.536764E 2.5367644E 2.536767644E 2.5367644E 2.5367644E 2.536</pre>	02 463414E+02 7 89012345670 0E+01 6. plitude" ies to thi: ex de 01 02 00 00 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01	0.008642810 8 8 90 (irst two points, 55917282104492206 is the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.00130410 1.00000000 0.013304587 0.013746923 0.167132001 0.01392560 0.01304587 0.013715888 0.0546923 0.05737274 0.003737274 0.00292736 0.02255612 0.0025562 0.00255262 0.00252562 0.003752268 0.00252662 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.0025260 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.002562 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.00375276 0.0025612 0.0025612 0.0025612 0.0025612 0.00255612 0.00255612 0.00255612 0.00255612 0.002525612 0.00255612 0.002525612 0.002525612 0.002525612 0.002525612 0.002525612 0.002525612 0.002525612 0.002525612 0.00255612 0.002525612 0.002525612 0.00255612 0	followed +01 pot of the
30 Derived fr C CORRIENT C 1 34567890 C 34567890 C HPIHMI 1931.026.5 Begin the by the las Begin the by the las Samo of the Cosfileien Sum of the Cosfileien Larmonic number 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	-3.84254 om table: E FASE "A' 123456709 NUMMAX 13.1 Fourier sr t two, a t t t two, a t t t two, a t t t t t t t t t t t t t t t t t t t	225733E-02 11 RMS va * EN EL FIL 2 3 BUS1A F BUS1A F BUS1A F BUS1A F BUS1A F BUS1A F BUS1A F BUS1A F Confficient Conffici	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 1234557991234 BUS2 ***** 7A 8569946289060E Fourier serie ts. "Fractio 0.000000000 8.7703814605 8.79834606 8.793834606 9.0807713634 1.326503604 1.32650360 9.0807713634 1.32656130 5.2497830803 -1.8660945892 1.30660519093 2.7312528413 8.2105430 8.436952931	12E-02 1866E+01 NICA 5567890 332 1401 1567890 332 1401 1567890 332 1401 1567890 132 1401 1567890 156701 156701 168-01 156701 168-01 156701 168-01 156701 168-01 158-01 168-02 169-02 169-0	6.92416975022E- 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex am undamental" appl Complitu 2.34074645014E- 1.7958307474E+ 2.403181654850E+ 2.403181654850E+ 3.0146189065E+ 3.0146189065E+ 3.0146189050E+	7 463414E+02 7 89012345670 0E+01 6.1 plitude" ies to thi: ex de 01 00 00 00 00 01 01 01 00 00 01 00 00	0.008642810 8 8 900 first two points, 5591728210449220E is the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.00130410 0.0130410 0.01304587 0.01374587 0.01372687 0.03106340 0.03106340 0.0310725560 0.031072489 0.03107248 0.002928736 0.022431901 0.02253612 0.02352499 0.002352499	followed +01 pot of the
30 Derived {r C CORRIENT C C CORRIENT C C 10 C 10567990 C 1071101.0265 Begin the S the las 7.14935226 Coefficien sum of the Cosine and Harmonic C cosine and Harmonic 1 2 3 4 5 5 6 6 7 7 7 9 10 11 12 13 14 15 16	-3.84254 mm table: E FASE "A 1234567890 WiMAX /+1++ Squares of the sine squares of the sine squares of the sine squares of 1.566639 -2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.43309708; 2.525529; 2.4,534511; 2.390330; 4.4139666; 2.952299; 3.4439708; 2.4439708; 2.454511; 2.52529; 3.4539708; 3.45397	225733E-02 1) RMS va * EN EL FIL 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	8.0545423108 lue = 1.908196 12345678901234 12345678901234 BUS2 77 77 76 76 76 76 77 76 77 77	12E-02 386E+01 NICA 5 567890 332 401 5567890 332 401 557001 55701 55701 55701 557001 55701 55701 55701 55701 557001 557001 55701 55700000000000000000000000000000000000	<pre>8.92416975022E 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex arr undamental" appl complex .34074645014E 1.79586307474E 2.36932165483E 2.77667573601E 5.71209982190E 3.2413898370E 5.25960833246E 4.42355219355E 4.5361164994E 2.45973600324 1.5251164994E 2.459736001E 4.52516146994E 2.459736001E 4.525219355E 4.525219355E 4.525219355E 2.59246730314EE 2.42736903134EE 2.4273690314E 2.42273690314E 2.42273690314E 2.42273690314E 2.42273690314E 2.42273690314E 2.529246730314E 2.42273690314</pre>	02 463414E+02 89012345670 cs. The f 0E+01 6.: plitude" ies to thi: ex de 01 02 00 00 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01	0.008642810 8 8 90 Cirst two points, 55917282104492206 is the square rd s amplitude. Fraction of fundamental 0.00130410 1.00000000 0.013304587 0.013466923 0.167132001 0.01304587 0.013715888 0.015466923 0.167132001 0.07373274 0.003732749 0.002525612 0.003752368 0.0255612 0.00255612 0.00255612 0.002522669 0.001666312 0.000666312	followed +01 pot of the
30 Derived fr C CORRIENT C 1 34567890 C 34567890 C HPIHMI I 931.026.5 Begin the by the las Begin the by the las Source of the Coefficien Sum of the Cosine and I that Cosine and I that Source of the Cosine and I that Source of the Cosine and I that Source of the Source	-3.84254 om table: E FASE "A' 123456709 NUMMAX 13.1 5 Fourier sr 123456709 13.1 5 Fourier sr 140429702 1.5 2.3 2.4 3.0 2.5 5.5 2.4 3.0 4.2 2.3 3.0 7.2 2.4 3.0 2.4 3.0 2.5 5.5 2.4 3.0 2.5 5.5 2.4 3.0 2.5 5.5 2.4 3.0 2.5 5.5 2.4 3.0 2.5 5.5 2.4 3.0 2.5 5.5 2.4 3.0 2.5 5.5 2.4 3.0 2.3 3.5 2.5 5.5 2.4 3.0 2.3 3.5 2.3 4.2 2.3 3.5 2.3 4.2 2.3 3.5 2.3 4.2 2.3 3.5 2.2 3.4 2.2 3.0 2.3 3.5 2.2 3.5 5.5 2.2 4.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3.2 3	225733E-02 11 RMS va * EN EL FIL 2 3 BUS1A FIL BUS1A FIL BUS1A FIL BUS1A FIL BUS1A FIL BUS1A FIL CONTINUE	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 1234557991234 BUS2 7A BUS2 Fourier serie ts. "Fractio 0.000000000 6.770304400 5.1356503604 7.7038144005 5.952908301 9.0807713634 7.9788144015 5.247980803 5.2499836865 5.247780803 -1.8660945892 1.3066756130 5.2497803603 5.2499836865 5.247780803 -1.8660945892 1.306619093 2.7312528413 8.2105430 8.4369552931 4.86613414 4.3512609228	12E-02 186E+01 NICA 55 55678900 332 101 105 102 102 102 102 102 102 102 102	6. 92416975922E- 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6. 371308517456055 low. "Complex am undamental" appl Compl 2. 3407445014E- 1. 79586005174E- 2. 3607645014E- 2. 3407445014E- 2. 34074645014E- 2. 340746189065E- 1. 41967573601E- 5. 7120982190E- 2. 3476408450E+ 1. 3241689630E+ 5. 7220982190E- 5. 325960831246E- 4. 4235219355E+ 4. 55361164994E- 2. 469730348E- 9. 46222917869E- 9. 46222917869E-	7 463414E+02 7 89012345670 0E+01 6.5 plitude" ies to thi: ex de 02 02 00 00 00 00 01 01 00 00 01 01 00 00 01 01	6.008642810 8 8 900 first two points, 5591728210449220E is the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.00100400 0.013046923 0.015465923 0.1571282101 0.0318087 0.015465923 0.15712201 0.0319687 0.015465923 0.16713201 0.03196340 0.03197274 0.002928736 0.022453612 0.02352499 0.0016526890	followed +01 Not of the
30 Derived {r C CORRIENT C C CORRIENT C C C S I DEC C S I DEC C S I DE	-3.84254 om table: E FASE "A 1234567890 WiMAX /+++ 13.1 Fourier st two, a 340429708: t sto of the squares of the sine squares of 1.566639 -2.2430972 2.66058 -2.24309 -2.53710 -2.53805 -2.53710 -2.53805 -2.52509 -4.22573 -4.13966 -2.952299 -8.402395	225733E-02 1) RMS va * EN EL FIL 22 21234567890 BUS1 	8.0545423108 lue = 1.908196 Liue = 1.908196 4 12345678901234 BUS2 ***** 7A 75 76 76 76 76 77 78 78 78 79 79 79 79 79 79 79 79 79 79	222-02 886E+01 NICA 550 332 401 8550 810 810 810 810 810 810 810 810 810 81	<pre>8.92416975022E 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex ar undamental" appl complex .34074645014E 2.369321654815E 2.376645014E 2.77664503124 5.771209982190E 2.347346645014E 5.71209982190E 2.34734664575 3.00146189066E 1.41967573601E 5.25960831246E 4.5251164994E 2.325219355E 4.5251164994E 2.52516493254E 2.459736001E 4.525219355E 2.99246730314E 2.99246730314E 2.99246730314E 2.9924673034E 2.9924673034E 3.922429178659 3.45229178659</pre>	02 463414E+02 7 89012345670 cs. The f 0E+01 6.1 plitude" ies to thi: ex de 01 02 00 00 01 01 01 01 01 01 01 02	0.008642810 8 8 90 Clirst two points, 55917282104492206 is the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.00130410 1.00000000 0.013304587 0.013466923 0.15466923 0.167132001 0.01304587 0.013752560 0.013072489 0.007373274 0.002525612 0.013752368 0.0224631901 0.00255612 0.00255612 0.013752368 0.0025269 0.001666312 0.000526890	followed +01 pot of the
30 Derived {r C CORRIENT C C 34567890 C HPIHMI C 14915226 C / - / - / - / - / - / - / -	-3.84254 om table: E FASE "A' 1234567090 13456709708 40000 13450708 50000 1.56669 2.333472 2.43509728 2.66059 2.6059 2.633707 1.555204 -1.32309 -5.552204 -1.32309 -5.25629 -4.22573 -4.254541 -2.29034 -2.29523 -4.25529 -8.40239 -8.40239	225733E-02 1) RMS va * EN EL FIL 2 BUS1A F Fries compu- Control file resultant 1 6501 8.526 resultant 1 645014E-01 196166E+00 196166E+00 196166E+00 196318E+00 36633E+01 266326E+01 273448E+00 19922E-01 224946E-01 23	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 1234567991234 BUS2 7A 8569946289060E Fourier serie ts. "Fractio 0.000000000 8.7703144005 5.1356503604 7.7038144005 5.932903810 9.0807713634 7.797881441015 5.2952038301 9.0807713634 1.3426561330 5.2499836865 5.247780803 -1.8660945892 1.30660519093 2.7312528413 8.216513414 4.3512609228	2128-02 886E+01 NICA 5557890 332 332 332 332 332 332 332 332 332 33	6. 92416975922E- 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6. 371308517456055 low. "Complex am undamental" appl Compl 1. 7958645014E- 1. 795821054718- 2. 463185763082- 2. 463185763082- 2. 463185763082- 3. 01461890665- 1. 34764064850E- 1. 3241689630E- 5. 7120982190E- 5. 726982190E- 5. 725960831246E- 5. 725961164994E- 2. 469730348E- 5. 422766031318E- 2. 924766031318E- 2. 924766031318E- 9. 46222917869F-	7 463414E+02 7 89012345670 0E+01 6.5 plitude" ies to thi: ex de 02 02 00 00 00 01 01 00 00 01 01 00 00 01 01	6.008642810 8 8 900 first two points, 5591728210449220E is the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.0012016 1.000000610 0.013716878 0.015465923 0.15715878 0.015465923 0.15715878 0.015465923 0.15715201 0.031705876 0.0137274 0.002928736 0.02253612 0.02352499 0.001575268 0.002352499 0.001526890	followed +01 Not of the
30 Derived {r C CORRIENT C 1 C 34567990 C 11911.02.5 Begin the by the 1as 7.14935226 Coefficien sum of the Cosine and Harmonic C 10 2 3 4 5 5 6 6 7 1 2 3 4 5 5 6 6 7 1 1 1 1 2 3 4 5 5 6 6 1 7 1 1 2 3 1 4 5 5 6 6 1 1 1 2 1 3 1 4 5 5 1 6 1 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1 1 1 1 1	-3.84254 om table: E FASE "A. 1234567890 WHMAX /+1++ Fourier st two, and 440429708: two, and 440429708: c 2.340744 1.566639 -3.337102 2.435097 2.435097 -3.33747 2.435097 -5.377102 -5.377102 -5.32529 -4.222573 -4.545411 -2.39033 -4.139666 -2.952299 -8.402395	225733E-02 1) RMS va * EN EL FIL 2 21234567890 BUS1 	8.0545423108 lue = 1.908196 Lue = 1.908196 4 12345678901234 BUS2 77 77 70 70 70 70 70 70 70 70	12E-02 186E+01 15567890 1322 132 132 132 132 132 132 13	6.92416975922E 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex ar undamental" appl complex amplitu 2.34074645014E- 1.79586307474E+ 2.38032165483E+ 2.77664507E+ 3.00146189066E+ 1.41967573601E+ 5.7120982190E+ 3.32413898770E+ 5.25960831246E+ 1.42355219355E+ 4.52361164994E+ 2.459736003124E+ 2.459736003124E+ 2.459736003124E+ 2.459736003124E+ 2.459736003124E+ 2.459736003124E+ 2.459736003124E+ 2.459736003124E+ 2.459736003124E+ 2.459736003124E+ 2.459736003124E+ 2.95246730348E+ 2.95246730348E+ 2.95246730348E+ 2.95246730348E+ 2.95246730348E+ 2.95245730348E+ 2.95245730348+ 2.95245730348+ 2.95245730348+ 2.95245730348+ 2.95245730348+ 2.95245730348+ 2.95245730348+ 2.9524573048+ 2.95245730348+ 2.952457348+ 2.95245730348+ 2.952457348+ 2.952457348+ 2.952457348+ 2.952457348+ 2.95245748+ 2.95245748+ 2.95245748+ 2.95245748+ 2.9524573548+ 2.95245748+ 2.95245748+ 2.95245748+ 2.95245748+ 2.95245748+ 2.95245748+ 2.95245748+ 2.95245748+ 2.95245748+ 2.95245748+ 2.95245748+ 2.95245748+ 2.9524	02 463414E+02 7 89012345670 .s. The f 0E+01 6.1 plitude" ies to thi: ex de 01 02 00 00 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01 01	0.008642810 8 8 90 Cirst two points, 55917282104492206 is the square ro s amplitude. Fraction of fundamental 0.00130410 1.000000000 0.013304587 0.013746923 0.15466923 0.15466923 0.013722499 0.007373274 0.00252601 0.013752489 0.00252612 0.00255612 0.00252612 0.0025612 0.	followed +01 pot of the
30 Derived {r C CORRIENT C C 34567890 C HPIHMI/ 1941.026.5 Begin the by the las Begin the by the las C cos of the las C cos o	-3.84254 om table: E FASE "A' 12345675 113457 13.1 1234577 13.1 1234577 13.1 1234577 13.1 1234577 13.1 1234577 13.1 124577 2.2 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.5 1.3 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4 2.4	225733E-02 1) RMS va * EN EL FIL 2 3 BUS1A F Fries compu C 5 123456790 BUS1A F Fries compu C 5 123450790 BUS1A F Fries compu C 5 123450790 BUS1A F Fries compu C 5 123450790 BUS1A F 15 123450790 BUS1A F 15 123450790 BUS1A F 15 123450790 BUS1A F 15 123450790 BUS1A F 15 12350790 BUS1A F 15 12350790 BUS1A F 15 12350790 BUS1A F 15 12350790 BUS1A F 15 12350790 BUS1A F 15 12350790 BUS1A F 15 12350790 BUS1A F 15 15 15 15 15 15 15 15 15 15	8.0545423108 lue = 1.908196 TRO DE 7A ARMO 4 12345679901234 BUS2 Fourier serie tation using 8569946289060E Fourier serie ts. "Fractio 0.000000000 8.7703814006 5.1356503604 7.7038144005 5.1356503604 7.7038144005 5.2952938301 9.0807713634 7.3718256130 5.2499836865 5.2477803803 -1.8660945892 1.30660519093 2.7312528413 6.212015430 8.4369552931 4.886613414 4.3512609228	22E-02 886E+01 NICA 5557890 332 332 332 332 332 332 332 332 332 33	6.92416975922E- 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex an undamental" appl Compl 2.340744637016- 1.7958637016- 1.7958637016- 1.7958637016- 2.46318576309E- 2.46318576309E- 2.46318576309E- 2.47616189066E- 1.32416890650E+ 1.3241689370E- 5.7120982190E- 5.725960831246E- 4.4235219355E- 4.52361164994E- 2.469730348E- 9.46222917869E- 9.46222917869E- 166	7 463414E+02 7 89012345670 cs. The f 0E+01 6.5 plitude" ies to this ex 02 02 02 00 00 01 01 00 00 01 01 00 01 01	6.008642810 8 8 990 Girst two points, 5591728210449220E is the square ro s amplitude, Fraction of fundamentai 0.0012040 1000004587 0.013716888 0.015465923 0.15715888 0.015465923 0.15715888 0.015465923 0.15715888 0.015465923 0.1372201 0.079052560 0.031063940 0.031072489 0.002535612 0.02253612 0.00252569 0.00252569 0.001522689 0.001526890 0.000526890	followed +01 Not of the
30 Derived {r C CORRIENT C 1 C 34567990 C 11911.02.5 Begin the by the 1as 7.14935226 Coefficien sum of the Cosine and Harmonic C 1 2 3 4 5 5 6 6 7 1 2 3 4 5 5 6 6 7 1 1 2 3 4 5 5 6 6 1 1 1 2 3 1 4 5 5 6 6 6 7 1 1 2 3 1 4 5 5 6 6 6 1 1 1 2 1 1 1 2 1 1 1 1 2 1 1 1 1	-3.84254 om table: E FASE "A 1234567890 WHMAX /+1++ Squares of the sine squares of the sine squares of the sine squares of the sine squares of the sine squares of 1.566694 -5.377102 -2.435097 -2.435097 -2.43509 -3.37102 -5.255204 -1.323091 -2.22818 -1.323091 -2.22818 -1.323091 -2.252523 -4.545411 -2.39033 -4.139666 -2.952299 -8.402391	225733E-02 1) RMS va * EN EL FIL 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2 2	8.0545423108 lue = 1.908196 11 = 1.908196 4 12345678901234 8022 77 77 70 70 70 70 70 70 70 70 70 70 70	12E-02 186E+01 15567890 132 132 132 132 132 132 132 132	6.92416975922E 2) THD = 2.41 6 12345678901234567 equidistant point 6.371308517456055 low. "Complex ar undamental" appl complex 1.3407465014E 1.3958307474E 2.38032165483E 2.7766457766 2.371208982190E 3.3476463757 3.00146189066E 1.41967573601E 3.2413898770E 5.25960831246E 1.42355219355E 4.5251164994E 2.459736001E 4.5251164995E 2.99246730348E 2.9924673048 2.99246748 2.99246730748 2.99246748 2.99246748 2.99246748 2.9	02 463414E+02 7 99012345670 18. The f 0E+01 6.1 plitude" ies to this de 01 02 00 00 01 01 01 01 01 01 02 FALL	0.008642810 8 8 90 11rst two points, 55917282104492206 13 the square ro 5 amplitude. Fraction of fundamental 0.001304507 0.01304507 0.013746923 0.15466923 0.15466923 0.01375260 0.013072489 0.007373274 0.0025260 0.013072489 0.007373274 0.00252612 0.013752368 0.0224631901 0.00252612 0.00526890 0.000526890 0.00556890 0.0056890 0.0056890 0.00556800 0.00556800 0.00556800 0.00556800	followed

Simulación	de un caso i	de distorsión	armónica

17	-1.72732183691E+00	-5.18835682009E-02	1.72810087463E+00	0.009622676
18	-2.01650250927E-01	-3.23865183881E-02	2.04234449279E-01	0.001137250
19	-7.32383729570E-01	5.64617968465E-01	9.24759091684E-01	0.005149385
20	-1.67214724653E-01	6.52534777685E-02	1.79495906643E-01	0.000999497
21	-1.33198712522E-01	4.74918549335E-02	1.41412069154E-01	0.000787432
22	-1.48417177598E-02	5.18214707923E-02	5.39049294697E-02	0.000300162
23	-8.95254728214E-01	-2.14769704315E-01	9.20655774044E-01	0.005126537
24	-1.08914313349E-01	-5.03814496064E-02	1.20002575459E-01	0.000668217
25	-3.89375746297E-01	4.55086761519E-01	5.98930239939E-01	0.003335055
26	-8.56517761573E-02	6.52908687012E-02	1.07699230706E-01	0.000599707
27	-7.88635905735E-02	4.13615379096E-02	8,90519103467E-02	0.000495872
28	8.45800754585E-03	4.25389156608E-02	4.33716178767E-02	0.000241508
29	~5.13591170578E-01	-1.80479595158E-01	5.44379256368E-01	0.003031296
30	-5.49094289502E-02	-4.93889244051E-02	7.38533089410E-02	0.000411241
Derived f	rom table: 1) RMS v	lue = 1.35416470E+02	2) THD = 3.70364113E+01	8

En la figura 5.9 se muestran las formas de onda del voltaje entre líneas y la corriente en la fase A del tablero 1. Aunque se observa que la corriente de la fase A tiene una mayor distorsión en este caso con respecto al caso donde los filtros se sintonizaron a 300 y 420 Hz, la forma de onda del voltaje no tuvo un aumento apreciable de distorsión.



El análisis del espectro de la corriente en el PCC, generado por el ATP, muestra que la distorsión armónica disminuyó del 21.67% (caso sin filtrado) hasta el 11.78% (caso con filtrado mediante el método propuesto). La relación de la componente de quinta armónica con la fundamental disminuyó del 18.48% a 9.66%, del mismo modo, la relación entre la componente de séptima armónica con la componente fundamental disminuyó del 10.95% hasta el 6.22%. El filtrado disminuyó efectivamente la distorsión en la corriente hasta alcanzar valores por debajo de los recomendados por el Std. IEEE 519-1992 y la norma CFE L000045. A continuación se muestra el análisis de espectro para la corriente y el voltaje entre líneas en el punto de acoplamiento común.

CCCC VOLTAJE VAB PRIMARIO DEL TRANSFORMADOR 678901234567890123456789012345678901234567890 č 34567890123456789012345678 č HPIHMINHMAX BUS1 BUS2 r ·////+++ 1841.026.543.1 VHA VHB

Begin the	Fourier	serie	s comp	utation	using	332	equ	idistant	points.	The	first	two	point	s, fo	11owed
by the las	t two,	are :													
-1.4519180	66406250	OE+04	-1.39	9722509	7656250	0E+04	-1.6	39848242	1875000E	+04 -	1.5925	7265	625000	00E+04	
Coefficien	ts of the	he res	sultant	Fourie	er ser:	ies fo	11ow.	"Compl	ex ampli	tude"	is t	he s	quare	root d	of the
sum of the	squares	oftl	he					•							
cosine and	the sin	e coe	fficier	nts.	"Fracti	on of	funda	mental"	applies	to th	is amp	litu	de.		
Harmonic		(Cosine			Sine	•		Complex		Frac	tion	of		
number		coeff	icient		coeft	icient		an	plitude		fund	amen	tal		
0	6.1123	627720	01E+01	0.00	000000	00E+00	6.	11236277	201E+01		0.00	1876	503		
1	-1.4904	14001	81E+04	2.89	6337815	366+04	3.	25731586	394E+04		1.00	0000	000		
2	-3.7300	59996	78E+01	1.53	8109086	29E+02	1.	58269170	822E+02		0.00	4858	883		
3	-1.2612	51694	186+01	8.67	7195817	64E+01	8.	76837973	024E+01		0.00	2691	903		
4	-6.5357	98313	40E+00	6.13	8966754	34E+01	6.	17366013	049E+01		0.00	1895	321		
5	-2.6991	860035	54E+01	4.99	4620501	47E+01	5.	67730913	685E+01		0.00	1742	941		
6	-3.9521	388494	44E+00	3.59	6472007	03E+01	3.	61812173	B17E+01		0.00	1110	768		
7	6.1312	78767	54E+00	5.44	471454	282+01	5.	47888631	1086+01		0.00	1682	025		
8	6.3515	058009	93E-01	2.89	7271036	406+01	2.	89796715	519E+01		0.00	0889	680		
9	6.7611	04746	93E-01	2.56	3634920	07E+01	2.	56452632	218E+01		0.00	0787	313		
10	7.8925	614322	22E-01	2.23	833206	346+01	2.	23322831	648E+01		0.00	0685	604		
11	4.8963	59057	35E+00	2.831	3297915	04E+01	2.	88022193	151E+01		0.00	0884	232		
12	1.3475	832912	23E+00	1.88	7723729	91E+01	1.	89252759	233E+01		0.00	0581	008		
13	3.7187	354339	995+00	2.34	614402	50E+01	2.	37490986	302E+01		0.00	0729	100		
14	1,8158	686576	68E+00	1.650	0124025	75E+01	1.	66008526	593E+01		0.00	0509	648		
15	1.7809	141674	47E+00	1.518	296135	57E+01	i.	52870523	9082+01		0.00	0469	314		
16	1.7877	436306	37E+00	1.35	393902	57E+01	1	36415891	326E+01		0.00	0418	798		
17	1.9139	027200	11E+00	1 99	3026690	275+01		00219520	1365+01		0.00	0614	676		
18	1.6028	193120	325+00	1.26	1428632	226+01	1	27454725	4765+01		0.00	0101	288		
19	4.8524	71597	735+00	1 46'	5608086	065+01	· · ·	54384969	0865+01		0.00	0473	964		
20	2.1871	443466	575+00	1 13	7266390	235+01	· · ·	15810657	8115+01		0.00	0355	540		
21	2.1410	577944	195+00	1 073	2500022	005+01	1	00366246	2555+01		0.00	0335	756		
22	2.1767	054676	528+00	9 58	118880	975+00	a i	83306908	3765+00		0.00	0301	976		
23	6.5632	620853	225-01	1 483	940289	875+01	í í	48430197	7965+01		0.00	0455	710		
241	1 571	177001	1155+00	9 9 9	1589297	9446+0	n i.	5658074	20255+00		0.00	0020	3671		
25	5.2717	407511	115+00	1 084	1756046	495+01	ĭί	20607138	5065+01		0 00	0370	265		
26	2 4477	508339	SEF.00	0 6 0 6	564706	016+00		07616007	6825400		0.00	0274	0.25		
27	2 2046	642610	065100	0.30.	949617	165100		52010337	0225+00		0.00	0263	211		
24	2 2070	610610	SPE+00	7 200	037766	102+00		57302933	7025+00		0.00	0203	211		
20	5 0075	623610	265-01	1 1 4 6	03/233	735+00	· · ·	14016064	0045+00		0.00	0234	104		
29	1 5 1 9 3 3	281080	345+00	7 76	2467007	125101	÷.	57861141	0042401		0.00	2220	124		
Dariund fr	1.3493 	. 11	DMC VA	1.30	201093	310510	, '·	32001141 71 700 -	6 00147	2405-01	0.00	1620	123		
Summary et.	atistics	- 17 DMC	and and	TUD -		5102.0	ding	1100 00	0.50147	3408-01	i B	hria	e		
only /the	Drecent	avola	nation	111 n	or the	ropost	ad	ITUG NOV		e expia	arnea		LIY CF	La One	

Summity acceleration of the present explanation will not be repeated). RMS and THD are explained bifely this one time Square for effective) value and the Total Harmonic Distortion, respectively. Each of these two statistics is produced by taking the square root of the sum of the squares of printed entries only. For THD, the column labeled "Fraction of fundamental" is used, but the first two rows are ignored, and the result is multiplied by 100 to convert per unit to percent. For RMS, every entry of the "Complex amplitude" column is used, and the result is divided by the square root of 2.

C CORRIENTI	FASE "A" ALI	MENTADOR LA	DO PRIMARIO I	EL TRANSFORM	DOR		
c ,	2	•			-		
C 345 (3000)	12246 6200 01224		C700011746 (7)	3 3 4 6 7 9 9 9	2245 (2000) 224	6 (3000	
C 10107890	12 34 30 78 90 12 34	DUC1 DUC2	0103012343010	901234307890	2343678901234	367890	
C +-+++///	(6031 6032	•				
1941 026	43.1	123A 14A					
Begin the	Fourier series	computatio	n using 332	equidistan	t points T	he first two points	followed
by the last	two are	, compaction	a doring out	equiatora	e poinca.	ne filise ewo points,	LOTTOWED
-7.5378055	72509770E+00	-7.6266727	4475097708+00	-8.74458980	56030270E+00	-8 2221279144287110	E+00
Coefficient	s of the res	ultant Four	ier series f	ollow. "Comr	lex amplitude	" is the square ro	ot of the
sum of the	squares of th	e				to the equate to	
cosine and	the sine coef	ficients.	"Fraction of	fundamental	applies to	this amplitude.	
Harmonic	c	osine	Sir	e	Complex	Fraction of	
number	coeffi	cient	coefficier	t é	mplitude	fundamental	
0	4.7065961977	OE-02 0.0	000000000E+0	0 4.7065961	9770E-02	0.003424744	
1	-9.7673192059	9.6 9.6	6784040355E+C	0 1.3742913	1751E+01	1.00000000	
2	-2.4090084670)2E-02 5.6	5480779775E-C	2 6.1465576	1911E-02	0.004472529	
3	-5.1004848840	222-03 2.5	3311183790E-C	2 2.5839514	3992E-02	0.001880206	
4	-1.6980555172	4E-03 6.9	8360198686E-C	2 6.9856660	8393E-02	0.005083104	
5	7.3461611469	2E-01 1.1	0646451058E+C	0 1.3281282	1261E+00	0.096640952	
6	-1.3299093673	1E-01 1.5	6977393756E-C	1 2.0573889	1323E-01	0.014970544	
7	8.2585153811	5E-01 2.2	3397099138E-C	1 8.5553318	2822E-01	0.062252680	
8	-1.1372264096	i1E-03 1.2	21727745876-0	2 1.2270091	7849E-02	0.000892830	
9	-2.9137288641	9E-03 2.1	4752990831E-C	2 2.1672062	3523E-02	0.001576963	
10	-1.8532369045	5E-02 2.7	6596084336E-C	2 3.3294183	2928E-02	0.002422644	
11	1.0913489367	3E-01 -1.5	8660315144E-C	1 1.9257081	9748E-01	0.014012373	
12	-1.2677033081	5E-02 8.5	0487696788E-0	3 1.5265650	9847E-02	0.001110802	
13	1.2263366825	OE-01 2.8	5234511012E-0	2 1.2590712	3910E-01	0.009161604	
14	2.3297319992	36-04 8.6	9/69546554E-0	J 8.7008150	72346-03	0.000633113	
					1	-	1

TIC JUR FALLA DE ORIGEN

Simulación	i de un caso d	le distorsió	in armónica

	15	-2.068	35479	273E-C	3 9.3	150901	17996-03	9.	5419597	2822E-	03	0.00069	4319	
	16	-1.312	82252	531E-C	2 1.2	643306	5219E-02	1.	8226450	5075E-	02	0.00132	6244	
	17	8.543	44343	120E-C	2 -4.5	461903	2490E-02	9.	6777203	9958E-	02	0.00704	1972	
	18	-4.948	156443	833E-C	3 7.0	564749	8556E-03	8.	6187080	9473E-	03	0.00062	7138	
	19	5.170	68757	329E-0	2 -1.3	461418	2915E-02	5.	3430429	3495E-	02	0.00388	7853	
	20	-9.080	33577	702E-0	4 4.0	634249	6972E-03	4.	1636459	3389E-	03	0.00030	2967	
	21	-8.009	14155	316E-C	4 4.7	143198	4395E-03	4.	7818694	1219E-	03	0.00034	7952	
	22	-9.526	152348	182E-C	3 6.1	563528	7685E-03	1.	1344313	1342E-	02	0.00082	5466	
	23	5.596	698494	B10E-C	2 -1.0	409250	1156E-02	5.	6929575	2566E-	02	0.00414	2468	
	24	-3.333	68395	660E-C	3 6.2	939954	1920E-03	7.	1223470	1903E-	03	0.00051	8256	
	25	3.365	13937	370E-C	2 -1.7	889654	8800E-02	з.	8111101	4294E-	02	0.00277	3146	
	26	-6.505	33301	978E-C	4 1.2	858371	9603E-03	1.	4410311	8345E-	03	0.00010	4856	
	27	4.201	50465	974E-C	4 2.8	473117	7561E-03	2.	8781436	3116E-	03	0.00020	9427	
	28	-7.057	38640	491E-C	3 3.7	750379	8952E-03	θ.	0036001	0811E-	03	0.00058	2380	
	29	3.558	50411	435E-C	2 -1.1	793677.	2779E-03	з.	5604579	2198E-	02	0.00259	0759	
	30	-2.774	63089	157E-C	3 4.6	560234	4350E-03	5.	4200674	2494E-	03	0.00039	4390	
Derived	l fro	m tabl	e: 1) RMS	value 🖷	9.785	02900E+00) .	2) THD	= 1.17	813611E+01	8		

En la figura 5.10 se muestra la forma de onda de la corriente en el punto de acoplamiento común donde se puede apreciar la disminución en la distorsión de la corriente con respecto al caso sin filtrado armónico.



La tabla 5.6 muestra un resumen de los resultados principales obtenidos en las simulaciones con los filtros sintonizados a 300 y 420 Hz, así como con frecuencias de sintonía de 276.504 y 376.386 Hz, así como los valores límites de distorsión recomendados por el Std. IEEE 519 - 1992 y CFE L000045.

El valor de la tensión eficaz en los reactores del filtro de 5^a armónica se mantuvo prácticamente sin cambio entre las simulaciones con el filtro sintonizado a 300 Hz y 276.504 Hz. Al mover la sintonía del filtro hacia abajo de la armónica que se desca filtrar, el resto de las componentes armónicas se ubican en la zona de operación de tipo inductivo del filtro y por lo tanto prácticamente no contribuyen a crear caída de tensión.

El caso del filtro de 7^a armónica es diferente debido a que la quinta armónica se ubica en la zona de operación capacitiva del filtro y la cantidad de 5^a armónica de corriente que puede circular en el filtro puede ser considerable ya que el filtro presenta una baja impedancia. Al sintonizar el filtro a 376.386 Hz la reactancia necesaria del reactor es de 0.05589 Ω , mientras que si el filtro se sintonizara a



420 Hz la reactancia sería de 0.04488Ω . La sintonía del filtro hacia abajo aumenta el valor de la reactancia del reactor y por lo tanto la componente de 5^a armónica de corriente en el filtro de séptima disminuye considerablemente, y la consecuencia es que se tiene una menor caída de tensión a través del reactor.

Valores en el punto de acoplamiento común							
Parámetro eléctrico IEEE		Std. 519 - 1992	Valor sin filt	rado Valor c	on filtrado		
	CF	E L000045		1. State 1.			
THD _V		5.0% 1.28%		0.69%			
THD		15.0%	21.67%	11.78%			
$(I_s/I_1) \times 100$		12.0%	18.48%	9	9.66%		
$(I_7/I_1) \times 100$		12.0% 10.95%		6	.22%		
	Valo	res en el tablero 1	(lado de baja ten	sión)			
Parámetro eléctrico	2	Valor sir	n filtrado	Valor con f	iltrado		
Voltaje entre línea	s	458.2	2 V	468.97	v		
THD _v		4.2	1%	1.97%			
Vs		14.3	677 V	5.3514 V			
V ₇		10.7838 V		5.6186 V			
Corriente de línea		437.31 A		304.45 A			
THD		28.9	6%	18.99%			
l ₅		106.3	738 A	48.845	9 A		
I ₇		56.9	18 A	52.571	6 A		
		Valores en el filtr	o de 5ª armónica				
Parámetro eléctrico	b	Filtro sintoniz	ado con n = 5	Filtro sintonizado con n = 4.6084			
Irms		346.694 A		338.617 A			
l _s		134.126 A		104.973 A			
V _{rms} en capacitores	s	282.871 V		284.475 V			
V _{rms} en reactores		26.53		26.35 V			
Valores en el filtro de 7ª armónica							
Parámetro eléctrico	2	Filtro sintonizado con $n = 7$		Filtro sintonizado con n = 6.2731			
l _{ms}		154.968 A		135.416 A			
I ₇		89.407 A		40.390 A			
V _{ms} en capacitore	s	277.686 V		278.058 V			
V _{rms} en reactores		29.0	7 V	19.08 V			

Tabla 5.6 Resultados obtenidos en las simulaciones

5.4.5 Quinto caso. Simulación al agregar otros dispositivos no lineales en el sistema eléctrico

En esta parte se procedió a agregar un rectificador de 56 KVA en el tablero 3, tal y como se muestra en la figura 5.1. Esto se hizo con el objetivo de observar el comportamiento de los filtros cuando se agregan dispositivos no lincales en otras partes del sistema.



Un filtro constituye una trayectoria de baja impedancia para las componentes armónicas que se desean filtrar, por ese motivo existe la posibilidad de que un filtro pueda absorber armónicas del mismo orden de otras partes del sistema eléctrico, corriendo el riesgo de sobrecargarse y dañarse.

Esto requirió agregar un rectificador adicional. Los cambios al código para llevar a cabo esta simulación se muestran a continuación.

```
c
  QUINTO RECTIFICADOR - R5 (CONECTADO EN EL TABLERO 3 O BUS 3)
c
                             -----
C
 RESISTENCIAS EN SERIE PARA GRAFICAR LA CORRIENTE DE LINEA DEL RECTIFICADOR
C
С
c
                            з
                                                         ء
                                                                             •
  ċ
С
 NOMBR, NODO REFERENCIAS RES
                               IND
                                     CAP
C
 NOD-1 NOD-F
               BRANCH
                         I OHM I
                                (MH)
                                     (UF)
С
                               (OHM) (OHM)
        -----
C
  BUSJA VAR5 BUSIA VAR1
                                                                            1
  BUSJB VBR5 BUSJA VAR5
  BUS3C VCR5 BUS3A VAR5
C
č
 SNUBBERS DEL RECTIFICADOR
с
                                                                  с
                                                                             ۰
с
 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
c
 NOMBR. NODO REFERENCIAS
                         RES
                               IND
                                     CAP
 NOD-1 NOD-F
                                     (UF)
c
             BRANCH
                         LOHM1
                                [MH]
                               (OHM) (OHM)
 ++++++----+++++++///////
r
C diodos D1, D2 Y D3
POSPR5VAR5 POSPR1VAR1
  POSPR5VBR5 POSPR5VAR5
  POSPR5VCR5 POSPR5VAR5
C diodos D4, D5 Y D6
 VAR5 NEGR5 POSPR5VAR5
VBR5 NEGR5 POSPR5VAR5
  VCR5 NEGR5 POSPR5VAR5
с
C LADO DE DIRECTA DEL RECTIFICADOR
С
                                                                  -7
C
ċ
 c
 NOMBR. NODO REFERENCIAS RES
                               IND
                                     CAP
c
 NOD-I NOD-F
               BRANCH
                         [OHM]
                                [MH]
                                     IUF
c
                               [OHM] [OHM]
         ----++++++//////+
c
  POSPR5POSR5 POSPR1POSR1
  POSR5 NEGR5
                                     400.0
  POSR5 NEGR5
                           10.0
с
C
 TABLERO BUS3 ~ CARGA AGREGADA RECTIFICADOR R5
С
с
ē
Ċ
                                                         6
                                                                  7
                                                                            A
                  -
C 345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
 NOMBR. NODO REFERENCIAS RES
                               IND
                                     CAP
С
C NOD-I NOD-F
              BRANCH
                         [OHM]
                                [MH]
                                     IUFI
С
                               [OHM] [OHM]
ċ
 ++++++----++++++///////
 BUSPA BUS3A
                           0.01
                                                                             1
 BUSPB BUS3B BUSPA BUS3A
 BUSPC BUS3C BUSPA BUS3A
 BUSTA BUSTA
                         1.0E12
                                                                             2
C DIODOS DEL QUINTO RECTIFICADOR - R5
                                                 171
```

č						1 T A L A
c 1 2	з	4	5	6	7 .	B .
C 3456789012345678901234	56789012345	678901234	5678901234	567890123	456789012	34567890
C NOMBR. NODO			SIN	SAN	IE	PO
C NOD-I NOD-F Vig	Ihold	LDEION	DEFINIR	CLOSED	GRID	DO
C ++++++**********	//////////	*******		+++++	//	////^^+-
11VAR5 POSPR5					an an an an Araba	13
11VBR5 POSPR5						13
11VCR5 POSPR5						13.
11NEGR5 VAR5						13
11NEGR5 VBR5						13
11NEGR5 VCR5						13
c						
BLANK CARD ENDING SWITCH	s					
C CONDICIONES INICIALES I	DEL QUINTO	RECTIFICA	DOR - KS			
	,	4		6	7	e
C 1456789012345678901234	6780012245	678001224	678001274	567000127	456789012	34567990
C NOMBRE BelE(0) 1	Tm(E(0))	FRECUE	JO78501234	301090123		1307050
		110000	ioru (uni			
C ++++++**						Sec. 19 . 19
2POSR5 324.1					i i shi e tati	
2NEGR5 -324.1						
c						
c 1 2	3	4	5	6	7	8
C 3456789012345678901234	6789012345	678901234	5678901234	567890123	456789012	34567890
C 1ER. 2DO. 1(0)		e (0)	전문 김 씨는 문자	1. 1997 1. 1997 1. 1997	States in the second	
C NODO NODO k.m		CAP			아이네 아이가	
C ++++++++++++++++++++++++++++++++++++	•••••///////	11111111			아이들은 가슴을	
3FOSR5 NEGR5		648.3			1 2 2 4 4 4	
с		1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1				e de generation pre

Los análisis de espectro obtenidos por el ATP para los voltajes al neutro en los bancos de capacitores y para las corrientes a través de los filtros de 5^a y 7^a armónica se muestran a continuación.

```
с
 VOLTAJE VAN EN EL BANCO DE CAPACITORES DEL FILTRO DE 5A ARMONICA
С
с
                            3
                                                                     7
                                                                               8
r
 HPIHMINHMAX
                        BUS1 BUS2
c
  +-***////++++
c
                        -----
 1841.026.543.1
                       F5A
                                                  equidistant points. The first two points,
Begin the Fourier series computation using 332
                                                                                              followed
by the last two,
                 are :
-1.6270046997070310E+02 -1.5666618347167970E+02 -1.8488613891601560E+02 -1.7811734008789060E+02
Coefficients of the resultant Fourier series follow. "Complex amplitude"
                                                                             is the square root of the
sum of the squares of the
                                    "Fraction of fundamental" applies to this amplitude.
cosine and the sine coefficients.
Harmonic
                                             Sine
                                                             Complex
                                                                              Fraction of
                      Cosine
                 coefficient
                                      coefficient
                                                            amplitude
  number
                                                                              fundamental
                               0.0000000000E+00
           6.65840504624E-01
                                                    6.65840504624E-01
                                                                              0.001663037
       0
                                3.48112691420E+02
                                                                              1.000000000
       1
          -1.97784656981E+02
                                                    4.00376343538E+02
                                1.84938162100E+00
                                                                              0.005046153
          -8.13414939880E-01
                                                    2.02036042441E+00
          -6.19887348594E-01
                                1.05461180594E+00
                                                    1.22330142900E+00
                                                                              0.003055379
        з
           -1.70141548841E+00
                                3.51729362442E-02
                                                    1.70177901022E+00
                                                                              0.004250448
       5
           3.18193121018E+01
                                4.22810602556E+00
                                                    3.20989953612E+01
                                                                              0.080172058
           9,55033718134E-01
                                1.75904082498E+00
                                                    2.00157788425E+00
                                                                              0.004999241
       6
       7
          +6.72852235615E-02
                               -3.31068121191E+00
                                                    3.31136488298E+00
                                                                              0.008270631
                                3.84576804041E-01
                                                    3.94265347658E-01
       я
                                                                              0.000984737
           8.68668300198E-02
       9
           9,76009766829E-02
                                3 40980084704E-01
                                                    3.546736088498-01
                                                                              0.000885851
       10
           7.90418027539E-02
                                3.42828571530E-01
                                                    3.51822449596E-01
                                                                              0.000878729
       11
           2.96126765224E-02
                               -8.31445142147E-02
                                                    8.82605282944E-02
                                                                              0.000220444
           5.87260133709E-02
                               2.55768481713E-01
                                                    2.62423819202E-01
                                                                              0.000655443
       12
                                1.32663087750E-02
                                                    4.71478187088E-02
      13
           4.52429205566E-02
                                                                              0.000117759
           4.57190312490E-02
                                1.99137283099E-01
                                                    2.04318103306E-01
                                                                              0.000510315
       14
                                1.92073279536E-01
                                                    1.97013527679E-01
                                                                              0.000492071
      15
           4.38427345949E-02
                                1.91994810561E-01
                                                    1.958429486358-01
                                                                              0.000489147
      16
           3.86322824577E-02
                                                    1.05837400313E-01
                                                                              0.000264345
      17
           8.29805291119E-02
                                6.56946504161E-02
           4.30125852234E-02
                                1.59356520330E-01
                                                    1.65059331936E-01
                                                                              0.000412260
       18
                                                                              0.000251604
       19
           1.94596526441E-02
                                9.883880543986-02
                                                    1.00736227554E-01
      20
           3.48738649942E-02
                                1.38835021656E-01
                                                    1.43147999280E-01
                                                                              0.000357534
```

Simulación de un caso de distorsión armónica

3.39612944114E-02 21 1.34413647210E-01 1.38637650278E-01 0.000346268 3.07495984513E-02 1.37136828170E-01 0.000342520 22 1.33644946913E-01 23 6.69424402968E-02 8.69300976246E-02 1.09718422272E-01 0.000274038 3.73281721138E-02 24 1.17649984791E-01 1.23429783094E-01 0.000308284 2.00932056738E-02 25 8.84353071501E-02 9.06892522021E-02 0.000226510 3.09309773671E-02 26 1.05676164981E-01 1.10109841549E-01 0.000275016 3.08511012007E-02 27 1.02731924613E-01 1.07264340673E-01 0.000267909 28 2.85693933296E-02 1.02077068500E-01 1.05999708249E-01 0.000264750 29 5.19271549316E-02 8.37639937070E-02 0.000246153 9.85537217006E-02 30 3.39437132853E-02 9.36811799932E-02 9.96410515626E-02 0.000248868 Derived from table: 1) RMS value = 2,84039341E+02 2) THD = 8.11098642E+00 C CORRIENTE FASE "A" EN EL FILTRO DE 5A ARMONICA с C 2 5 c 3456789012345 HPIHMINHMAX BUS1 BUS2 C c +-***////++++ 1941.026.543.1 BUSIA F5A Begin the Fourier series computation using 332 equidistant points. The first two points, followed by the last two, are : 3.6821627807617190E+02 3.5802316284179690E+02 4.1483987426757810E+02 3.9979882812500000E+02 Coefficients of the resultant Fourier series follow. "Complex amplitude" is the square root of the sum of the squares of the cosine and the sine coefficients. "Fraction of fundamental" applies to this amplitude. Complex Harmonic Cosine Fraction of Sine number coefficient coefficient amplitude fundamental 0.0000000000E+00 1.63770523236E+00 -1.63770523236E+00 1 0.003614037 3.93183261110E+02 2.25284035946E+02 4.53151159845E+02 1 000000000 9.374135435976-01 1.91492574701E+00 2.13206115491E+00 0.004704967 3.28675754362E-01 2.21144676635E+00 2.23573803293E+00 3 0.004933758 -3.11511129526E+00 7.87834205662E+00 8.47184702075E+00 0.018695411 Δ 5 2.08183912666E+01 -1.81166755608E+02 1.82358983197E+02 0.402424178 8.75718579753E+00 -6.34667310470E+00 1.08152005340E+01 0.023866651 6 -7 -2.97065813628E+01 7.54451809094E-01 2.97161601455E+01 0.065576705 Ĥ 2.35091843638E-01 -5.44514184544E-01 5.93096848849E-01 0.001308828 2.27969073841E-01 q -7.23172589084E-01 7.58253580427E-01 0.001673291 10 6.40575748954E-01 -5.91996572795E-01 8.72236912971E-01 0.001924826 4.32075366776E+00 -3.01295501059E-02 4.32085871642E+00 0.009535138 11 12 2.35056203640E-01 -4.32485934179E-01 4.92235210172E-01 0.001086249 3.08968353045E+00 -3.07801577795E+00 -2.68259555358E-01 0.006818218 13 -0.16815897922E-02 -2.96757243631E-01 1.07793345865E-01 14 0.000679229 2.79437293202E-02 -2.85954540669E-01 2.87316639507E-01 0.000634041 15 0.000720018 16 2.500130008566+01 -2 09643131966E-01 3.26277096006E-01 17 -1.99245903160E+00 -1.08905563307E+00 2.27066844002E+00 0.005010841 2.32260449749E-02 18 -3.26995857454E-01 3.27819675977E-01 0.000723422 19 -1.11338650662E+00 1.69651400277E-01 1.12623759071E+00 0.002485346 20 -7.48508444500E-02 -1.76543011894E-01 1.91755271019E-01 0.000423160 0.000362936 21 -1.78288578639E-02 -1.63495516054E-01 1.64464743767E-01 1.22256119484E-01 -8.98507539299E-02 1.51722499100E-01 0.000334817 -9.61762736748E-01 23 -1.05732620373E+00 1.42930971552E+00 0.003154157 -2.81283555824E-01 24 -3.31808830093E-03 2.81303125626E-01 0.000620771 25 -7.09517411486E-01 2.06635936534E-01 7.38994835888E-01 0.001630791 -8.16218380854E-02 -1.12318924910E-01 26 1.38844032444E-01 0.000306397 27 -4.59461517733E-02 -1.14288105253E-01 1.23178000735E~01 0.000271825 5.79284508302E-02 -4.42156727276E-02 28 7.28747633296E-02 0.000160818 -4.37368048009E-01 9.44613211457E-01 0.002084543 29 -8.37259404151E-01 30 1.40980037693E-02 -2.36253038035E-01 2.36673301602E-01 0.000522283 Derived from table: 1) RMS value = 3.46213934E+02 2) THD = 4.09156891E+01 c VOLTAJE VAN EN EL BANCO DE CAPACITORES DEL FILTRO DE 7A ARMONICA ċ С C HPTHMINHMAY BUS1 BUS2 +-+++////++++ -----1841.026.543.1 F7A followed Begin the Fourier series computation using 332 equidistant points. The first two points. by the last two, are : -2.1857666015625000E+02 -2.1621551513671880E+02 -2.1760209655761720E+02 -2.1556938171386720E+02 Coefficients of the resultant Fourier series follow. "Complex amplitude" is the square root of is the square root of the sum of the squares of the cosine and the sine coefficients. "Fraction of fundamental" applies to this amplitude Complex Barmonic Cosine Sine Fraction of coefficient number coefficient amplitude fundamental 7.23854584B66E-01 0.0000000000E+00 7.23854584866E-01 n 0.001848892 -1.92519780893E+02 3.40901816705E+02 3.91507234503E+02 1.000000000 1 <u>99</u> A 1. 1 173 1. 1

			Simulacio	n ue un cuso ae aistorsion armonic
2	-5.92286113268E-01	2.069616561198+00	2.15269959593E	+00 0.005498493
3	-2.92069014821E-01	1.48639559837E+00	1.51481886186E	+00 0.003869198
4	-4.94026891878E-01	1.27999023967E+00	1.37201952740E	+00 0.003504455
5	-1.55422197427£+01	-4.08601710915E+00	1.60703494158E	+01 0.041047388
6	-3.71036840132E+00	-4.61844914645E+00	5.924264189918	+00 0.015131941
	-3.524332475058+00	-2.131/82669656+01	2.160718987888	+01 0.055189759
8	-2 094095621475-02	-9.562503408136-01	5 646050163085	-01 0.002480175
10	-1.759380071356-02	-3.003079793925-01	3.008229118775	-01 0.000768371
iī	-1.11909839300E-01	-1,10327905371E+00	1,108940251998	+00 0.002832490
12	-1.88136228966E-02	-2.27237997327E-01	2.280154815708	-01 0.000582404
13	-3.81789228725E-02	-6.55101067444E-01	6.56212647484E	-01 0.001676119
14	-2.45984104379E-02	-1.98389159708E-01	1.999083302068	-01 0.000510612
15	-2.12952812871E-02	-1.60689134836E-01	1.62094068551E	-01 0.000414026
16	-2.61793628721E-02	-1.18148589986E-01	1.21014248566E	-01 0.000309098
17	6.51079917928E-02	= 3, 33349772367E-01	3.39648526175E	-01 0.000867541
18	-9.79272309841E-03	-1.16503/51603E-01	1.169145908916	-01 0.000298627
20	-2 047611555278-02	-1 066119954008-01	1 085605309095	-01 0.000277289
21	-2.01862716305E-02	-9 456077301226-02	9.669139235228	-02 0.000246972
22	-2.46005474024E-02	-7.76762430611E-02	8.14787436611E	-02 0.000208116
23	4.61015497884E-02	-1.51029345023E-01	1.57908884965E	-01 0.000403336
24	-9.23633428923E-03	-7.70319568204E-02	7.75837111943E	-02 0.000198167
25	-4.11165418010E-02	-1.19125777404E-01	1.26021906238E	-01 0.000321889
26	-1.93516288083E-02	-7.39048276446E-02	7.63963944615E	-02 0.000195134
27	-1.86241545657E-02	-b.81416635091E-02	/.06409614818E	-02 0.000180433
28	-2.21575670181E-02	-5.89173948668E-02	6.29461451882E	-02 0.000160779
29	2.200/1/91266E-02	-0.390//1369346-02	5 71861487510P	-02 0.000222200
ived fr	-1.0000/0/0509E-02	-3.017033300900-02	2) THD = 7 0	98997395+00 %
CORRIENT	E FASE "A" EN EL FII	LTRO DE 7A ARMONICA		
,	a		e	7 0
14567890	12345678901234567890	0 012345678901234567890	1234567890123456	78901234567890
HPTHMI	NHMAX BUS1	BUS2	1254507050125450	10901234301030
+-***///	/++++			
1941.026.	543.1 BUS1A	F7A		
egin the	Fourier series comp	utation using 332	equidistant poir	ts. The first two points, follow
y the las	t two, are :			
.07265129	08935550E+01 6.31	65676116943360E+01	4.83573608398437	50E+01 4.9692832946///340E+01
Sefficien	ts of the resultant	Fourier series toll	ow. "Complex a	mplicude. Is the square toot of t
un or the	the sine coefficier	ts "Fraction of f	undamental" ann	lies to this amplitude.
armonic	Cosine	Sine	Comp	lex Fraction of
number	coefficient	coefficient	amplit	ude fundamental
0	3.69696904871E-01	0.0000000000000000000000000000000000000	3.69696904871E	-01 0.002061368
1	1.56345040552E+02	8.78692292444E+01	1.793454018186	+02 1.00000000
2	2.62892851260E+00	5.26755750568E-01	2.60118196792E	+00 0.014949823
3	2.77528813958E+00	3.79047645088E-01	2.001053618726	+00 0.015618207
4	3.07746264636E+00	8.74402690975E-01	3.19927435612E	+00 0.017838619
5	-8.59266559357E+00	3.546188515346+01	3.6488069291/E	+01 0.203451379
6	-1.192246647876+01	1.013025622936+01	1.564504069036	
	-6.747246011346+01	1.122/95683186+01	0.040029150116	+01 0.381388599
1 1	-1 584378094470026+00	2 311316083505-01	1.584546674745	+00 0.008835168
10	-1.3043/00944/6+00	1 036683731525-02	6 355107656775	-01 0.003543552
11	-4.82007638618E+00	4.866765758688-01	4.84458362071	+00 0.027012589
12	-5.10631488669E-01	1.91737196150E-02	5.109913392076	-01 0.002849202
13	-3.16751619532E+00	1.36270198764E-01	3.17044609080E	+00 0.017677878
14	-5.35810324503E-01	5.95850360544E-02	5.39113235198E	-01 0.003006005
15	-3.68231592169E-01	4.11282253133E-02	3.70521J03556E	-01 0.002065965
16	-1.30104209793E-01	7,985508266462-02	1.52656279377E	-01 0.000851186
17	-1,86976831386E+00	-6.29581750268E-01	1.97291832771E	+00 0.011000663
18		-4 59303712716E-02	2.317531259498	-01 0.001292217
	-2.27156140973E-01	4.33303711.7104 01.		
19	-2.27156140973E-01 -1.08410723571E+00	3.33353724833E-01	1.13420157132E	+00 0.006324118
19 20	-2.27156140973E-01 -1.08410723571E+00 -2.45640099994E-01	3.33353724833E-01 4.75607618796E-02	1.13420157132E 2.50202087912E	+00 0.006324118 -01 0.001395085
19 20 21	-2.27156140973E-01 -1.08410723571E+00 -2.45640099994E-01 -1.79114911004E-01	3.33353724833E-01 4.75607618796E-02 4.71775166676E-02	1.13420157132E 2.50202087912E 1.85223836000E	+00 0.006324118 -01 0.001395085 -01 0.001032777
19 20 21 22	-2.27156140973E-01 -1.08410723571E+00 -2.45640099994E-01 -1.79114911004E-01 -5.20692182275E-02	3.33353724833E-01 4.75607618796E-02 4.71775166676E-02 9.44684457720E-02	1.13420157132E 2.50202087912E 1.85223836000E 1.07867931905E	+00 0.006324118 -01 0.001395085 -01 0.001032777 -01 0.000601454
19 20 21 22 23	-2.27156140973E-01 -1.08410723571E+00 -2.45640099994E-01 -1.79114911004E-01 -5.20692182275E-02 -8.71655399522E-01	3.33353724833E-01 4.75607618796E-02 4.71775166676E-02 9.44684457720E-02 -6.55282758341E-01	1.13420157132E 2.50202087912E 1.85223836000E 1.07867931905E 1.09049467165E	+00 0.006324118 -01 0.001395085 -01 0.001032777 -01 0.000601454 +00 0.000601416
19 20 21 22 23 24	-2.27156140973E-01 -1.08410723571E+00 -2.45640099994E-01 -1.79114911004E-01 -5.20692182275E-02 -8.71655399522E-01 -1.19280095545E-01	3.33353724832E-01 4.75607618796E-02 4.71775166676E-02 9.44684457720E-02 -6.55282758341E-01 -6.79167570780E-02	1.13420157132E 2.50202087912E 1.85223836000E 1.07867931905E 1.09049467165E 1.37260435251E	00 0.006324118 -01 0.001395085 -01 0.001392777 -01 0.000601454 +00 0.00060416 -01 0.000765341
19 20 21 22 23 24 25	-2.27156140973E-01 -1.08410723571E+00 -2.45640099994E-01 -1.79114911004E-01 -5.20692182275E-02 -8.71655399522E-01 -1.19280095545E-01 -6.45887733696E-01	3.33353724832E-01 4.75607618796E-02 4.71775166676E-02 9.44684457720E-02 -6.55282758341E-01 -6.79167570780E-02 2.99884381468E-01	1.13420157132E 2.50202087912E 1.85223836000E 1.07867931905E 1.09049467165E 1.37260435251E 7.12110675765E	+00 0.006324118 -01 0.001395085 -01 0.001032777 -01 0.000601454 +00 0.006080416 -01 0.000765341 -01 0.003770610
19 20 21 22 23 24 25 26	-2.27156140973E-01 -1.08410723571E+00 -2.4564009994E-01 -1.79114911004E-01 -5.20692182275E-02 -8.71655399522E-01 -1.19280095545E-01 -6.45887739696E-01 -1.55813888456E-01 -1.55813888456E-01	3.33353724833E-01 4.75607618796E-02 4.71775166676E-02 9.44684457720E-02 -6.5528275831E-01 -6.79167570780E-02 2.9984381466E-01 4.87381040365E-02	1.13420157132E 2.50202087912E 1.85223836000E 1.07867931905E 1.09049467165E 1.37260435251E 7.12110675765E 1.63258600450E	$\begin{array}{cccc} \bullet 0 & 0 & 0.006324118 \\ \bullet 0 & 0 & 0.001395085 \\ \bullet 0 & 0 & 0.00132777 \\ \bullet 0 & 0 & 0.00601454 \\ \bullet 0 & 0 & 0.006080416 \\ \bullet 0 & 0 & 0.006080416 \\ \bullet 0 & 0 & 0.003970613 \\ \bullet 0 & 0 & 0.03970613 \\ \bullet 0 & 0 & 0.003970613 \\ \bullet 0 & 0 & 0 & 0.003970613 \\ \bullet 0 & 0 & 0 & 0.003970613 \\ \bullet 0 & 0 & 0 & 0$
19 20 21 22 23 24 25 26 27	-2.27156140973E-01 -1.08410723571E+00 -2.45640099994E-01 -1.791149110045-01 -5.20692182275E-02 -8.71655399522E-01 -1.1928095545E-01 -6.4588773960E-01 -1.55813888456E-01 -1.5913888456E-01 -1.9132013672E-01	3.3353724833E-01 4.75607618796E-02 4.71775166676E-02 9.44684557720E-02 -6.55282758341E-01 -6.79167570780E-01 2.9988438168E-01 4.87381040365E-02 4.15247601425E-02	1.13420157132E 2.50202087912E 1.85223836000E 1.07867931905E 1.09049467165E 1.37260435251E 7.12110675765E 1.63258600450E 1.226161572543E	$\begin{array}{cccc} \bullet 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bullet 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bullet 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bullet 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0$
19 20 21 22 23 24 25 26 27 28	$\begin{array}{c} -2,27156140973E{-}01\\ -1,09410723571E{+}00\\ -2,45640099994E{-}01\\ -1,79114911004E{-}01\\ -5,20692182275E{-}02\\ -8,71655399522E{-}01\\ -1,19280095545E{-}01\\ -1,55813888456E{-}01\\ -1,55813888456E{-}01\\ -1,19132013672E{-}01\\ -3,71161392238E{-}02\end{array}$	3.33353724833E-01 4.71751666765-02 9.4468457720E-02 9.44684557720E-02 9.5282758341E-01 -6.55282758341E-01 -6.573167570780E-02 2.9908381466E-01 4.87381040365E-02 8.93815008517E-02 8.93815008517E-02	1.13420157132E 2.50202087912E 1.85223836000E 1.07867931905E 1.97260435251E 7.12110675765E 1.63258600450E 1.26161572543E 9.48417955427E 5.5020702507	$\begin{array}{cccc} \bullet 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bullet 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bullet 0 & 0 $
19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29	$\begin{array}{c} -2,27156140973E{-}01\\ -1,09410723571E{+}00\\ -2,45640099994E{-}01\\ -1,79114911004E{-}01\\ -5,20692182275E{-}02\\ -8,71655399522E{-}01\\ -1,19280095545E{-}01\\ -1,5913086456E{-}01\\ -1,5913013672E{-}02\\ -3,17161292238E{-}01\\ -3,17161292238E{-}01\\ -1,01223238E{-}01\\ -1,012373664E{-}02\\ -1,01237664E{-}02\\ -1,01264E{-}02\\ -1,$	3.33353724833E-01 4.75607618796E-02 4.75167618796E-02 4.75166676E-02 6.552827583141E-01 6.79167570780E-02 2.9988438146E-01 4.87381040365E-02 4.87381040365E-02 4.913247601425E-02 5.15364574787E-01 -5.5364574787E-01	1.13420157132 2.502020879122 1.85223836000E 1.07867931905E 1.0904967165E 1.37260435251E 7.12110675765E 1.63258600450E 1.26161572543E 9.48417955427E 6.53530792858E 8.20856282413	+00 0.006324118 -01 0.001395085 -01 0.001032777 -01 0.006001454 +00 0.006060416 -01 0.00765341 -01 0.00370610 -01 0.000703456 -01 0.000703456 -02 0.000328822 -01 0.00343979 -02 0.000467214
19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30	-2.27156140973E-01 -1.00410723571E+00 -2.45640099994E-01 -1.79114911004E-01 -5.20692182275E-02 -8.71655399522E-01 -1.19280095545E-01 -1.55813888456E-01 -1.55813888456E-01 -3.17161392238E-02 -4.01102295643E-01 -5.12153734962E-02 -5.12153734962E-02 -5.12153734962E-02 -5.12153734962E-02 -5.12153734962E-02	3.33153724833E-01 4.75607618796E-02 9.44684457720E-02 9.44684457720E-02 -6.5528275834E-01 -6.79167570780E-02 2.99984381468E-01 4.87381040365E-02 8.93815008517E-02 8.93815008517E-02 5.15964574787E-01 -6.52962481226E-02 4.874018FE-01 -6.88764787E-01	1.13420157132E 2.50202087912E 1.85223836000E 1.07867331905E 1.930467155 1.930467155 1.37260435251E 1.37260435251E 1.63258600450E 1.26161572541E 9.48417955427E 6.53530792858E 8.29956282813E 2) THD = 4.4	+00 0.006324118 -01 0.001395085 -01 0.001032777 -01 0.006080416 +00 0.006080416 -01 0.000765341 -01 0.000765341 -01 0.003970610 -01 0.003910303 -01 0.000528822 -01 0.000528822 -01 0.000463979 -02 0.000462714 7127845401 X
19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 rived fr	-2.27156140973E-01 -1.00410723571E+00 -2.45640099994E-01 -1.79114911004E-01 -5.20692182275E-02 -8.71655399522E-01 -6.45887739505E-01 -1.55813888456E-01 -1.55813888456E-01 -1.39132013672E-01 -3.77161392238E-02 -4.01102299643E-01 -5.2215734962E-02 om table: 1) RMS v	3.331537248318-01 4.756076187968-02 4.756076187968-02 9.44684577208-02 -6.5528275831418-01 -6.791675707808-02 2.9998843814688-01 4.873810403658-02 4.152476014258-02 9.938150085178-02 -5.159645747878-01 -6.529624812266-02 nlue = 1.387401898+02	1.134201571328 2.502020879128 1.852218160008 1.078679319058 1.090494671558 1.372604352518 1.21106757558 1.632586004508 1.261615725418 9.484179554278 6.535307928588 8.29856228218 2.21 TRD = 4.4	00 0.006324118 01 0.001395085 01 0.001032777 01 0.006001454 00 0.006080416 01 0.000765341 01 0.00370610 01 0.00370610 01 0.000703456 02 0.000528822 01 0.00343979 02 0.000462714
19 20 21 22 23 24 25 25 26 27 28 29 30 ;ived fr	-2.27156140973E-01 -1.00410723571E+00 -2.45640099994E-01 -5.20692182275E-02 -8.71655395322E-01 -1.19280095545E-01 -1.55813888456E-01 -1.558130213672E-01 -3.71161392238E-02 -4.01102295643E-01 -5.12153734962E-02 om table: 1) RMS v.	3.3353724833E-01 4.75607618796E-02 4.75607618796E-02 9.4468457720E-02 -6.55282758041E-01 -6.73167570780E-02 2.9968381466E-01 4.8738104655-02 8.93815006517E-02 -5.15966574787E-01 -6.52962481226E-02 alue = 1.38740189E+02	1.134201571322 2.50220079128 1.852238360005 1.078679139055 1.0796491352518 7.121106757655 1.632566004505 1.261615725438 9.464179554279 6.533507285588 6.298562828138 2) THD = 4.4	+00 0.006324118 -01 0.001395085 -01 0.001032777 -01 0.000601454 +00 0.006060416 -01 0.000765341 -01 0.000765341 -01 0.000703456 -01 0.000703456 -02 0.000328822 -01 0.000462714 7112784E+01 10070700000000000000000000000000000000
19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 ;ived fr	-2.27156140973E-01 -1.00410723571E+00 -2.45640099994E-01 -1.79114911004E-01 -5.20692102275E-02 -0.45087739506E-01 -1.191280095545E-01 -1.191380136728-01 -3.17161392238E-02 -4.01102295641E-01 -5.12153734962E-02 om table: 1) RM5 v.	3.3353724833E-01 4.75607618796E-02 4.75607618796E-02 4.75607518796E-02 4.468457720E-02 -6.55282758341E-01 -6.79167570780E-02 2.99884381468E-01 4.87381040365E-02 4.15247601425E-02 -5.15964574787E-01 -6.52962481225E-02 -1.38740189E+02 alue = 1.38740189E+02	1.134201571322 2.50220079122 1.052230319055 1.070673319055 1.070673319055 1.372604325312 7.121106737555 1.632356004500 1.2616157254327 6.533507928564 8.298562280132 2.2000 - 4.4	$\begin{array}{ccccc} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & $
19 20 21 22 23 24 25 26 27 27 28 29 30 rived fr	-2.27156140973E-01 -1.00410723571E+00 -2.45640099994E-01 -1.79114911004E-01 -5.20692182275E-02 -8.71655399522E-01 -1.19280095545E-01 -1.5913808456E-01 -1.59138013672E-01 -3.17161392238E-02 -4.01102295641E-01 -5.12153734962E-02 om table: 1) RMS V.	3.33353724833E-01 4.75607618796E-02 4.75607618796E-02 9.4684457720E-02 -6.55282758341E-01 -6.79167570780E-02 2.99884381486E-01 4.87381040365E-02 4.15247601425E-02 9.93815008517E-02 -5.15964574787E-01 -6.52962481226E-02 alue = 1.38740189E+02	1.134201571322 2.50220879128 1.852238360005 1.07867319058 1.090494671658 1.372604352518 7.121106757658 1.632366004506 1.2616157254327 6.535307928588 8.2985622828138 2) THD = 4.4	$\begin{array}{cccc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 $
19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 rived fr	-2.27156140973E-01 -1.00410723571E+00 -2.45640099994E-01 -1.79114911004E-01 -5.20692182275E-02 -8.71655399522E-01 -1.19280095545E-01 -1.5913808456E-01 -1.19132013672E-01 -3.17161392238E-02 -4.01102295643E-01 -5.12153734962E-02 om table: 1) RMS v.	3.33353724833E-01 4.75607618796E-02 4.75607618796E-02 9.4468457720E-02 9.4468457720E-02 9.4468457720E-02 9.55282758341E-01 -6.752682758341E-01 4.87381040165E-02 4.15247601425E-02 8.93815008517E-02 -5.15964574787E-01 -6.52962481226E-02 aluc = 1.38740189E+02	1.134201571322 2.502208079128 1.852238360006 1.07967913919055 1.372604332511 1.372604332511 1.37260435251 1.612586004505 1.261615725432 9.484179354278 8.298562826138 2.3 THD = 4.4	$\begin{array}{ccccccc} \bullet & \bullet $
19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 rived fr	-2.27156140973E-01 -1.00410723571E+00 -2.45640099994E-01 -1.79114911004E-01 -5.20692102275E-02 -8.71655399522E-01 -1.191200095645E-01 -1.598130808456E-01 -1.59813013672E-01 -3.171613922308E-02 -4.011022956418-01 -5.12153734962E-02 om table: 1) RMS V.	3.33353724833E-01 4.75607618796E-02 4.75607618796E-02 9.4608457720E-02 -6.55282758341E-01 -6.79167570780E-02 2.99884381468E-01 4.87381040365E-02 4.15247601425E-02 8.93815008517E-02 -5.15964574787E-01 -6.52962481225E-02 alue = 1.38740189E+02	1.134201571322 2.50220979128 1.05223031905E 1.0706731905E 1.0706731905E 1.37260432551E 7.12110675765E 1.63258600450E 1.63258600450E 1.63258600450E 2.61615725432E 6.535307928564 8.29955222813E 2.37HD = 4.4	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$

La tabla 5.7 muestra una comparación entre los resultados obtenidos en los filtros para los casos de cuatro y cinco rectificadores en el sistema eléctrico.

Los voltajes en los bancos de capacitores de los filtros no tuvieron grandes variaciones entre ambos casos, ya que el aumento de la tensión al neutro en ambos filtros estuvo alrededor del 0.1%. La corriente eficaz en el filtro de 5^a armónica aumentó un 2.24%, mientras que la corriente eficaz en el filtro de 7^a armónica aumentó un 2.45%. En donde sí se observaron cambios significativos fue en la corriente de las componentes armónicas de los filtros. Para el filtro de 5^a armónica la magnitud de esta componente tuvo un incremento del 22.8%, mientras que en el filtro de 7^a armónica el incremento de la corriente fue de 19.7%.

	Valores en el filtro de 5ª armónica			
Parámetro eléctrico	Sistema con 4 rectificadores	Sistema con 5 rectificadores		
I _{rms}	338.617 A	346.213 A		
I _s	104.973 A	128.947 A		
V _{rms} en capacitores	284.475 V	284.039 V		
	Valores en el filtro de 7ª armónica			
Parámetro eléctrico	Sistema con 4 rectificadores	Sistema con 5 rectificadores		
Irms	135.416 A	138.740 A		
I ₇	40.390 A	48.366 A		
V _{rms} en capacitores	278.058 V	277.535 V		

Tabla 5.7 Parámetros eléctricos en los filtros en sistema con cuatro y cinco rectificadores

El incremento en las corrientes armónicas en los filtros fue considerable. Una forma de disminuir este aumento en las componentes armónicas que se desean filtrar es asignando un valor menor a la constante "a" de proporcionalidad, sin embargo, valores muy bajos para esta constante pueden provocar que el filtro no absorba una cantidad suficiente de corriente armónica en el tablero 1, de forma que la distorsión en el PCC, a pesar de los filtros, no disminuya por debajo del valor máximo permitido por Std. IEEE 519 - 1992 y CFE L000045.



Conclusiones

El conocimiento de las propiedades de simetría de la serie de Fourier, especialmente de la simetría de media onda, permite determinar rápidamente el tipo de componentes armónicas que se encuentran presentes en una forma de onda. Esto es particularmente útil para el diagnóstico de convertidores electrónicos de potencia, donde una falla en uno de los dispositivos semiconductores propicia que la corriente pierda simetría de media onda, generando componentes armónicas pares y una componente de corriente directa, además de las componentes impares características.

El análisis de las componentes armónicas del voltaje y la corriente mediante la teoría de circuitos permitió conocer su comportamiento en el sistema eléctrico, como la secuencia de fases, la suma de corrientes en el conductor neutro y la ausencia de terceras armónicas en las tensiones entre fases. La determinación del valor eficaz de un voltaje o corriente con distorsión establece las bases para el cálculo de las figuras de mérito básicas, como la distorsión armónica total de la corriente y del voltaje, que permiten evaluar el grado de distorsión armónica que contiene un voltaje o una corriente.

El estudio de los dispositivos no lineales como los transformadores permitió conocer sus componentes armónicas características en su corriente de excitación, en función de la configuración y del tipo de conexión de los devanados, así como las configuraciones que generan distorsión armónica en el voltaje y bajo qué condiciones.

El análisis de los convertidores electrónicos de potencia permitió conocer las formas de onda de la corriente de los dispositivos estudiados y sus componentes armónicas características; esto constituye una herramienta muy valiosa para los estudios de distorsión armónica, ya que en base al espectro se puede determinar el tipo de convertidor de potencia y si existe alguna anomalía en su operación. Este conocimiento también se puede utilizar en forma inversa; sabiendo el tipo de dispositivos presentes en una instalación se puede conocer de antemano el contenido armónico.

Los dispositivos a base de arco eléctrico tienen un espectro que cambia en función del tiempo, debido al comportamiento irregular del arco, su análisis permitió conocer sus principios básicos de funcionamiento, saber porqué su espectro es variable y conocer las forma de onda que puede adoptar de su corriente.

Las componentes armónicas del voltaje y la corriente generan una serie de efectos no deseados en los componentes del sistema eléctrico. El uso de las figuras de mérito permite evaluar el grado de afectación que pueden provocar las armónicas en el equipo que forma parte del sistema eléctrico, del mismo modo, el conocimiento de los efectos de las armónicas permite diagnosticar las causas de la operación incorrecta o anormal de ciertos equipos.

Una de las figuras de mérito que recibe mayor atención es la denominada factor K, ya que no sólo proporciona el valor de cuánto aumentan las pérdidas en los conductores de los devanados de un transformador bajo condiciones de distorsión armónica en la corriente, también informa de la capacidad del medio de mitigación correspondiente (transformador con factor K).

De los equipos analizados los que resultan afectados en mayor medida son los bancos de capacitores, ya que constituyen una ruta de baja impedancia para las componentes armónicas de la

corriente. Si se instalan en sistemas en donde existe distorsión armónica pueden provocar problemas de resonancia en paralelo con la reactancia de un transformador, bajo un esquema de compensación centralizada, dando origen a tensiones con una alta distorsión y amplificación de componentes armónicas de la corriente. También pueden provocar resonancia en serie cuando por algún motivo se desconecta la carga del transformador y en su secundario únicamente queda conectado el banco de capacitores, dando lugar a corrientes de magnitudes sumamente elevadas generadas por la distorsión presente en el lado primario del transformador.

Los transformadores en conexión delta - estrella con factor K ciertamente ofrecen una solución al problema de las armónicas triples, especialmente la tercera, sin embargo, debe tomarse en cuenta que el transformador constituye una buena alternativa en la medida que las armónicas triples se encuentren balanceadas entre las tres fases, de otro modo habrá un cierto contenido de tercera armónica en el alimentador del lado primario.

Uno de los dispositivos de mitigación más económico es el filtro pasivo sintonizado. Aunque existen otros medios de mitigación de armónicas como los transformadores con factor K en conexión delta - estrella, los filtros pasivos tienen la ventaja de compensar potencia reactiva en forma simultánea al filtrado armónico, liberando potencia en el sistema eléctrico, reduciendo las pérdidas en conductores y mejorando el nivel de tensión. El transformador con factor K únicamente es útil para mitigar armónicas de secuencia cero.

No es recomendable la sintonización de un filtro exactamente a la frecuencia de la componente armónica que se desea filtrar ya que se pueden producir corrientes sumamente elevadas en el filtro que pueden ocasionar potenciales peligrosos para los componentes que lo integran. La sintonía del filtro por debajo de la frecuencia de la armónica de interés limita la magnitud de tal componente armónica dentro del filtro de forma que el potencial desarrollado en los elementos del filtro no se eleve en forma desmesurada.

La instalación de un banco de capacitores debe ir acompañada de un estudio de calidad de la energía si se sospecha la existencia de componentes armónicas en la corriente, ya que el banco puede generar una serie de efectos que pueden dañar al mismo banco y a otros equipos que forman parte del sistema eléctrico.

El filtro pasivo sintonizado, además de mitigar la armónica de interés en el sistema eléctrico, proporciona compensación de potencia reactiva porque tiene un comportamiento de tipo capacitivo a frecuencia fundamental. La impedancia relativamente baja del filtro a frecuencias cercanas a la de sintonía puede hacer que absorba ciertas cantidades de otras armónicas, por ejemplo un filtro de séptima armónica puede absorber quinta y novena.

El grado de corrientes armónicas de un orden distinto al de sintonía que un filtro puede absorber depende del factor de calidad Q del reactor. Un factor de calidad bajo motiva que el ancho de banda del filtro sea grande y que puedan circular cantidades considerables de corriente armónica a través de él. Por otra parte, si el factor de calidad es alto, el ancho de banda del filtro es pequeño y las corrientes armónicas de frecuencias cercanas que circulan a través de él son de magnitudes pequeñas, ya que el filtro se les presenta como una impedancia de valor elevado.



Referencias bibliográficas

- Johnson, David E., Hilburn, John L., Johnson, Johnny R. y Scott, Peter D. Análisis básico de circuitos eléctricos. Quinta edición. Prentice-Hall Hispanoamericana. México, 1995.
- [2] Hayt Jr, William H., Kemmerly, Jack E. Análisis de circuitos en Ingeniería. Tercera edición en español. McGraw-Hill. México, 1993.
- [3] IEEE Course Text 84 EHO221-2-PWR. IEEE Tutorial course. Power system harmonics. IEEE Power Engineering Education Committee & IEEE Transmission and Distribution Committee General Systems Subcommittee of the IEEE Power Engineering Society. United States, 1984.
- [4] Scott, Donald E. Introducción al análisis de circuitos. Un enfoque sistémico. Primera edición en español. McGraw-Hill. España, 1987.
- [5] Gourishankar, Vembu. Conversión de energía electromecánica. Primera edición en español. Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A. México, 1975.
- [6] Quintana Castañeda, Jorge. Armónicas en sistemas eléctricos de distribución. Causas, efectos y medios de atenuación. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico Electricista. Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. México, 1996.
- [7] Waller, Mark. Harmonics. A field handbook for the professional and the novice. First edition. Prompt Publications. United States, 1994.
- [8] Ras, Enrique. Transformadores de potencia, de medida y de protección. Séptima edición. Boixareu Editores, Alfaomega Marcombo. México, 1991.
- [9] Ras, Enrique. Teoría de circuitos. Fundamentos. Cuarta edición. Boixareu Editores, Alfaomega Marcombo. México, 1995
- [10] IEEE Std. 1100-1999. IEEE Recommended practice for powering and grounding electronic equipment. IEEE Emerald Book. Power Systems Engineering Committee of the Industrial and Commercial Power Systems Department of the IEEE Industry Applications Society. United States, 1984.
- [11] Power harmonics tester. 39/41B. Users Manual. Fluke Corporation. United States, 1995, 1996.
- [12] IEEE Std 519-1992. IEEE Recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society & Static Power Converter Committee of the IEEE Industry Applications Society. United States, 1992.
- [13] Wakileh, George J. Power systems harmonics. Fundamentals, analysis and filter design. First Edition. Springer-Verlag. Germany, 2001.
- [14] Paice, Derek A. Power electronic converter harmonics. Multipulse methods for clean power. First Edition. IEEE Press Marketing. United States, 1996.
- [15] Llamas Terrés, Armando. Armónicos en sistemas eléctricos industriales. Curso tutorial. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey. Monterrey, Nuevo León, México. 1996.
- [16] Chapman, Stephen J. Máquinas eléctricas. Segunda edición. McGraw-Hill. México, 1997.
- [17] Sandoval Rodríguez, Gonzalo. Diseño y construcción de un transformador de potencia. Tesis para obtener el título de Ingeniero Mecánico Electricista. Facultad de Ingeniería, U.N.A.M. México, 1998.
- [18] McPherson, George. Introducción a máquinas eléctricas y transformadores. Primera edición. Limusa. México, 1987.
- [19] Espinoza y Lara, Roberto. Sistemas de distribución. Primera edición. Limusa-Noriega. México, 1990.



Referencias bibliograficas

- [20] Rashid, Muhammad H. Electrónica de potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones. Segunda edición. Prentice-Hall. México, 1995.
- [21] Arrillaga, J., Smith, Bruce C., Watson, Neville C., Wood, Alan R. Power system harmonic analysis. First Edition. John Wiley & Sons Ltd. West Sussex, England, 1997.
- [22] David Irwin, J. Análisis básico de circuitos en Ingeniería. Primera edición en español. Prentice-Hall Hispanoamericana. México, 1997.
- [23] Conclec. Manual eléctrico. Tercera edición. México, 1981.
- [24] IEEE Std 1159-1995. IEEE Recommended practice for monitoring electric power quality. IEEE Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality. United States, 1995.
- [25] Rodríguez Benito, Francisco y Fayos Álvarez, Antonio. El transporte de la energía eléctrica en alta tensión. Universidad Politécnica de Valencia. España, 1998.
- [26] NOM-001-SEDE-1999. Norma Oficial Mexicana. Instalaciones eléctricas (utilización). Instituto Politécnico Nacional. México, 1999.
- [27] Pohlmann, Ken C. Principios de audio digital. Cuarta Edición. McGraw-Hill Profesional (Serie de Audio - Video). Madrid, España, 2002.
- [28] Cogdell, J. R. Fundamentos de máquinas eléctricas. Primera edición en español. Prentice-Hall. México, 2002.
- [29] G. de Abreu, José Policarpo y Eigeles Emanuel, Alexander. Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: Loss of useful life and its estimated cost. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol 18, No. 1. January/February 2002.
- [30] Enríquez Harper, Gilberto. El ABC de las instalaciones eléctricas industriales. Limusa Noriega Editores. México, 1994.
- [31] Square D. Groupe Schneider. EPS 2000. Three phase on-line UPS. EPE Technologies. Costa Mesa, California, 1993.
- [32] Square D. Groupe Schneider. EPS 3000. Three phase UPS. EPE Technologies. Costa Mesa, California, 1994.
- [33] Square D. Groupe Schneider. EPS 6000. EPE Technologies. Costa Mesa, California, 1993.
- [34] Wolf, Stanley y F. M. Smitch, Richard. Guía para mediciones electrónicas y prácticas de laboratorio. Primera edición en español. Prentice-Hall. México, 1992.
- [35] IEEE Std 18-1992. IEEE Standard for shunt power capacitors. Transmission and Distribution Committee of the IEEE Power Engineering Society. United States, 1992.
- [36] IEC 831-1. Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 660 V. IEC Technical Committee. EEC, 1988.
- [37] Power Platform 4300. TASKCard PQLite. User's Guide. Dranetz BMI. Edison, New Jersey. Revision B, May 1, 2002.
- [38] Boylestad, Robert L. Análisis introductorio de circuitos. Octava edición. Pearson Educación. México, 1998.
- [39] CFE L000045. Perturbaciones permisibles en las formas de onda de tensión y corriente del suministro de energía eléctrica. Comisión Federal de Electricidad. México.