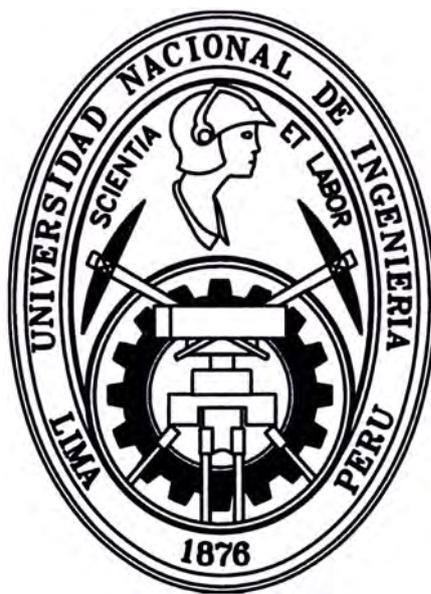


UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**MODELAMIENTO DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS CON PRESENCIA DE ARMÓNICOS**

INFORME DE COMPETENCIA PROFESIONAL

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

RAÚL JURADO LÓPEZ

PROMOCIÓN

**1991 – I
LIMA – PERÚ**

2013

MODELAMIENTO DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO EN SISTEMAS ELÉCTRICOS CON PRESENCIA DE ARMÓNICOS

**A mi madre ausente mi padre y
toda mi familia quienes son el
motor y razón de mi vida.**

SUMARIO

En el presente informe se realizará una breve introducción en el análisis de la teoría de armónicos y los efectos de estos en los sistemas eléctricos de potencia y sus implicancias para el modelamiento del transformador trifásico con presencia de armónicos para lo cual revisaremos la teoría fundamental de los transformadores desde la curva de imanación de histéresis para después explicar la linealidad no linealidad del transformador de acuerdo a la zona de la curva en la que trabaja, se hará una breve introducción de la teoría de armónicos para poder entrar a los temas de modelamiento del transformador como un componente lineal y no lineal, se tratará el modelamiento generalizado del transformador en el dominio armónico con caso de estudio, además se realizará un análisis de influencia de armónicos orientado a un sistema industrial y tener una idea general de los aspectos que se tratan para poder realizar un estudio de armónicos.

ÍNDICE

PRÓLOGO	1
CAPÍTULO I	
INTRODUCCION	
1.1 Objetivo.	2
1.2 Importancia o justificación del informe.	2
1.3 Estructura del informe.	2
CAPITULOII	
TEORÍA GENERAL DEL TRANSFORMADOR	
2.1 Curva de magnetización y efecto de histéresis	4
2.2 Linealidad y no linealidad del transformador de potencia	5
CAPÍTULO III	
INTRODUCCION A LA TEORÍA DE ARMÓNICOS	
3.1 Particularidades sobre los armónicos y su influencia en los sistemas de distribución de energía.	7
3.2 Fundamentos de la teoría de armónicos	8
3.3 Cargas lineales y no lineales	9
3.3.1 Cargas lineales	10
3.3.2 Cargas no lineales	11
CAPÍTULO IV	
MODELAMIENTO DEL TRANSFORMADOR	
4.1 Filosofía del modelamiento	13
4.2 Matriz de admitancias primitiva del transformador	14
4.2.1 Formación de la matriz de admitancias primitiva del transformador trifásico	14
4.3 Modelos de transformadores para análisis armónicos empleados con fines prácticos	15
4.4 Modelamiento generalizado del transformador de potencia en el dominio armónico.	16
4.4.1 Equivalente Norton de armónicos	17
4.4.2 Núcleos de transformadores multi-ramas	19

4.4.3	Representación equivalente del transformador	20
4.4.4	Descripción del algoritmo.	22
4.4.5	Caso de estudio	22
4.4.6	Comparación de Transformadores de un solo núcleo y núcleo multi-ramas	23
4.4.7	Efecto de acoplamiento en cruzado de armónicos	26

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y ESTUDIO DE INFLUENCIA DE ARMÓNICOS

5.1	Efecto de armónicos	28
5.2	Importancia del problema de los armónicos	28
5.3	Objetivos	29
5.4	Procedimiento para hacer un estudio de armónicos	30
5.5	Uso de filtros en armónicos	35
5.6	Estimación de costo de estudio de armónicos	37

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	39
---------------------------------------	-----------

ANEXOS

ANEXO A FIGURAS

ANEXO B FOTOGRAFÍAS

BIBLIOGRAFÍA

PRÓLOGO

La rápida evolución de la electrotecnia no se limita a las aplicaciones también afecta a su base de investigación, y singularmente, a la diversa valoración de sus contenidos. Esto obliga a una nueva selección de materias. Temas a los que apenas se dedicaba atención, merecen hoy la preferencia. Y esto no solamente ocurre en la electrotecnia; sino en la todas las especialidades que ofrecen igual realidad.

No cabe duda que la magnitud del problema de los armónicos está aumentando alarmantemente, como consecuencia de la proliferación de la electrónica de potencia, en los niveles del sistema, desde los puntos de generación hasta la utilización de la energía eléctrica.

Las empresas de suministro de energía eléctrica están aceptando la necesidad ineludible de establecer normativas, cuya implantación y aplicación requiere el desarrollo de sistemas de medida y control con precisión y fiabilidad aceptables.

El siguiente Informe tiene como fin dar una visión actualizada de los conceptos y la fundamentación teórica para explicar y modelar el transformador y ver su comportamiento en la zona lineal y no lineal en un nuevo marco de referencia que es el dominio armónico. y así modelar al transformador trifásico en presencia de armónicos.

Con el presente informe no se pretende copar aun nivel de riguroso detalle si no es una revisión de los análisis con los que se cuentan como herramientas para enfrentar el problema del tratamiento de los armónicos, se sabe que para el estudio de este fenómeno la bibliografía con la que se cuenta es muy escasa y la investigación está todavía en sus inicios y hay mucho tema por desarrollar.

CAPÍTULO I

INTRODUCCION

Los estudios del transformador referidos a la representación y/o modelamiento para que este represente al transformador real sometido a diversos casos como su funcionamiento en la zona de saturación y por otro lado alimentada con tensiones o corrientes no sinusoidales es decir con aquellas conformadas por ondas de mayores frecuencias que la de generación a devenido en los investigadores a estudiar analítica y experimentalmente modelos del transformador focalizado para los casos mencionados anteriormente. El presente informe realiza una revisión de la teoría existente referida a la teoría general del transformador y su comportamiento en la zona de saturación donde se explica el origen de componentes armónicos de la corriente ,además se explica los fundamentos de la teoría de los armónicos y se hace el estudio de modelos ya utilizados para el modelamiento del transformador en el entorno armónico, para después plantear y estudiar el modelo generalizado del transformador trifásico siendo este el modelo más completo.

1.1 Objetivo.

Estudiar el modelo generalizado del transformador trifásico a partir de sus parámetros electromagnéticos derivado de las ramas del núcleo y el cual represente acoplamientos cruzados, entre fases y entre armónicos y comprobar uno de los resultados expuestos con experiencia en laboratorio.

1.2 Importancia o justificación del informe.

Existen modelos del transformador de potencia trifásico para estudio de penetración de armónicos en las que se desprecian parámetros según los valores que se midieron en funcionamiento real pero para otros análisis puede ser que se considere importante la característica de magnetización entonces se tiene que calcular los componentes armónicos de la corriente magnetizante para representarlos adecuadamente, por lo que se propone el modelamiento del transformador de potencia trifásico en la que se consideran acoplamientos en cruz entre fases y entre armónicos.

1.3 Estructura del informe.

El informe se ha dividido por capítulos de la siguiente manera:

Capítulo I .En este capítulo se hace una introducción al presente informe, indicándose los objetivos, importancia del informe, y estructura del informe.

Capítulo II Se estudia la teoría general del transformador en la que se revisa la curva de imanación histéresis y el comportamiento lineal y no lineal del transformador.

Capítulo III Trata de las particularidades de los armónicos y la fundamentación de la teoría de armónicos.

Capitulo IV Se desarrolla el modelo generalizado del transformador de potencia trifásico con presencia de armónicos haciendo un revisión de la teoría que involucra para lograr dicho modelo y para probar su veracidad se realizó una experiencia en el laboratorio de la FIEE comprobando los resultados. También se explica otros modelos ya existentes

Capítulo V Se desarrolla el análisis y estudio de influencia de armónicos desde un punto de vista técnico.

Por último se detalla las conclusiones y recomendaciones del presente informe.

Así mismo se muestra la bibliografía, que sirvieron de referencia para el desarrollo del presente informe.

CAPÍTULO II

TEORIA GENERAL DEL TRANSFORMADOR

2.1 Curvas de magnetización y efecto de histéresis

Si se tiene un núcleo magnético que no haya sido nunca imanado y se coloca dentro de un campo magnético creciente, esto es que la intensidad de este campo varíe de forma creciente, en el núcleo citado se va desarrollando una inducción también creciente.

Si se representan por medio de un sistema de ejes coordenados los valores de la intensidad del campo y los correspondientes de la inducción en el núcleo tendremos el gráfico de la Figura 2.1 (anexo A)

A medida que partimos del punto O y va aumentando la intensidad del campo, la inducción en el núcleo aumenta hasta llegar a un punto en que a pesar de aumentar el campo, el material no admite más inducción, por estar ya saturado. Este valor que corresponde al punto A de la Figura 2.1 (anexo A), indica que para un valor de campo igual a OC se ha llegado a un valor de la inducción igual a CA.

Si una vez llegado a este punto se hace decrecer el valor del campo, ocurre que los distintos valores de la inducción no vienen representados por la misma curva AO, si no que van decreciendo más, poco a poco, según la curva AB; es decir, la inducción va disminuyendo más lentamente de lo que le correspondería; de manera que cuando el campo vuelve a ser cero o nulo como al momento de empezar, en vez de tener el núcleo una inducción nula, para lo cual debería volver a O, se queda en B, por lo que en dicho momento presenta cierta imanación, la cual viene indicada por el valor representativo de OB.

A esta inducción que queda en el núcleo se la denomina *magnetismo remanente*.

Este magnetismo remanente varía según sea el metal empleado como núcleo, de manera que para el acero es grande, especialmente si está templado, por lo que este material está indicado para la construcción de imanes permanentes. El procedimiento para obtenerlos consiste en introducirlos en campos magnéticos grandes, al suprimir los cuales quedan perfectamente imanados. En cuanto al hierro dulce, especialmente si está recocido, tiene muy poco magnetismo remanente.

Ahora bien si el campo magnético en el cual está sumergido el núcleo continua aumentando, pero en sentido contrario, lo que es fácil de conseguir, pues basta enviar a la bobina una corriente en sentido contrario a la que primeramente circulaba, la inducción en el núcleo irá disminuyendo de acuerdo con la curva BE, hasta llegar a un valor en que se anulará y que corresponde al punto E. El valor que da al campo para llegar a este punto, de manera que quede anulado el magnetismo remanente, se denomina *fuerza coercitiva*.

Continuando el campo con los valores decrecientes, es decir, valores en la dirección OG, obtendremos una curva de inducción para el núcleo, que será la EF, Al llegar al punto F, si volvemos a aumentar de nuevo los valores del campo desde G hasta C, la curva correspondiente a la inducción será la FDHA.

De este experimento se deduce que la inducción se retrasa respecto al campo, y así para un cierto valor de éste, la inducción en el núcleo puede ser diferente según que el campo sea creciente o decreciente. A este retraso de la inducción respecto al campo se le denomina *histéresis*.

Este fenómeno de histéresis aparece en todos los núcleos sometidos a cambios de campo, absorbiendo como consecuencia, cierta cantidad de energía eléctrica de la bobina productora del campo. Esta energía se transforma en calor, aumentando la temperatura del campo magnético. A fin de que esta pérdida de energía y por tanto el calentamiento no sean excesivos, para construir núcleos magnéticos sometidos a campos variables (como es el caso de los transformadores, de los inducidos de dinamos, motores, alternadores, etc.) se eligen materiales que tengan un valor reducido de histéresis, que son como es sabido, los hierros dulces recocidos.

En los núcleos para transformadores de potencia es conveniente emplear mejores materiales que tengan poca pérdida por histéresis, puesto que la corriente alterna de 60 periodos cambia de dirección 120 veces por segundo. En general el acero al silicio presenta pocas pérdidas por este concepto. Y en la actualidad el material más usado es el acero con bajo contenido de silicio con el 2 al 4.5% de silicio. La energía gastada por esta razón se traduce en energía calorífica.

2.2 Linealidad y no linealidad del transformador de potencia

Según lo revisado en la apartado anterior podemos afirmar si el lazo de histéresis se hace más angosto podemos prácticamente tener una relación lineal de flujo magnético e intensidad magnética entre los codos de saturación que se forman en los ejes positivos y negativos; pero si el transformador es operado en zonas fuera del codo de saturación en la

que un pequeño incremento de \mathcal{B} sobre un gran incremento de \mathcal{H} trae como consecuencia que la corriente comienza a distorsionarse y por lo tanto muestra componentes armónicos sobre la forma de onda de voltaje si la excitación fuera sinusoidal. Esta será entonces la zona característica de funcionamiento no lineal.

Por lo tanto los transformadores de potencia pueden actuar como no lineales en condiciones de saturación. Lo cual es que en ciertos momentos, el incremento de la densidad de flujo magnético \mathcal{B} en el transformador cesa o incrementa muy poco a medida que la intensidad de flujo magnético \mathcal{H} se mantiene creciendo. Esto ocurre más allá del llamado codo de saturación de la curva de magnetización del transformador. El comportamiento del transformador bajo ciclos cambiantes de positivos y negativos de \mathcal{H} sigue la misma curva de la Figura 2.1 (anexo A).

Por supuesto este efecto no lineal durará tanto como prevalezca la condición de saturación. Por ejemplo un voltaje elevado puede ser alimentado por el transformador durante condiciones de baja carga lo que puede durar hasta varias horas. Pero una condición de transformador sobrecargado a menudo es observado durante el arranque de grandes motores o cargas de alta inercia en entornos industriales que duran algunos pocos segundos. La misma situación puede ocurrir prácticamente con otros tipos de dispositivos con núcleo magnético.

Es importante remarcar que el área seguida por la curva de histéresis es proporcional a las pérdidas en el núcleo del transformador y por tanto los núcleos de transformadores que ofrecen una pequeña fuerza coercitiva serían necesarios para minimizar las pérdidas.

Se observa que la operación normal de los transformadores de potencia debería estar por debajo de la región de saturación. Sin embargo cuando el transformador es operado más allá de su potencia calculada (durante horas de demanda pico) o por encima del voltaje nominal (especialmente si los bancos de capacitores de factor de potencia son dejados conectados a la línea bajo condiciones de carga liviana), Los transformadores están propensos a trabajar en saturación.

CAPÍTULO III

INTRODUCCION A LA TEORIA DE ARMONICOS.

3.1 Particularidades sobre los armónicos y su influencia en los sistemas de distribución de energía.

Un suministro ideal de electricidad debería mostrar una señal de tensión invariable perfectamente sinusoidal en cada ubicación del cliente además se espera que sea completamente balanceado y de una frecuencia única y constante y las formas de onda de tensión y corriente en el sistema senoidales, de amplitud especificada y constante. La calidad obtenida de energía es entonces perfecta. Sin embargo por diferentes razones se puede presentar flujos eléctricos a otras frecuencias sobre algunas partes del sistema de potencia dentro de la instalación de un usuario. La desviación de las formas de onda de tensión y corriente de la sinusoidal se describe en términos de la distorsión de la forma de onda, a menudo expresada como distorsión de armónicos. La forma de onda resultante está compuesta por un número de ondas sinusoidales de diferentes frecuencias incluyendo una referida a la frecuencia fundamental más una onda de frecuencia distinta. La mayor contribución a este efecto distorsionante, conocido como distorsión armónica de la forma de onda, proviene de cargas y componentes no lineales y variantes en el tiempo. Ejemplos de fuentes bien conocidas de distorsión armónica son el convertidor de potencia, dispositivos FACTS (controladores de variables eléctricas como compensador síncrono estático STATCOM, compensador serie estático SSC, controlador unificado de flujo de potencia UPFC, etc.) y el fenómeno no lineal de saturación en componentes de núcleo magnético, entre otros. Esto puede resultar en un considerable efecto degradante en la calidad de la energía ocasionando, entre otros aspectos adversos, la presencia de pérdidas adicionales en el sistema, reducción en la vida útil del equipo e interferencia con equipos de protección, control y comunicación. En los primeros sistemas de potencia eléctrica, la distorsión de armónicos era principalmente causada por saturación de los transformadores, hornos de arcos industriales y otros equipos de arcos como los grandes soldadores eléctricos. El principal interés fue el efecto que la distorsión de armónicos podría tener sobre las máquinas eléctricas, interferencia telefónica, y riesgo incrementado de fallas de

condiciones de sobre-tensión desarrolladas sobre capacitores de corrección del factor de potencia.

En el pasado, los armónicos representaban menos de un problema debido al diseño conservativo de equipos de potencia y al uso común de conexiones estrella-delta con puesta a tierra en los transformadores de distribución.

El uso masivo de cargas no lineales en la industria está manteniendo la distorsión de armónicos en las redes de distribución en aumento. El equipo no lineal más usado es quizás el convertidor de potencia estática tan ampliamente usado en aplicaciones industriales en las industrias del acero, papel y textil. Otras aplicaciones incluyen el control de velocidad de motores multi-propósito, sistemas de transporte eléctrico y artefactos electrodomésticos. Una situación que ha incrementado los niveles de distorsión de la forma de onda en las redes de distribución incluso más es la aplicación de bancos de capacitores usados en plantas industriales para corrección del factor de potencia y por compañías eléctricas para incrementar el perfil de voltaje a lo largo de las líneas de distribución. La impedancia reactiva resultante forma un circuito tanque con la reactancia inductiva del sistema a una cierta frecuencia es probable que coincida con uno de los armónicos característicos de la carga. Esta condición disparará grandes corrientes oscilatorias y voltajes que pueden esforzar el aislamiento. Esta situación impone un serio reto para la industria e ingenieros de planta para puntualizar y corregir los niveles de distorsión en la forma de onda de armónicos sobre la formas de onda debido a su incremento estable ocurre en el momento cuando el uso de equipos electrónicos sensibles está en aumento.

3.2 Fundamentos de la teoría armónicos

Un componente armónico en un sistema de potencia AC es definido como una componente sinusoidal de una forma de onda periódica que tiene una frecuencia igual a un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema.

Los armónicos en las formas de onda de voltaje y corriente pueden entonces ser concebidos como componentes perfectamente sinusoidales de frecuencias múltiplos de la frecuencia fundamental:

$$f_h = (h) \times (\text{frecuencia fundamental}) \quad (3.1)$$

donde h es un entero.

Por ejemplo, un quinto armónico produciría un componente de armónicos:

$$f_h = (5) \times (60) = 300 \text{ Hz y}$$

en sistemas de 60 Hz.

La Figura 3.1 (anexo A) muestra una forma de onda de 60 Hz ideal con un valor pico de alrededor de 100 A, el cual puede ser tomado como uno por unidad. Del mismo modo, también traza formas de onda de amplitudes (1/7), (1/5) y (1/3) por unidad y frecuencias 7, 5, y 3 veces la frecuencia fundamental, respectivamente. Este comportamiento muestra componentes armónicos de amplitud decreciente a menudo siguiendo una ley inversa con el orden de armónicos es típica en sistemas de potencia.

Estas formas de onda pueden ser expresadas como:

$$i_1 = I_{m1} \text{sen } wt \quad (3.2)$$

$$i_3 = I_{m3} \text{sen}(3wt - \delta_3) \quad (3.3)$$

$$i_5 = I_{m5} \text{sen}(5wt - \delta_5) \quad (3.4)$$

$$i_7 = I_{m7} \text{sen}(7wt - \delta_7) \quad (3.5)$$

Donde I_{mh} es el valor RMS pico de la corriente de armónico h .

La Figura 3.2 (anexo A) muestra las mismas formas de onda como aquellas de la Figura 3.1(anexo A) superpuestas sobre la corriente de frecuencia fundamental que produce I_{total} . Si tomamos solo los tres primeros componentes de armónicos, la figura muestra como una forma de onda de corriente distorsionada la que se podría ver en los terminales de un convertidor de seis pulsos. Habría armónicos adicionales que superpondrían una distorsión posterior.

La forma de onda distorsionada resultante en consecuencia puede ser expresada como:

$$I_{total} = I_{m1} \text{sen}wt + I_{m3} \text{sen}(3wt - \delta_3) + I_{m5} \text{sen}(5wt - \delta_5) + I_{m7} \text{sen}(7wt - \delta_7) \quad (3.6)$$

De esta forma, una sumatoria de formas de onda perfectamente sinusoidales puede dar surgimiento a una forma de onda distorsionada. Inversamente, una forma de onda distorsionada puede ser representada como la superposición de una forma de onda de frecuencia fundamental con otras formas de onda de diferentes frecuencias y amplitudes de armónicos.

En todos los análisis de incidencia de armónicos no se tratan los armónicos pares porque en su gran mayoría se tratan de formas de onda periódicas y simétricas las cuales tienen un espectro con solamente armónicos impares o de orden 3,5,7,9,etc y de estos tenemos que excluir los llamados triplens o múltiplos enteros de 3 porque éstos son absorbidos por la conexión triángulo de los transformadores de distribución. Con lo cuál solo quedarían los armónicos de ordenes 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, etc.

3.3 Cargas lineales y no lineales

De lo que se trató en esta sección será evidente que una carga que toma una corriente desde una fuente AC sinusoidal que representa una forma de onda como de la Figura 3.2 (anexo A) no puede ser considerada como una carga lineal.

3.3.1 Cargas lineales

Las Cargas lineales son aquellas en las cuales las señales de tensión y corriente siguen una a otra muy cercanamente, tal como la caída de tensión que se desarrolla a través de una resistencia constante, la cual varía como una función directa de la corriente que pasa a través de ella. Esta relación es mejor conocida como la Ley de Ohm y establece que la corriente a través de una resistencia alimentada por una fuente de tensión variable es igual a la relación entre la tensión y la resistencia, como se describe por:

$$i(t) = v(t)/R \quad (3.7)$$

Esto es porque las formas de onda de tensión y corriente en circuitos eléctricos con cargas lineales se parecen. En consecuencia, si la fuente es una tensión a circuito abierto limpio, la forma de onda de corriente será idéntica, sin mostrar distorsión. Circuitos con cargas lineales entonces lo hacen simple calcular formas de onda de tensión y corriente. Incluso las cantidades de calor creadas por cargas lineales resistivas como elementos de calefacción o lámparas incandescentes pueden fácilmente ser determinadas porque son proporcionales a la corriente al cuadrado. Alternativamente, la potencia involucrada también puede ser determinada como el producto de las dos cantidades, tensión y corriente.

Otras cargas lineales, tales como motores eléctricos que activan ventiladores, bombas de agua, bombas de aceite, grúas, ascensores, etc., no suministrado a través de dispositivos de conversión de potencia como los unidades de frecuencia variable o cualquier otra forma o rectificación/inversión de corriente incorporarán pérdidas en el núcleo magnético que dependen de las características físicas del hierro y el cobre. La distorsión de tensión y corriente puede ser producida si el equipo con núcleo ferromagnético es operado sobre la región de saturación, una condición que puede ser alcanzada, por ejemplo, cuando un equipo es operado sobre valores calculados.

Los bancos de capacitores usados para corrección de factor de potencia por las compañías eléctricas y la industria son otro tipo de carga lineal. La Figura 3.3 (anexo A) describe una lista de cargas lineales.

Una forma de onda de tensión y corriente en un circuito con cargas lineales mostrará las dos formas de onda en fase entre una y otra. La tensión y la corriente que involucran inductores hacen que la tensión adelante a la corriente y los circuitos que

contienen capacitares de factor de potencia hacen que la corriente adelante a la tensión. En consecuencia, en ambos casos, las dos formas de onda estarán fuera de fase entre una y otra. Sin embargo, no ocurrirá distorsión de la forma de onda.

La Figura 3.4 (anexo A) presenta la relación entre tensión, corriente y potencia en un circuito lineal que consiste de una fuente AC alimentando a un circuito puramente resistivo. Observe que la potencia instantánea, $P = V \times I$, jamás es negativa porque ambas formas de onda están en fase y su producto siempre producirá una cantidad positiva. El mismo resultado es obtenido cuando la potencia es obtenida como el producto de la resistencia con la corriente al cuadrado.

La Figura 3.5(a) (anexo A) muestra la relación entre los mismos parámetros para el caso cuando la corriente I retrasa a la tensión V , lo cual correspondería a una carga inductiva, y la Figura 3.5(b) (anexo A) para el caso cuando la corriente I adelanta a la tensión V como en el caso de una carga capacitiva.

En las Figuras 3.5(a) y 3.5(b) (anexo A) se nota que en estos casos el producto $V \times I$ tiene valores positivos y negativos. Los valores positivos corresponden a la absorción de corriente por la carga y los valores negativos al flujo de corriente hacia la fuente.

En cualquier caso, la naturaleza sinusoidal de las formas de onda de tensión y corriente es preservada, justo como en el caso de la Figura 3.4 (anexo A) que involucra una carga puramente resistiva. Observe que incluso el producto $V \times I$ tiene ciclos positivos y negativos iguales con un valor promedio cero, es positivo cuando V e I son positivos y negativo cuando V e I son negativos.

3.3.2 Cargas no lineales

Las cargas no lineales son cargas en las cuales la forma de onda de la corriente no se parece a la forma de onda de tensión aplicada debido a algunas razones, por ejemplo, el uso de conmutadores electrónicos que conducen la corriente de carga solo durante una fracción del periodo de frecuencia de potencia. En consecuencia, podemos concebir las cargas no lineales como aquellas en las cuales la Ley de Ohm no puede describir la relación entre V y I . Entre las cargas no lineales más comunes en sistemas de potencia están todos los tipos de dispositivos de rectificación como aquellas encontradas en convertidores de potencia, fuentes de alimentación, unidades de fuentes de alimentación ininterrumpibles (UPS) y dispositivos de arco como los hornos eléctricos y lámparas fluorescentes. La Figura 3.6 (anexo A) proporciona una lista más extensa de varios dispositivos en esta categoría, las cargas no lineales causan algunas perturbaciones como distorsión de la forma de onda de tensión, sobrecalentamiento en transformadores y otros

dispositivos de potencia, sobrecorriente sobre terminales de conexión neutro-equipos, interferencia telefónica y problemas de control de microprocesadores, entre otros.

La Figura 3.7 (anexo A) muestra las formas de onda de tensión y corriente durante la acción de conmutación de un transistor bipolar con puerta aislada (IGBT), un dispositivo de estado sólido de electrónica de potencia. Esta es la forma más simple para ilustrar el rendimiento de una carga no lineal en la cual la corriente no sigue a la forma de onda de tensión de fuente sinusoidal excepto durante el tiempo cuando los pulsos de encendido FP1 y FP2 (como se muestra en el la figura 3.7) están en ON (activados). Algunos controladores de velocidad de motores, equipos domésticos como Televisores y reproductor de DVD y una gran variedad de otros equipos electrónicos comerciales y residenciales usan este tipo de control de tensión. Cuando el mismo proceso ocurre en equipos trifásicos y la cantidad de carga es significativa, una distorsión correspondiente puede ocurrir también en la señal de tensión.

Simbología usada :

IGBT = Transistor bipolar con puerta aislada.

FP1 = Pulso de encendido 1.

FP2 = Pulso de encendido 2.

DVD = Disco versátil digital.

CAPÍTULO IV

MODELAMIENTO DEL TRANSFORMADOR

4.1 Filosofía del modelamiento en un sistema AC.

En el inicio de un sistema de alimentación la fuente AC generalmente es representada mediante un equivalente Thevenin simple usando la impedancia de corto-circuito. Algunos programas de modelamiento por computador ofrecen representación muy detallada de las fuentes AC, incluyendo sistemas de excitación constantes para generadores síncronos. Esto proporciona la posibilidad para incorporar representaciones en profundidad de fuentes de energía adicionales en el modelo de simulación. Estos pueden incluir generación distribuida usada por compañías eléctricas para hacer frente el apoyo de tensión y potencia durante horas pico de demanda o de los recursos de cogeneración en la industria.

Las líneas de transmisión deberían ser modeladas cuando algunos usuarios industriales grandes son alimentados desde la misma línea de transmisión porque, debido a sus corrientes por armónicos de menor impedancia son poco atenuadas y pueden fácilmente difundirse a instalaciones adyacentes.

La longitud de los alimentadores de distribución están representados por su impedancia de secuencia positiva por unidad, que generalmente comprende resistencia e inductancia para líneas aéreas e incluyen capacitancia para alimentadores subterráneos. El programa de análisis de armónicos generalmente ofrece algunos modelos de línea de potencia que van desde frecuencia constante hasta modelos dependientes de la frecuencia. En todos los casos, la configuración de conductores y parámetros del suelo son necesarios de modo que el programa pueda calcular las matrices de impedancia/admitancia necesarias.

Para cargas industriales alimentadas de alimentadores privados, es importante establecer una representación detallada de los componentes de baja tensión, incluyendo cargas lineales y no lineales así como algún tipo de equipos de almacenamiento de energía como bancos de capacitores y reactores. Sobre el lado primario del transformador de

servicio, una impedancia equivalente en el lado de alta tensión puede ser usada como una primera aproximación debido a que el transformador es la impedancia predominante.

Los bancos de capacitores deberían ser modelados en los lados primario y secundario de los transformadores cuando se presenten porque son elementos importantes cuando salen de las condiciones resonantes. En el lado primario, la capacitancia de la línea de distribución no es significativa. Sin embargo, cables aislados de considerable longitud deberían ser modelados porque como elementos capacitivos pueden cumplir un importante rol en el establecimiento del nivel de interferencia telefónica, generalmente producida por armónicos de orden superior.

Los transformadores deberían ser modelados mediante un circuito equivalente que sea derivado de las características de magnetización de las ramas del núcleo y el cual permita acoplamientos en cruz entre fases y entre armónicos.

4.2 Matriz de admitancias primitiva del transformador

Para simplificar el modelado consideraremos que el transformador trifásico opera bajo condiciones balanceadas, lo que en la mayoría de situaciones prácticas se justifica y nos permite el uso de modelos matemáticos en función de sus componentes de secuencia desacopladas entre sí. Pero además últimamente se ha desarrollado métodos para que todas las conexiones de los transformadores sean modeladas exactamente mediante el uso de técnicas de coordenadas de fase, en la que no se requiere de suposiciones matemáticas. Aunque todavía se recurre a consideraciones físicas para obtener modelos relativamente simples y precisos.

4.2.1 Formación de la matriz de admitancias primitiva del transformador trifásico

La matriz de admitancias primitiva, que se usa como base para el modelo del transformador en coordenadas de fase, se obtiene de la red desconectada de carga y alimentación y utilizando el procedimiento de transformación lineal descrito anteriormente, se calcula la matriz de admitancias nodal.

En general para un transformador trifásico de dos devanados este consistirá en 6 admitancias acopladas magnéticamente entre sí, tal como lo muestra la Fig. 4.1 (anexo A) El conjunto de ecuaciones relacionando voltajes y corrientes de rama es el de la ecuación 4.1.

Donde los elementos de la matriz de admitancias primitiva pueden medirse directamente. Por ejemplo mediante la energización del devanado i y corto circuito todos los demás devanados, se determina la i -ésima columna de la matriz, mediante la relación de la ecuación 4.2.

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} & y_{14} & y_{15} & y_{16} \\ y_{21} & y_{22} & y_{23} & y_{24} & y_{25} & y_{26} \\ y_{31} & y_{32} & y_{33} & y_{34} & y_{35} & y_{36} \\ y_{41} & y_{42} & y_{43} & y_{44} & y_{45} & y_{46} \\ y_{51} & y_{52} & y_{53} & y_{54} & y_{55} & y_{56} \\ y_{61} & y_{62} & y_{63} & y_{64} & y_{65} & y_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

$$y_{ki} = I_k / V_i \quad (4.2)$$

Considerando que los acoplamientos mutuos son recíprocos, se requeriría 21 mediciones para obtener la matriz de admitancias primitiva. Además asumiendo que las trayectorias de flujo están distribuidas simétricamente, la ecuación matricial 4.1 se reduce a:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_p & y'_m & y'_m & -y_m & y''_m & y''_m \\ y'_m & y_p & y'_m & y''_m & -y_m & y''_m \\ y'_m & y'_m & y_p & y''_m & y''_m & -y_m \\ -y_m & y''_m & y''_m & y_s & y'''_m & y'''_m \\ y''_m & -y_m & y''_m & y'''_m & y_s & y'''_m \\ y''_m & y''_m & -y_m & y'''_m & y'''_m & y_s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

y_m = admitancia mutua entre devanados del primario y secundario de las mismas columnas.

y'_m = admitancia mutua entre devanados del primario.

y''_m = admitancia mutua entre devanados primario. y secundario de columnas diferentes.

y'''_m = admitancia mutua entre devanados del secundario.

4.3 Modelos de transformadores para análisis de armónicos empleados con fines prácticos.

Para conceptualizar el tema de modelamiento del transformador trifásico en un entorno de armónicos debemos tener presente que los transformadores tienen dos componentes que son de mayor interés:

Impedancia de fuga.

Impedancia de magnetización.

Normalmente, la impedancia de magnetización es mucho más grande que la impedancia por fuga cuando el transformador no es operado en la región de saturación. Para análisis de armónicos, una representación del transformador debería incluir una

fuente de corriente y una resistencia (R_m) a tener en cuenta para pérdidas en el núcleo, como se muestra en la Figura 4.2 (anexo A) de la IEEE. Para armónicos de orden bajo, puede ser usada una representación de impedancia agrupada para la impedancia de fuga.

Cuando sea requerida por el modelo usado, la relación X/R puede asumirse que tiene un típico valor de 10, dos, o tres veces tan alto para transformadores de transmisión. Si el transformador no es una fuente significativa de armónicos, la impedancia de magnetización puede ser despreciada.

Por otro lado se han propuesto otros modelos para representar la impedancia de los transformadores, fuera de la zona de saturación, en estudios de penetración de armónicos. Algunos de los más utilizados se muestran en la Figura 4.3 (anexo A) según el CIGRE (Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas)

En la Figura 4.3 (a) (anexo A) X_{50} es la reactancia de dispersión a 50 Hz

En la Figura 4.3 (b) (anexo A)

$$R = 0.126 K_h X_{50} (J+h) \quad (4.4)$$

Donde J es la razón entre las pérdidas por histéresis y por corrientes de Foucault (igual a 3 en los casos de aceros al silicio) y $K = 1/(J+1)$. En otro modelo los valores R y X son reducidos al 80% de los valores a 50Hz

En la Figura 4.3 (c) (anexo A)

$$\left. \begin{array}{l} 90 < V^2/SR_s < 110 \\ 13 < SR_p/V^2 < 30 \end{array} \right\} \quad (4.5)$$

Siendo S la potencia nominal del transformador y V la tensión nominal del transformador; valores típicos de R_s y R_p (en tanto por uno) son 0.04 y 60 para transformador de 30 MVA y 0.01 y 20 para un transformador de 100MVA.

Este campo requiere de mayor investigación, considerando la variedad de transformadores y modelos existentes. Además cuando se considere importante tener en cuenta la característica de magnetización, será preciso calcular los componentes armónicos de la corriente magnetizante y representarlos como fuentes de armónicos.

V = Tensión nominal del transformador

En adelante presentamos un modelo más completo que considera la característica de magnetización del núcleo y acoplamiento cruzado entre las frecuencias de armónicos y asimetrías multi-fases la que se describe seguidamente.

4.4 Modelamiento generalizado del transformador de potencia en el dominio armónico

El comportamiento no lineal periódico de un transformador de potencia trifásico de múltiples ramas es modelada en el dominio de los armónicos. El circuito magnético equivalente se deriva de las curvas características de magnetización de las ramas del núcleo. El modelo linealizado del transformador en la forma de un circuito Norton de armónicos se combina con la parte lineal de la red eléctrica, y se resuelve usando un procedimiento iterativo unificado.

Según lo tratado en [4] .Analizar el comportamiento de una red de potencia es un problema no lineal complejo que requiere de modelos electromagnéticos con las cuales se puede representar asimetrías multi-fases y acoplamientos cruzados entre las frecuencias de armónicos. El último aspecto no puede ser modelado en marcos de referencia convencionales.

Un nuevo marco de referencia se propone para representar el acoplamiento cruzados de armónicos y ha sido extendido para modelar bancos de transformadores trifásicos, representados como una red equivalente de armónicos, combinados con el resto del sistema. Se demostró que una elección adecuada del punto de inflexión de saturación de un transformador particular puede reducir sustancialmente el nivel de distorsión en todo el sistema. Sin embargo, para el siguiente estudio el banco de transformadores consistió de tres unidades magnéticamente independientes.

En general, los transformadores trifásicos tienen un núcleo común multi-ramas con diferentes regiones de sección transversal. La magnetización de cada rama en el circuito equivalente dependerá en consecuencia de la geometría del núcleo y en un análisis más riguroso es necesario considerar las diferentes trayectorias del núcleo de hierro así como las trayectorias de fuga del flujo en el núcleo de aire.

En este trabajo la curva característica de magnetización no lineal de cada rama magnética es linealizada en el marco de referencia generalizado en el dominio de los armónicos. El circuito equivalente completo, representado como un equivalente Norton de armónicos, es incorporado en el sistema externo de acuerdo a las conexiones eléctricas del transformador.

El análisis de flujo de armónicos del sistema incorporado requiere una solución iterativa, la cual, considerando la magnitud del problema, debe ser llevado a cabo eficientemente. Una nueva formulación híbrida orientada libremente es usada para este propósito.

4.4.1 Equivalente Norton de armónicos

Componente electromagnético básico

En la rama magnética mostrada en la Figura N° 4.4 (anexo A)

$$\Theta_{k1} = f_k(\Phi_k) \quad (4.6)$$

Es la relación no lineal para la caída magnética Θ_k , producida por el flujo Φ_k y

$$\Theta_{k2} = N_k I_k \quad (4.7)$$

La fuerza magnetomotriz. fmm, producida por la corriente de magnetización I_k (Siendo N_k el número de vueltas). La diferencia de potencial magnética resultante para la rama k es

$$\Theta'_k = \Theta_{k2} - \Theta_{k1} \quad (4.8)$$

La tensión aplicada V_k está relacionada al flujo Φ_k por

$$V_k = N_k \Phi_k \quad (4.9)$$

(Para las ramas magnéticas diferentes a las ramas de fase $N_k = 0$) la ecuación (4.6) puede ser linealizada aproximadamente en un punto de operación Θ_b, Φ_b en la forma

$$\Delta \Theta_{k1} = F_k \Delta \Phi_k \quad (4.10)$$

En el dominio de armónicos, la ecuación (4.10) es expresada como

$$\Theta_{k1} = F_k \Phi_k + \Theta_n \quad (4.11)$$

Donde:

$$\Theta_n = \Theta_b - F_k \Phi_b \quad (4.12)$$

Y F_k la reluctancia magnética incremental, está dada por:

$$O \left. \begin{aligned} F_k(j) &= \frac{f_k(j+1) - f_k(j-1)}{\Phi_k(j+1) - \Phi_k(j-1)} \\ F_k(j) &= \frac{\Theta_k(j+1) - \Theta_k(j-1)}{\Theta_k(j+1) - \Theta_k(j-1)} \end{aligned} \right\} \quad (4.13)$$

Para un punto j de operación particular.

La sustitución de las ecuaciones (4.11) y (4.7) en la (4.8) produce la siguiente ecuación linealizada en el dominio de los armónicos.

$$\Theta'_k = N_k I_k - F_k \Phi_k - \Theta_n \quad (4.14)$$

Donde todas las variables excepto N_k son fasores.

En términos de conductancia magnética incremental G_k y solucionando para flujos magnéticos, la ecuación (4.14) puede ser escrita como:

$$\Phi_k = G_k N_k I_k - G_k \Theta'_k - G_k \Theta_n \quad (4.15)$$

Simbología usada :

Θ'_k = Diferencia de potencial magnética.

Θ_{k1} = Potencial magnético l

- Θ_{k2} = Potencial magnético 2 = Fuerza magnetomotriz fmm
 Φ_k = Flujo magnético
 V_k = Tensión aplicada.
 F_k = Reluctancia magnética incremental.
 G_k = Conductancia magnética incremental.

4.4.2 Núcleos de transformadores multi-ramas

Para seguir el análisis los corchetes son usados para representar una matriz y el símbolo \sim un arreglo de vectores.

Generalizando la ecuación (4.15) para incluir todas las ramas magnéticas produce la ecuación matricial.

$$\Phi_{\sim} = [G] N i_{\sim} - [G] \Theta'_{\sim} - [G] \Theta_{\sim n} \quad (4.16)$$

Elegir un sistema por unidad conduce a la siguiente simplificación

$$N i_{\sim} = i_{\sim} \quad (4.17)$$

Y la ecuación 4.16 se convierte en:

$$\Phi_{\sim} = [G] i_{\sim} - [G] \Theta'_{\sim} - \Phi_{\sim n} \quad (4.18)$$

Donde:

$$\Phi_{\sim n} = [G] \Theta_{\sim n}$$

Multiplicando previamente la ecuación (4.18) por $[R] = [G]^{-1}$ da:

$$[R] \Phi_{\sim} = i_{\sim} - \Theta'_{\sim} - [R] \Phi_{\sim n} \quad (4.19)$$

Y multiplicando previamente la ecuación (4.19) por la matriz de nodos de ramas magnéticas de conexión $[A]^t$ resulta en:

$$[A]^t [R] \Phi_{\sim} = [A]^t i_{\sim} - [A]^t \Theta'_{\sim} - [A]^t [R] \Phi_{\sim n} \quad (4.20)$$

Las siguientes variables son definidas por las ramas de magnetización

$$[A]^t i_{\sim} = i_{\sim \text{nodo}} \quad \text{y} \quad \Theta'_{\sim} = [A] \Theta_{\sim \text{nodo}} \quad (4.21)$$

Donde $i_{\sim \text{nodo}}$ es un vector de corrientes de magnetización de nodo y Θ'_{\sim} y $\Theta_{\sim \text{nodo}}$ son vectores de rama y de potenciales magnéticos de nodo respectivamente.

La sustitución de la ecuación (4.21) en (4.20) y solucionando para $\Theta_{\sim \text{nodo}}$ nos da:

$$\Theta_{\sim \text{nodo}} = - [M_1] \{ [A]^t [R] \Phi_{\sim} + [A]^t [R] \Phi_{\sim n} - i_{\sim \text{nodo}} \} \quad (4.22)$$

Donde:

$$[M_1] = \{ [A]^t [A] \}^{-1} \quad (4.23)$$

La sustitución de la ecuación (4.22) de nuevo en la ecuación (4.18) y solucionando para i_{\sim} da:

$$i_{\sim} = [M_2] \Phi_{\sim} + [M_2] \Phi_{\sim n} + [A] [M_1] i_{\sim \text{nodo}} \quad (4.24)$$

Donde:

$$M_2 = [R] - [A][M_1][A]^t [R] \quad (4.25)$$

Ahora incluyamos la interconexión con el sistema externo. La derivada de Φ de la ecuación (4.9) se calcula en el dominio armónico como:

$$\Phi \sim = j h w \Phi \quad (4.26)$$

Solucionando para Φ , la ecuación (4.9) es expresada en forma matricial como sigue

$$\Phi \sim = \text{Diag} \{ j h w \}^{-1} v \sim \quad (4.27)$$

La sustitución de la ecuación (4.27) en (4.24) produce

$$i \sim = [M_2] \text{Diag} \{ j h w \}^{-1} v \sim + [M_2] \Phi \sim_n \quad (4.28)$$

La ecuación (4.28) finalmente se escribe como:

$$i \sim = [Y] v \sim + i_{n \sim} \quad (4.29)$$

Donde :

$$[Y] = [M_2] \text{Diag} \{ j h w \}^{-1} \quad (4.30)$$

$$i_{n \sim} = [M_2] \Phi \sim_n + [A][M_1] i_{\sim \text{nodo}} \quad (4.31)$$

Simbología usada :

\sim = Arreglo de vectores.

$[]$ = Matriz.

$\Phi \sim$ = Flujo magnético vectorial.

$\Phi \sim_n$ = Flujo magnético vectorial.

$i \sim$ = Corriente vectorial,

$v \sim$ = Tensión vectorial.

$\Theta' \sim$ = Potencial magnético vectorial.

$[G]$ = Matriz de conductancias.

$[A]^t$ = Matriz de nodos de ramas magnéticas.

$i_{\sim \text{nodo}}$ = Corriente de magnetización de nodo vectorial.

$\Theta' \sim$ = Potencial magnético de rama vectorial.

$\Theta_{\sim \text{nodo}}$ = Potencial magnético de nodo vectorial.

Diag = Diagonal de la matriz.

4.4.3 Representación equivalente del transformador

El equivalente Norton de armónicos en el núcleo de múltiples ramas, representado por la ecuación (4.29) debe ser combinado con el circuito equivalente eléctrico para describir completamente el comportamiento electromagnético del transformador. La representación combinada es lograda usando modelos de malla de armónicos.

Ha sido sugerido [7] que, en ausencia de detalles de construcción, la admitancia de magnetización por unidad puede ser distribuida igualmente entre todos los terminales, es

decir, seccionada en la mitad y colocada en ambos terminales de la admitancia de fuga. Esta aproximación es usada en el presente trabajo para el tratamiento de los términos de autoadmitancia y admitancia mutua [Y] en la ecuación (4.30). Aparte de la admitancia de fuga, el acoplamiento mutuo que existe entre los bobinados, debe ser considerado para obtener una representación de malla de armónicos completa.

Mediante el ejemplo, la ecuación de matriz nodal de armónicos de un transformador conectado en estrella-estrella con un núcleo magnético común es:

$$[I] = [Y][V] \quad (4.32)$$

Donde :

$$[I] = \begin{pmatrix} I_A + (1/2) I_{N1} \\ I_a + (1/2) I_{N1} \\ I_B + (1/2) I_{N2} \\ I_b + (1/2) I_{N2} \\ I_C + (1/2) I_{N3} \\ I_c + (1/2) I_{N3} \\ I_N - (1/2) I_{N1} - (1/2) I_{N2} - (1/2) I_{N3} \\ I_n - (1/2) I_{N1} - (1/2) I_{N2} - (1/2) I_{N3} \end{pmatrix} \quad [V] = \begin{pmatrix} V_A \\ V_a \\ V_B \\ V_b \\ V_C \\ V_c \\ V_N \\ V_n \end{pmatrix}$$

Y [Y] se muestra en la Figura 4.5 (b) (anexo A) La siguiente terminología es usada en la matriz admitancia

Y_m : Admitancia de fuga obtenida por una prueba de corto circuito

Y'_m : Admitancia mutua entre bobinados primarios

Y''_m : Admitancia mutua entre bobinados primario y secundario de ramas diferentes.

Y'''_m : Admitancia mutua entre bobinados secundarios

Y_{ij} : Elemento i-j de [Y]

Una representación gráfica del circuito equivalente de malla se muestra en la Figura 4.5 (a) (anexo A) , aunque para simplificar la comprensión, solo las conexiones que inician de los nodos C están representados en su totalidad.

Observe que las dos últimas filas y columnas en la matriz admitancia [Y] permiten diferentes esquemas de puesta a tierra a ser representados. El caso de prueba descrito luego, el cual involucra un transformador trifásico de múltiples ramas, usa una representación aproximada del transformador incluyendo solo los bloques diagonales de fase de la matriz admitancia Norton de armónicos dada por la ecuación (4.30) y con la

admitancia de fuga y de la parte lineal del transformador que está siendo representada como en la ecuación (4.32)

4.4.4 Descripción del algoritmo

- (i) Un flujo de carga de frecuencia fundamental trifásico es usado para derivar un punto de operación inicial i_b v_b en los terminales del transformador.
- (ii) El voltaje base es usado para derivar un ciclo completo del flujo $\Phi_b(t)$ en el dominio del tiempo.
- (iii) Las formas de onda del flujo de rama individual y sus respectivas características de magnetización son usadas para determinar las correspondientes formas de onda de la corriente de magnetización $i_b(t)$ en el dominio del tiempo. Las reluctancias incrementales $R(t)$ son luego obtenidas de las pendientes de las curvas de magnetización, es decir, en el tiempo t_k y para una curva particular el valor R_k correspondiente es

$$R_k = \frac{i_{k+1} - i_{k-1}}{\Phi_{i_{k+1}} - \Phi_{i_{k-1}}} \quad (4.33)$$

- (iv) El análisis de transformada de Fourier rápida es realizado sobre las variables $i_b(t)$, $\Phi_b(t)$ y $R(t)$ para determinar en el dominio de la frecuencia los coeficientes complejos de i_b (i'_h, i''_h), Φ_b (Φ'_h, Φ''_h) R (r'_h, r''_h).
- (v) Resolviendo para todas las ramas magnéticas se obtiene un equivalente Norton de armónicos que consiste en una matriz $[Y]$ que representa las admitancias magnéticas de armónicos y un vector $i_{N\sim}$ que representa las corrientes de armónicos inyectados.
- (vi) El equivalente Norton de armónicos es incorporado en el sistema externo de acuerdo a las conexiones del transformador. Los circuitos equivalentes linealizados y lineales de las componentes de la red se ensamblan y se resuelven en conjunto para obtener un nuevo punto de operación y el control es transferido al paso (ii) para ejecutar otra iteración a menos que el criterio especificado para convergencia haya sido cumplido.

4.4.5 Caso de estudio.

La generalización en el dominio de armónicos descrita en las secciones previas ha sido aplicada al sistema de prueba de la Figura 4.6 (anexo A) la cual involucra un transformador multi-ramas.

Existe poca información en la bibliografía sobre magnetización de núcleos de transformadores trifásicos multi-ramas. Sin embargo, la referencia [6] da las curvas características de magnetización experimental explícitas para las ramas del circuito equivalente, asociadas con el tipo de transformador usado en nuestro sistema de prueba. Esta información y una aproximación hiperbólica [5] han sido usadas para representar las curvas de magnetización. Estas son mostradas en la Figura 4.7 (anexo A), donde: la curva 1 representa ya sea, la magnetización de los terminales centrales en el núcleo multi-ramas o unidades con núcleos independientes de un banco de transformadores trifásicos; las ramas del circuito equivalente asociadas con el yugo son asumidas para saturar siguiendo el patrón de la curva 2, y la trayectoria de fuga a través del aire es representada por la curva 3.

Se observa que las conexiones del transformador influyen grandemente en el contenido armónico. Sin embargo, el objetivo principal de este trabajo es evaluar la necesidad de modelos más complejos del núcleo magnético. Para este efecto la estrella-G/estrella-G es seleccionada por su simplicidad y mayor flexibilidad en los flujos de corriente en armónicos.

En los casos de estudio presentados en la siguiente sección, un voltaje de 0.95 p.u. es asumido para la fuerza electromotriz del generador interno.

4.4.6 Comparación de Transformadores de un solo núcleo y núcleo multi-ramas

Para determinar la importancia de la representación detallada del núcleo, dos casos son considerados en esta sección. El primer caso relaciona a un banco trifásico de transformadores independientes conectados al resto de la red de potencia como se muestra en la Figura 4.6 (anexo A). Luego, los tres transformadores monofásicos son reemplazados por un transformador trifásico de tres ramas el cual incluye la representación de las ramas de yugo y de fuga. El flujo total a través del aire es representado por una trayectoria de fuga en la fase central. Los resultados del primer caso se muestran en la figura 4.8 (anexo A), las formas de onda de voltaje de fase de los terminales del generador y sus respectivos espectros de armónicos se muestran en la Figura 4.8 (a) y 4.8 (b) (anexo A) respectivamente.

Los resultados correspondientes para el transformador multi-ramas se muestran en la Figura 4.9 (anexo A).

Los armónicos tienden a distribuirse por sí mismos entre el núcleo adicional y las trayectorias del flujo de aire las cuales existen en un transformador multi-ramas, y esto produce una reducción considerable en sus magnitudes (Figura 4.9 (b)) (anexo A), en

comparación con aquellos de los transformadores de núcleos independientes (Figura 4.8 (b)) (anexo A).

Se observa que en la Figura 4.9 (b) (anexo A), el contenido de armónicos es $< 10\%$ en todos los casos. Con respecto a la figura 4.8 (b) (anexo A), el tercer armónico ha sido considerablemente reducido a un nivel de armónico inferior es también observado para el 7mo armónico. Además, la asimetría de armónicos entre fases es notablemente diferente con respecto a aquel asociado con un banco de transformadores trifásicos.

Para tener un caso real y presencial se realizó una prueba en el laboratorio de la FIEE que se describe a continuación:

EXPERIENCIA EN LABORATORIO

OBJETIVO

Presenciar la influencia en la distorsión armónica de los cambios de flujo magnético en 3 transformadores monofásicos individuales y un transformador trifásico de un solo núcleo y tres ramas magnéticas con conexiones Yy (3transformadores $1\emptyset$), Dy5 (transformador $3\emptyset$).

EQUIPOS Y MATERIALES

01 Analizador de Redes	Fluke 43B
01 Variador de velocidad	Mitsubishi
03 Transformador monofásico	1.3KVA
01 Transformador trifásico	6 KVA

DESARROLLO DE LA EXPERIENCIA

Se Arma el circuito según los diagramas de las Fig. 4.10 y 4.11 Anexo A

Datos de placa de los Transformadores.

Transformador monofásico:

Potencia	1.3 KVA
Tensión Nominal	220/2x115V.AC
Corriente Nominal	58/11.6 A

Transformador trifásico:

Potencia	6 KVA
Tensión Nominal	220/115VAC
Corriente Nominal	58/11.6 A
Conexión	Dy5
Frecuencia	60 Hz
Tcc	3.5

Factor	:	K1
Aislamiento (AT)	:	2.5
Aislamiento (BT)	:	2.5
Peso	:	65 Kg
Carga: Motor trifásico		
Marca	:	Siemens
Potencia	:	0.6/0.45 HP/kW
Tensión Nominal	:	220 $\Delta\Delta$, 380YY-440 Δ V
Corriente Nominal	:	2.4 – 1.4 – 1.2 A
Cos \emptyset	:	0.82
F.S	:	1.05
Velocidad	:	1080 RPM

IP55

VALORES OBTENIDOS**Tres transformadores monofásicos independientes:**

Conexión Y-Y

Datos de Entrada

Valimentación = $V_{\text{linea}} = 227.1V$

Datos de salida

Tensión de línea (V)=254.3

THDV% = Índice de distorsión armónica de tensión.

THDI% = Índice de distorsión armónica de corriente.

Orden de armónico	Tensión % de la fundamental	THDV %	THDI%
3	28	45.1	79.2
5	25	45.1	79.2
7	12.5	45.1	79.2
9	6	45.1	79.2
11	3	45.1	79.2

Un transformador trifásico de un núcleo y 03 ramas magnéticas:

Conexión Dy5

Datos de Entrada

Valimentación = $V_{\text{linea}} = 227.1V$

Datos de salida

Tensión de línea (V)=254.3

Orden de armónico	Tensión % de la fundamental	THDV%	THDI%
3	25	26.9	87.9
5	12.5	26.9	87.9
7	2	26.9	87.9
9	2	26.9	87.9
19	8	26.9	87.9

De los valores obtenidos se puede concluir que hay una disminución de contenido de armónicos cuando la conexión es en transformadores independientes (Foto No1 Anexo B), respecto al transformador trifásico (Foto No 2 Anexo B) y es porque los armónicos tienden a redistribuirse entre el núcleo adicional y las trayectorias de flujo de aire por lo que produce una reducción en su magnitud (véase también Fotos 4 y 5) registrados en el Fluke.

4.4.7 Efecto de acoplamiento cruzado de armónicos.

El acoplamiento cruzado entre frecuencias, que ocurren en los componentes no lineales de las redes de potencia no puede ser modelado en los marcos de referencia convencionales. Este fenómeno, el cual puede ser explícitamente representado en el dominio de armónicos, es analizado en esta sección con referencia al circuito de transmisión original de la referencia [7]. Aquí el generador y la parte lineal del transformador son combinados y dados como un equivalente Thevenin y el banco de transformadores trifásicos es representado por una curva de magnetización única (Curva 1 de la figura 4.7 anexo A).

Para las mismas condiciones de operación el efecto del cambio del número de armónicos considerado durante el proceso es analizado en el dominio armónico. Para la red de la Figura 4.6, los resultados presentados en las Figura 4.12 y 4.13 (anexo A) han sido calculados al final de la línea de transmisión. Las figuras 4.12 (a)-(b) y 4.13 (a)-(b) (anexo A) muestran la forma de onda de tensión y el contenido de armónicos obtenidos cuando el acoplamiento en cruz es explícitamente representado para los primeros 8vo y 22vo armónicos respectivamente.

Las Figuras 4.12 (a) y 4.13 (a) (anexo A) muestran diferencias remarcables en las formas de onda de tensión cuando se altera el número de armónicos. Sus respectivos espectros de armónicos dados en las Figuras 4.12 (b) y 4.13 (b) (anexo A) muestran una

variación de armónicos impredecibles y asimétricos, a medida que se incrementa el número de armónicos representado.

Los resultados en la Figura 4.6 (anexo A) demuestran claramente que la presencia de saturación del transformador combinada con la línea de transmisión ligeramente cargada pueden producir considerable distorsión de armónicos, y que la predicción de tal distorsión en la etapa de planeamiento requiere el uso de la representación detallada del transformador y el acoplamiento de armónicos.

CAPÍTULO V

ANÁLISIS Y ESTUDIO DE INFLUENCIA DE ARMÓNICOS

5.1 Efecto de los armónicos.

Dado que la presencia de los armónicos trae como consecuencia efectos negativos en un sistema industrial, domiciliario y en general a los sistemas de distribución y transmisión. Debido a que ellas originan lo que muy resumidamente presentaremos, según la referencia [8].

1.- Mayores sollicitaciones térmicas

- Pérdidas adicionales en conductores
- Pérdidas adicionales en núcleos de las máquinas

2.- Mayor exigencia de aislación

- Cables
- Condensadores

3.- Operaciones anormales y fallas de equipos

- Torques pulsantes en máquinas
- Operaciones falsas en protecciones
- Señales de referencias falsas
- Interferencia en comunicaciones
- Errores de medición
- Interferencia electrónica de aparatos de control
- Corrientes importantes en neutros

4.- Excitación de resonancias en la red

- Explosión de filtros o bancos de condensadores
- Destrucción de transformadores
- Se queman fusibles

5.2 Importancia del problema de los armónicos.

Las empresas eléctricas y los usuarios desde décadas atrás están siendo enfrentados debido a la necesidad de optimizar sus procesos y mejorar la eficiencia en el uso de la energía eléctrica. El uso de los convertidores estáticos, para el control y transformación de

la energía eléctrica a derivado en el incremento de la eficiencia y estos aparatos han sido en su mayoría los que dieron viabilidad a los grandes avances en la automatización de los procesos industriales. Pero “negativamente” estos equipos se caracterizan porque absorben corrientes no sinusoidales de la red, originando distorsiones en las tensiones y corrientes.

El uso de los convertidores estáticos en la actualidad prosigue en aumento y trayendo consecuentemente los problemas que involucran el origen de las corrientes no sinusoidales. Esta esta es la razón de porqué se ha producido un gran interés en el estudio del problema de los armónicos en redes eléctricas.

La Importancia del problema de armónicos desde el punto de vista técnico. Tal como se refirió en el punto anterior, producen una variedad de efectos negativos, que no contribuyen a la buena operación de un sistema eléctrico, y estos pueden ser resumidos en:

- a) Aumento de pérdidas en redes y en equipos eléctricos.
- b) Disminución de la vida útil de los equipos.
- c) Pérdida de calidad y de confiabilidad del sistema eléctrico.

Ahora viendo la importancia del problema de armónicos desde un punto de vista administrativo, comercial y legal.es según la experiencia de los tratantes de este tema y se ha demostrado que son los aspectos no técnicos los que más impulsan a las empresas a preocuparse del problema de los armónicos. Por aspectos no técnicos se entiende los administrativos, comerciales y legales.

5.3 Objetivos.

Para proceder a estudiar un problema de armónicos referida a la parte industrial se debe fijar objetivos y/o procedimientos específicos, estos dependerán de los objetivos del estudio. Los objetivos más usuales y que frecuentemente se realizan y se pueden considerar son:

- 1.-Evaluar el grado de contaminación de armónicos que existente en una red.
- 2.-Evaluar el impacto que tendrá sobre el sistema la introducción de una nueva carga inyectora de armónicos. Lo que significa cuantificar la distorsión de las variables más importantes de la red.
- 3.-Resolver problemas de interferencia telefónica.
- 4.-Investigar problemas de fusibles quemados en bancos de condensadores y filtro de potencia existentes en sistemas contaminados.
- 5.-Determinar el impacto y la ubicación óptima de bancos de condensadores o filtros para compensación de potencia reactiva en sistemas con cargas contaminadoras.

6.-Diseñar filtros de potencia para el control y atenuación de armónicos.

5.4 Procedimiento para hacer un estudio de armónicos.

Si ya es sabido que existe un problema de armónicos, no es aconsejable dar una solución aventurada y probarla inmediatamente en la práctica para ver su repercusión. Los costos de los equipos que se adquieren para este fin da cuenta de que este método no sea aceptable. Además, una medida mal revisada y mal implementada puede aumentar aún más el problema. Para realizar un análisis de armónicos se pueden considerar criterios como se muestran en la tabla 5.1. El cual inicia fijando los objetivos del estudio, para posteriormente hacer una reducción y modelado del sistema que considera: agrupación de cargas, identificación de tipos de consumos, etc. También es necesario establecer modelos especiales de los equipos eléctricos para un análisis de armónicos. Una vez hechos estos pasos anteriores es posible realizar una evaluación preliminar del contenido de armónicos en el sistema.

Esta evaluación preliminar debe hacerse mediante el uso de computadores debido a la complejidad característica de los sistemas eléctricos. Un paso siguiente es realizar mediciones de armónicos en terreno para dar validez a los modelos y obtener resultados coherentes. Realizada la prueba para dar validez de los modelos, se tiene una herramienta poderosa para estudiar eficazmente el problema de los armónicos en la operación futura del sistema.

Tabla 5.1 Etapas de estudio de armónicos

OBJETIVOS	-Establecer los objetivos del estudio de armónicos
SIMULACION	-Modelado del sistema -Modelado de elementos -Análisis Preliminar
EXPERIMENTAL	-Mediciones -Validación, modificación de modelos
SIMULACION	-Estudios de otros casos -Modificación de modelos -etc.

Para discernir en qué casos hacer un estudio de armónicos.se sabe que los estudios de armónicos, como cualquier estudio, deviene en una gasto de dinero y debería hacerse en casos justificados. Por lo que se sugiere realizar en las siguientes situaciones:

i) En redes débiles, con potencia de cortocircuito baja que tienen cargas no lineales que inyectan corrientes armónicas (convertidores, hornos de arco).

- ii) Cuando la potencia de las cargas contaminantes es importante con respecto a la potencia instalada de la planta.
- iii) Cuando se dan algunos indicios operacionales inquietantes, tales como la quema de fusibles, cables, filtros y bancos de condensadores. A veces estos elementos se queman "sin causa aparente". En estos casos es muy probable que la causa esté relacionada con los armónicos.
- iv) Cuando un cliente sospecha que la concesionaria le está inyectando armónicos o viceversa.

Cuando un sistema eléctrico está pleno funcionamiento pese a tener problemas pero funcionando, la justificación de un estudio de armónicos o la instalación de filtros de potencia es más complicada sustentarla.

Pero es más sustentable el estudio de armónicos cuando se hace una ampliación o modificación importante en la planta. En este caso, no se sabe si el sistema tendrá problemas o no frente a la adición de más contaminantes, lo que justifica hacer un estudio. Además, los costos del estudio se pueden cargar al proyecto de las nuevas instalaciones.

Si para el estudio requerimos localizar y medir los armónicos debemos saber que las manifestaciones de los armónicos no son etéreas. Analizaremos indicadores básicos para descubrir los armónicos. Empero es importante que sea un completo y detallado análisis de la instalación a fin de diseñar un plan específico para la solución del problema

Se sabe que la red de alimentación podría ser una portadora de armónicos de tensión. Y la relación entre la corriente armónica circulante por la instalación y la impedancia de la misma hace que haya en la fuente de alimentación principal una tensión armónica residual que termina sumándose al suministro de la instalación, deformando la senoide en los extremos en forma plana, por lo tanto se estaría afectando la calidad eléctrica de la tensión. En la mayoría de los casos se da que las cargas que generan corrientes armónicas que circulan en la instalación son las que terminan siendo afectadas por los efectos contrarios a sí mismos, un ejemplo de ello son los ordenadores personales que son muy sensibles a los armónicos de corriente las que pueden resetearse en forma intempestiva.

Si vemos ahora en la parte industrial los motores de inducción y los bancos de baterías de condensadores para corrección del factor de potencia pueden ser seriamente afectados por los armónicos de tensión, ya que los condensadores de corrección de factor de potencia pueden formar un circuito resonante con la instalación de naturaleza inductiva. Si la frecuencia de resonancia del conjunto está muy cercana a la de los armónicos de

tensión, la corriente armónica circulante podrá aumentar considerablemente sobrecargando los condensadores y quemando sus protecciones. El salto de las protecciones provoca la parada de la etapa de corrección y la resonancia desaparece.

Como se vio en el apartado 3.2 las frecuencias de los armónicos de corriente y de tensión son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental. Y como ya sabemos que los armónicos son originados por las denominadas cargas no lineales que absorben corriente en pulsos bruscos en lugar de hacerlo en forma sinusoidal. Estos pulsos crean ondas de corriente distorsionadas que a su vez originan corrientes armónicas de retorno hacia otras partes de la instalación.

En las plantas industriales las causas más frecuentes de corrientes armónicas son cargas trifásicas también no lineales como los variadores de velocidad que regulan electrónicamente la velocidad de giro de los motores de potencia.

Los efectos de los armónicos ya se describieron en el apartado 4.1 pero un resumen y ampliación con más detalle lo describimos a continuación:

□ **Los conductores del neutro.** Estos son afectados por armónicos impares denominados triplens u homopolares múltiplos impares de los terceros armónicos: 3, 9,15, etc. no se anulan entre sí sino que se suman en el conductor neutro. En casos extremos se puede dar el caso que la corriente del neutro supere en magnitud la corriente de fase. En este caso el peligro es el excesivo calentamiento, por no estar dimensionado para elevadas corrientes y por no existir en el conductor neutro un interruptor automático que limite la corriente como ocurre en los conductores de fase.

Una corriente excesiva en el conductor neutro puede provocar también caída de tensión superior a lo normal entre el conductor neutro y tierra en la toma de corriente a 230V.

□ **Interruptores automáticos.** Los interruptores termo magnéticos tienen un mecanismo de disparo que reacciona al calentamiento por la corriente del circuito. Dicho mecanismo está diseñado para responder al calentamiento que produce la corriente eficaz de la onda de corriente de manera que se dispare si se calienta demasiado. Este tipo de interruptor es la gran solución para proteger los circuitos frente a sobrecargas debido a corrientes armónicas. Los interruptores automáticos electrónicos detectores de picos reaccionan ante los picos de la corriente. Como el valor de pico de la corriente armónica suele ser superior al de la normal, este tipo de interruptor automático puede dispararse intempestivamente con valores de corriente normalmente bajos. Por otro lado si el nivel de pico es inferior al normal puede que el interruptor no active cuando debiera.

□ **Barras colectoras y espárragos de conexión.** Las barras colectoras de neutro y los espárragos de conexión están dimensionados para soportar el valor máximo de la corriente se fase, pero pueden sufrir sobrecarga si se añade a los conductores neutros la suma de los armónicos triplens.

□ **Cuadros eléctricos.** Pueden Presentar resonancia debido a los campos electromagnéticos generados por corrientes armónicas de alta frecuencia. Cuando esto sucede el panel comienza a vibrar descontroladamente y emitir un zumbido como consecuencia de las elevadas frecuencias armónicas

□ **Telecomunicaciones.** Para reducir a un mínimo la interferencia inductiva producida por las corrientes de las fases los cables de telecomunicaciones se tienden cerca del conductor neutro. Con frecuencia los armónicos triplen de este conductor originan la interferencia inductiva que se escuchan en algunas líneas telefónicas. Esta manifestación es un primer indicio de la existencia de un problema de armónicos que se manifiesta con molestos zumbidos, en posibles pérdidas de datos, etc.

□ **Transformadores.** Los armónicos triplens que se suman algebraicamente en el conductor neutro. Cuando ésta corriente de neutro llega al transformador se refleja en el devanado primario en delta del mismo y circula por él con el consiguiente sobrecalentamiento y averías del transformador. Normalmente los transformadores solo están diseñados para una carga de corriente de fase de 50 ó 60 Hz, al ser más alta su frecuencia, la corriente armónica provoca un calentamiento con la misma cantidad de corriente.

Estos efectos de calentamiento obligan a desclasificar los transformadores utilizados para alimentar cargas armónicas o a sustituir dichos transformadores por otro de diseño especial.

□ **Generadores.** Los generadores de reserva están sujetos al mismo tipo de problemas de sobrecalentamiento que los transformadores, pero como se utilizan como fuentes de alimentación de emergencia para cargas productoras de armónicos son incluso más vulnerables, Además de sobrecalentamiento, algunos armónicos provocan distorsión en los pasos por cero de la onda de corriente, lo que originan incomodas perturbaciones e inestabilidad de los circuitos de control del generador.

Si hacemos el rastreo de armónicos para así nos permita saber si están causando algún problema y si es así donde está ubicado. A continuación se indican algunas pautas a seguir.

□ **Inventario de cargas.** Realizar una inspección de las instalaciones y verificar que equipos se utilizan. Si tienen muchos ordenadores personales, e impresoras, variadores de velocidad, controles electrónicos de calefacción y aire acondicionado y ciertos tipos de alumbrado fluorescente (balastos electrónicos), es muy probable que haya armónicos.

□ **Comprobación de calentamiento de los transformadores.** Localizar los transformadores que alimentan esas cargas no lineales y realizar la medición de temperatura utilizando un termómetro con luz infrarroja o cámara. Verificar también que las aberturas de ventilación no estén obstruidas.

□ **Corriente del Secundario de los transformadores.** Realizar la medición utilizando un multímetro de verdadero valor eficaz.

- Comprobar que la capacidad de tensión y de corriente del equipo de medición sea la adecuada para el transformador que se va a probar.
- Realizar la medición de corriente en cada fase y el neutro (si se utiliza).
- Calcular los KVA suministrada a la carga y compararla con el valor indicado en la placa de características.
- De tener el secundario un conductor neutro comparar el valor de la corriente medida en el neutro con el valor previsto en función del desequilibrio de fases (La corriente en el neutro es la suma vectorial de las corrientes en las fases y normalmente debería tener un valor de cero si estas corrientes estarían equilibradas en amplitud y fase). Si la corriente del neutro es más alta de lo previsto es probable que haya armónicos triplens y haya que desclasificar el transformador o sustituirlos por transformadores de diseño especial (Transformadores de factor K).
- Medir la frecuencia de la corriente del neutro. Una lectura de 180Hz (caso de 60Hz fundamental) sería el valor típico de una corriente que tiene armónicos de orden tres.

□ **Verificación de la corriente del neutro de los tableros eléctricos.** Para comprobar los tableros eléctricos que alimentan las cargas no lineales, realizar la medición de corriente del neutro y comparar el valor obtenido con la capacidad nominal que corresponde al cable utilizado, verificar si hay indicios de calentamiento y si hay cambios de color en la barra colectora del neutro y en las conexiones de alimentación. Utilizar un termómetro por infrarrojos sin contacto o una cámara termo gráfica para detectar el sobrecalentamiento de las barras colectoras y conexiones.

□ **Comprobación de la tensión entre neutro y tierra en las bases del enchufe.** En algunas ocasiones es posible la detección de la sobrecarga del neutro del circuito al que

pertenecen. uno o más tomas de enchufes midiendo la tensión entre neutro y tierra en estos tomas. Normalmente la lectura deberá ser igual o menor a uno o dos voltios. Una tensión superior significaría que puede haber problemas, dependiendo de la longitud del tendido, la calidad de las conexiones, etc. Al medir la frecuencia una lectura de 180Hz. Indicaría una fuerte presencia de armónicos. Un valor de 60Hz desequilibrio de fases.

Prestar especial atención a los cables tendidos bajo suelo y moquetas y a los paneles modulares de oficina con cableado integral en el que se usa un neutro compartido por tres conductores de fase. Dado que en estos casos las cargas típicas son ordenadores y máquinas de oficina, los puntos mencionados suelen presentar sobrecarga en el neutro.

5.5 Uso de filtros en armónicos.

La instalación de filtros para armónicos en una planta industrial, eliminará la mayoría de los problemas de calidad de energía como son. Las fluctuaciones de tensión, mejorara la eficiencia y las condiciones de funcionamiento, reducirá la factura eléctrica, ampliara la vida útil de los equipos perjudicados y atenuara o eliminara los efectos mencionados en el apartado 5.1 y permitirá la optimización de la red,

La función de los filtros es presentar un camino de menor impedancia que la red para el armónico que se desea eliminar. De este modo la corriente armónica se va por el filtro preferentemente y la impedancia total equivalente del sistema a esa frecuencia determinada es menor. Como la corriente armónica produce una caída de tensión menor en la impedancia de la red, ello significa que la distorsión de tensión disminuye, figura 5.1 (anexo A).

$$I_{sh} = I_h \frac{Z_{fh}}{Z_{fh} + Z_{sh}} \quad (5.1)$$

$$V_h = I_h \frac{Z_{fh} Z_{sh}}{Z_{fh} + Z_{sh}} \quad (5.2)$$

Hay una gran variedad de configuraciones de filtros los que son usados para limitar la distorsión armónica. Las configuraciones más comunes son el filtro Sintonizado Simple y el filtro Pasa altos de 2º orden y algunas otras que se muestran en la figura 5.2. (anexo A)

□ El filtro sintonizado simple.

La Configuración y comportamiento en frecuencia se muestra en la figura 5.3 (anexo A) es el filtro más simple y consiste en un banco de condensadores conectado en serie con un inductor; ambos se sintonizan a la frecuencia que se desea atenuar.

Características generales:

- Se usan para eliminar una armónica determinada.
- Se llama frecuencia de sintonía a la frecuencia de resonancia del filtro.
- El filtro se sintoniza a aquella frecuencia que se desea eliminar.
- A la frecuencia de sintonía (resonancia) la impedancia del filtro es mínima.
- El factor de calidad del filtro $Q_0 = X_0/R$ es alto [30 - 60] y hace que la característica de impedancia sea más o menos estrecha o abrupta.
- Es utilizado en instalaciones con rectificadores, inversores y hornos de arco en casos específicos.

Ventajas:

- Proporciona una máxima atenuación para una armónica individual.
- A frecuencia fundamental puede proporcionar la potencia reactiva requerida en la red.
- Tiene bajas pérdidas que está asociadas a la resistencia del inductor.

Desventajas:

- Vulnerable a la desintonía debido a tolerancias de elementos con la temperatura y/o variaciones de frecuencia fundamental.
- Interactúan con la red originando una resonancia paralela al igual que un banco de condensadores.
- **Filtro pasa alto de segundo orden.**

La Configuración y comportamiento en frecuencia se muestra en la figura 5.4 (anexo A); de los filtros de característica amortiguada es el más común. La conexión de una resistencia en paralelo con el inductor le da un comportamiento amortiguado para un amplio rango de frecuencias.

Características generales:

- Se usan para eliminar un amplio rango de armónicas.
- Se emplean cuando las armónicas no tienen una frecuencia fija, lo que sucede comúnmente en los cicloconvertidores u hornos de arco.
- Estos filtros también tienen una frecuencia de sintonía.
- Presentan un alta impedancia para frecuencia bajo la sintonía y una baja impedancia para frecuencias superiores a la de sintonía.
- En estos filtros el factor Q es bajo y se define como $Q = R/X_0$. [0.5 - 4]

Ventajas:

- Atenúan un amplio espectro de armónicas de acuerdo a la elección del valor de la resistencia.

- Es muy robusto frente a desintonías comparado con el filtro sintonizado simple.

Desventajas:

- Origina una frecuencia de resonancia paralela al interactuar con la red.
- Presenta pérdidas adicionales debido a la resistencia.

5.6 Estimación de costo de estudio de armónicos.

Si en una planta industrial hay indicios de existencia nocivas de armónicos y lo que se quiere es esclarecer si son menores o considerables, además el origen de estos para así recomendar al solicitante de estos estudios las medidas correctivas para el buen funcionamiento de la planta industrial o similar.

Para poder estimar los costos de estudio primero debemos saber en qué consistirán estos para lo cual debemos fijar objetivos que son:

- a) Verificar que los niveles de distorsión en equipos y en la red de distribución industrial cumplan con normas y especificaciones.
- b) Diagnóstico de niveles de armónicas en el sistema de distribución, orientado a estudiar un problema específico (Ejemplo: Barra con banco de condensadores).
- c) Proveer información cuantitativa para planificación del sistema eléctrico.

Por otra parte para aplicar los estudios se deben considerar

- Disponer de la base técnica para cimentar la gestión administrativa del servicio eléctrico Cliente-Concesionaria (contratos, tarifas)
- Dar capacidad de Alerta frente a potenciales disturbios y reducir riesgos operacionales.
- Resguardo frente a siniestros.
- Chequeo de distorsión armónica y especificaciones de equipos suministrados por proveedores.
- Disponer de una base cuantitativa para la definición de acciones que aseguren la calidad del servicio eléctrico.

Para realizar la medición de variables se considera el sistema eléctrico en estado estacionario y para un punto dado de medición se miden para una fase los siguientes valores.

- Distorsión armónica individual de voltajes y corrientes en una barra DVh, DIh, respectivamente.
- Distorsión armónica total de Voltajes THD.
- Distorsión armónica total de Corrientes THD.
- Valores TRMS de Voltajes y Corrientes.
- Corriente y distorsión en el neutro (si es que existe).

Para realizar las mediciones en valores accesibles de baja tensión se deberá necesariamente usar los transductores que son transformadores de medición tanto de corriente como de tensión.

El equipamiento que se encargara de adquirir señales de funcionamiento pueden ser instrumentos dedicados que son instrumentos electrónicos basados en microprocesadores que toman la señal de voltaje (o corriente) y realizan directamente el análisis de Fourier (FFT) dándonos el espectro de magnitud y el espectro de fase en función de la frecuencia estos son equipos de alto costo. Otra alternativa de obtención de datos de las señales a medir sería un sistema de adquisición de datos A/D estos son basados en computadores personales al que se incorpora un adquisidor Analogo-digital el cual puede estar incorporado como un módulo externo o como una tarjeta de adquisición dentro del computador, estos requieren de un software para el análisis .Además presentan gran flexibilidad, aunque requieren una mayor dedicación del usuario. Su costo es menor de un equipo especializado pero necesita mayor tiempo para el desarrollo de programas de aplicación.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

- 1.- El dominio de los armónicos es una buena metodología para el estudio sistemas con componentes no lineales y su aplicación en estudio del modelamiento generalizado del transformador en el dominio de los armónicos comprueba su utilidad y que también puede ser extendida a otras partes del sistema eléctrico.
- 2.- El modelo generalizado del transformador de potencia en el dominio armónico es la representación más completa para el estudio de modelamiento del transformador porque considera acoplamientos cruzados entre fases y entre armónicos.
- 3.- El uso del modelo generalizado del transformador de potencia en un sistema de transmisión ha demostrado que la distorsión de armónicos causada por transformadores de núcleos individuales y multi-ramas es mayor, con notable reducción en el caso de multi-ramas. La necesidad de esta última configuración es evidente.
- 4.- El dominio armónico es una alternativa para representar los procesos de conversión de frecuencia en presencia de características no-lineales y está basado en un proceso de hacer lineal una magnitud de un particular punto de operación de componentes no lineales y variantes en el tiempo. Se obtiene así una relación lineal entre tensiones y corrientes armónicas.

Recomendaciones:

- 1.- En el caso del modelamiento del transformador en un entorno armónico existen diferentes modelos planteados y que la elección del modelo adecuado para un caso específico se tomará en cuenta el modelo de transformador y además si se considera importante tener en cuenta la característica de magnetización, se debe calcular los componentes armónicos de la corriente magnetizante y representarlos como fuentes armónicas.
- 2.- Un transformador en funcionamiento debe siempre operar con los valores nominales para lo que fue diseñado, con lo cual se garantiza que trabajara en la zona dentro del codo de saturación, siendo la corriente de magnetización del 1 a 2% del valor nominal, en un

funcionamiento en la zona de saturación el transformador origina corrientes de avalancha de alto contenido de armónicos los cuales pueden ocasionar disparos innecesarios de relés de protección diferencial.

3.- Para poder estimar costos de un estudio de armónicos en una instalación industrial se debe puntualizar las medidas de parámetros eléctricos (ejem. Barra de banco de condensadores, transformadores, tableros eléctricos, etc) y niveles de tensión, seleccionar los instrumentos adecuados para adquisición de datos (analizador de redes, pinza amperimétrica, voltímetros, vatímetros, transductores, etc), el personal técnico y los de procesamiento de datos en computadora, estimar los tiempos de adquisición, procesamiento y emisión e impresión de resultados.

ANEXOS

ANEXO A
FIGURAS

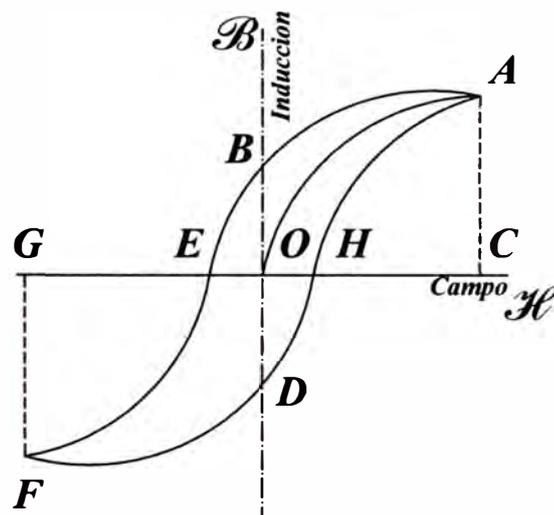


Figura 2.1 Característica de Histéresis en un núcleo Magnético

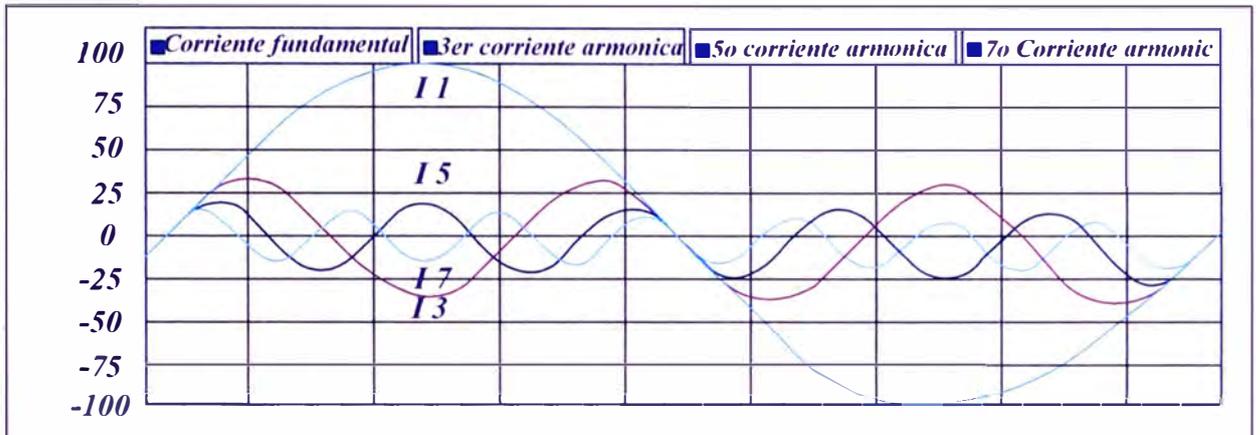


FIGURA 3.1 Forma de onda sinusoidal 60-Hz y algunos armonicos

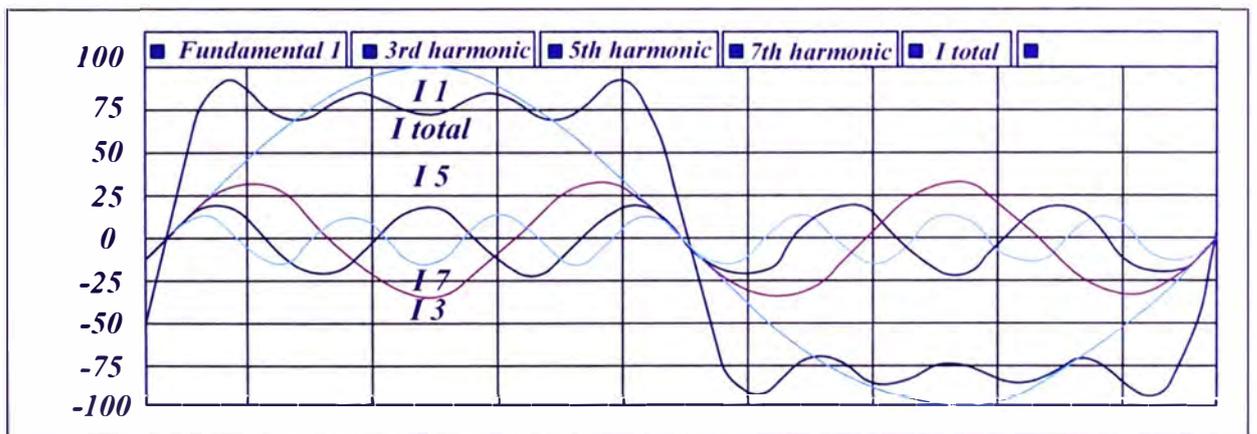


FIGURA 3.2 Forma de onda sinusoidal distorsionada por tercer y quinto armónico.

Elementos resistivos

- Iluminación incandescente
- Calentadores eléctricos

Elementos Inductivos

- Motores de inducción
- Reactores limitantes de corriente
- Generadores de inducción (molinos de viento)
- Reactores de amortiguamiento usados para atenuar armónicos
- Reactores de sintonía para filtros de armónicos

Elementos capacitivos

- Bancos de capacitores para corrección de factor de potencia
- Cables subterráneos
- Capacitores usados en filtros de armónicos

Figura 3.3 Ejemplo de cargas lineales

Electrónica de potencia

- Convertidores de potencia
- Controladores de frecuencia variable
- Controladores de motores DC
- Cicloconvertidores
- Grúas
- Ascensores
- Molinos de acero

Fuentes de alimentación

- UPS
- Cargadores de baterías
- Inversores

Dispositivos de Arco

- Iluminación con fluorescentes
- Hornos de arco
- Máquinas soldadoras

Figura 3.6 Ejemplo de cargas no lineales

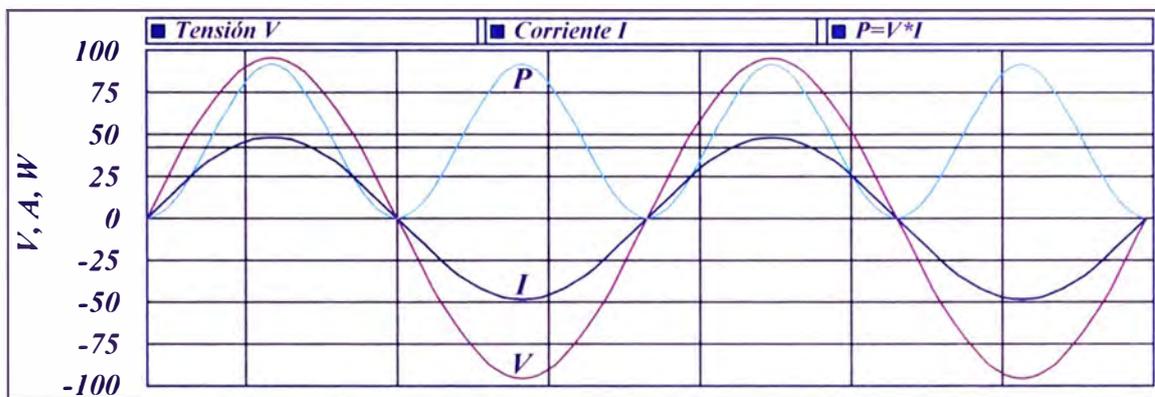
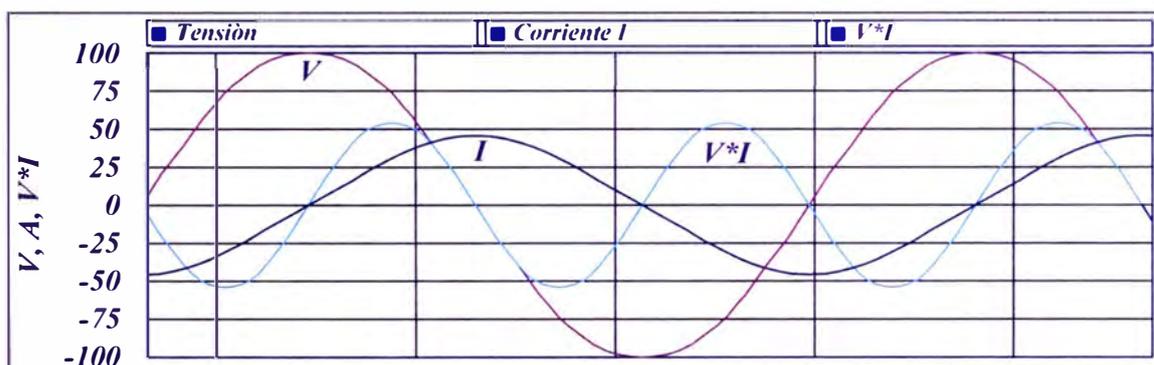
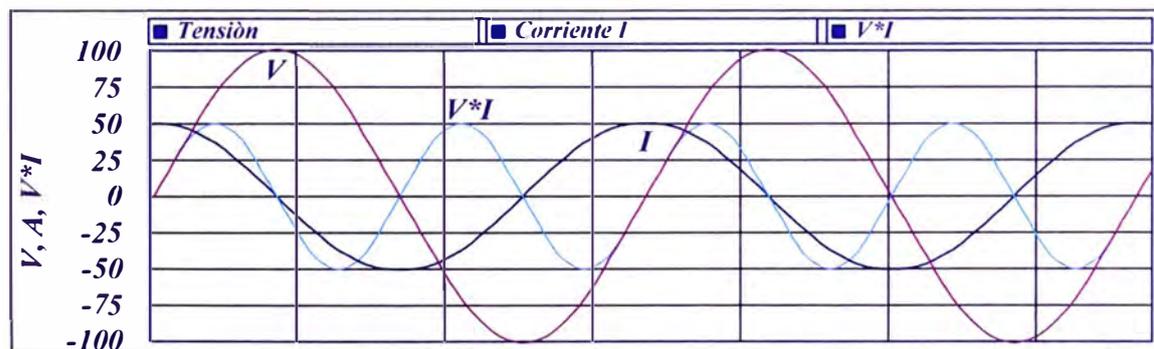


FIGURA 3.4 Relación entre tensión, corriente, y potencia en un circuito resistivo.



Corriente I atrazado ala tensión V (circuito inductivo)
(a)



Corriente I aadelantado ala tensión V (circuito capacitivo)
(b)

FIGURA 3.5 Relación entre tensión y corriente y su producto en
(a) Circuito inductivo (b) Circuito capacitivo

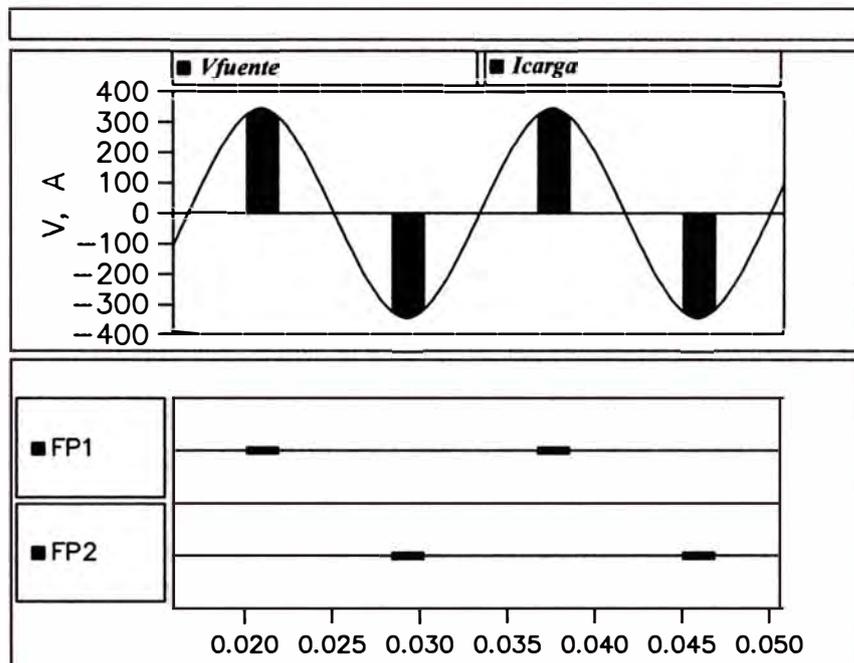
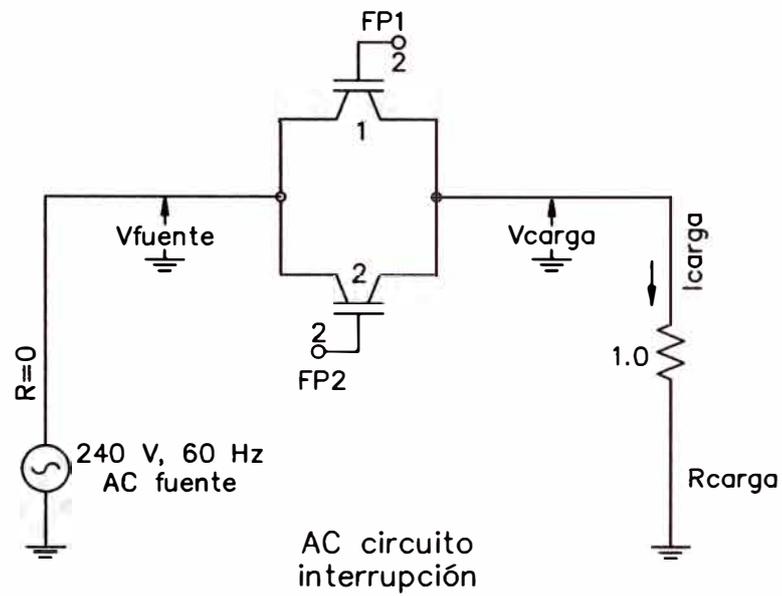


FIGURA 3.7 Relación entre tensión y corriente en un fuente de potencia típica no lineal.

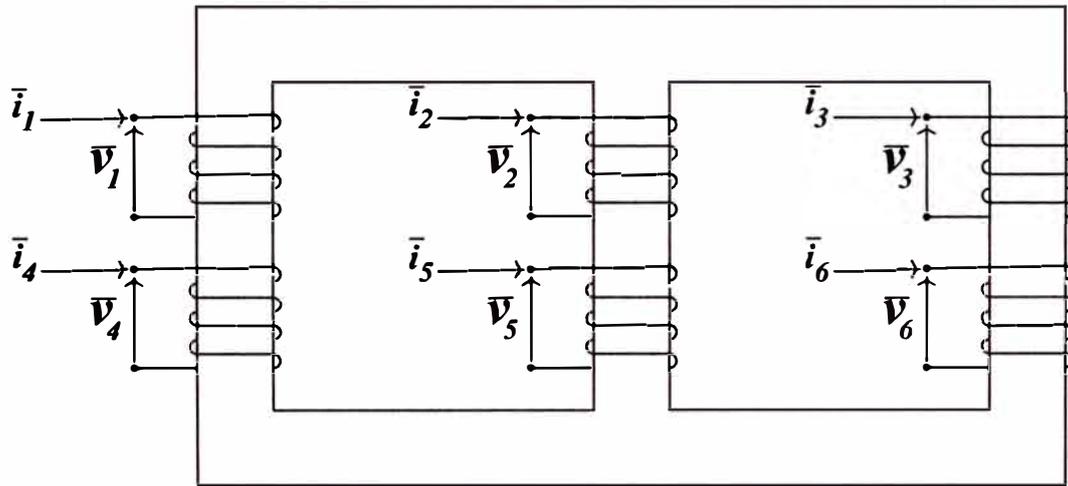


Figura 4.1 Transformador trifásico de dos devanados

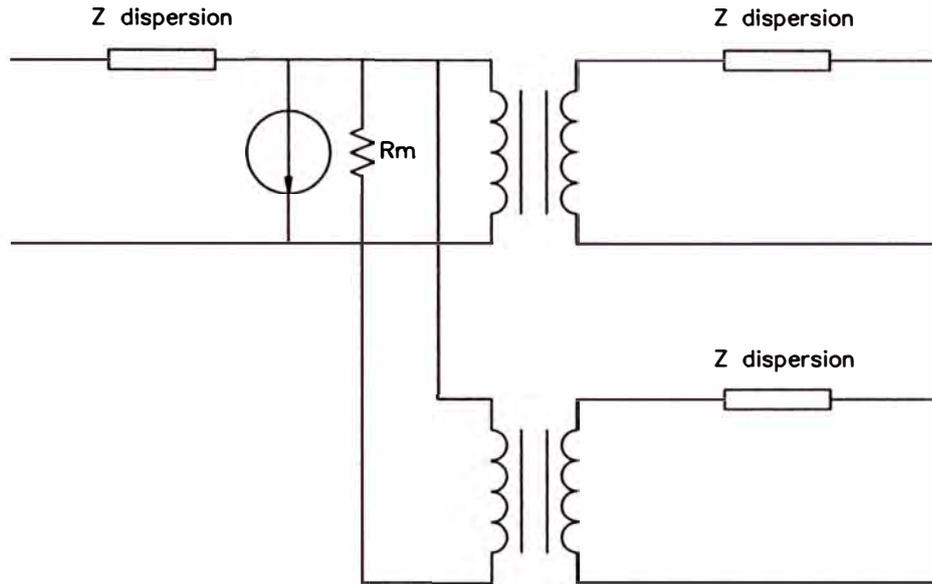


Figura 4.2 Modelo de transformador para análisis de armónicos (adaptado del transformador IEEE , Distribución de potencia. 11 (1) Enero 1996, 452-465)

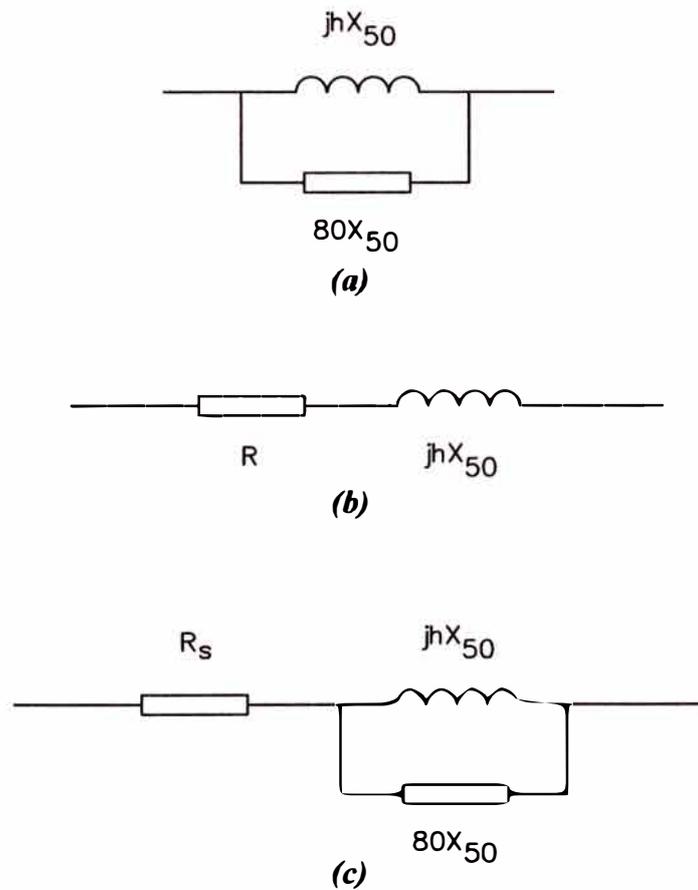


Figura 4.3 Modelos de transformador sugeridos por el CIGRE.

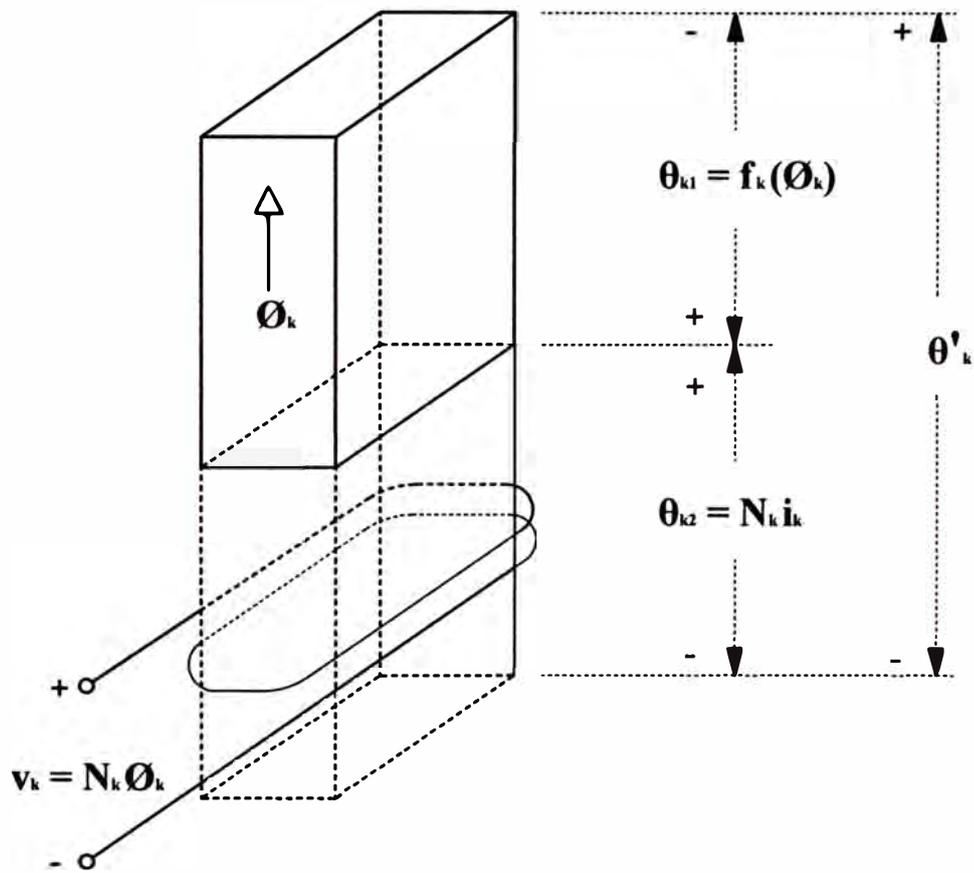
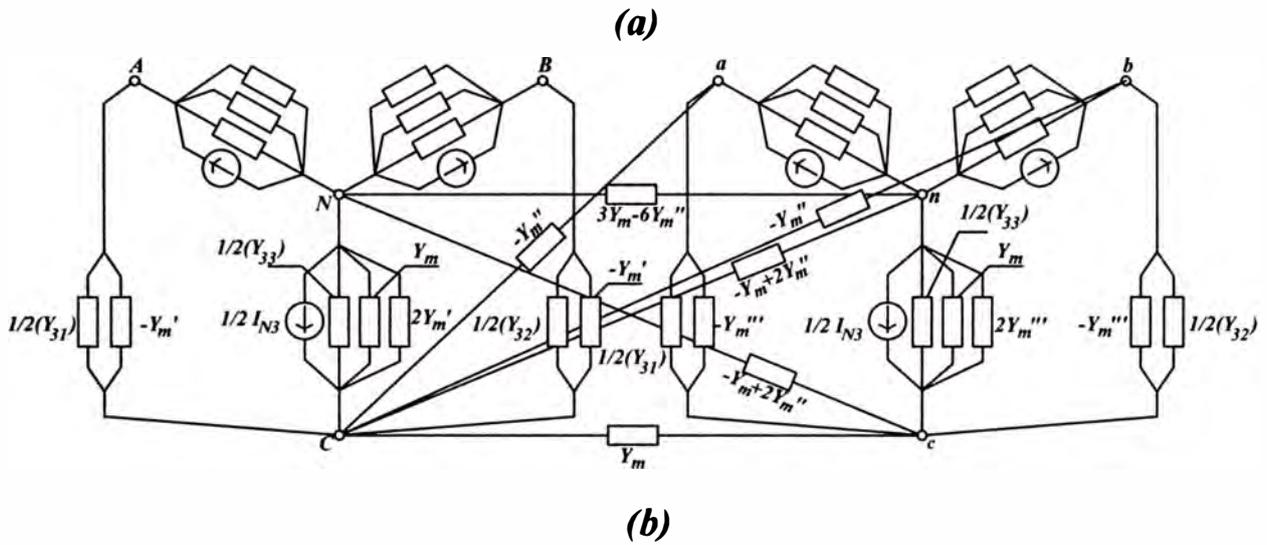


Figura 4.4 Rama magnética k



	A	a	B	b	C	c	N	n
A	$(Y_m + 1/2(Y_{11}) + 1/2(Y_{12}) + 1/2(Y_{13}))$	$-(Y_m)$	$(Y_m)' + 1/2(Y_{12})$	$(Y_m)''$	$(Y_m)' + 1/2(Y_{13})$	$(Y_m)''$	$-(Y_m) - 2(Y_m)'$ $-1/2(Y_{11})$	$(Y_m) - 2(Y_m)''$
a	$-(Y_m)$	$(Y_m) + 1/2(Y_{11}) + 1/2(Y_{12}) + 1/2(Y_{13})$	$(Y_m)''$	$(Y_m)''' + 1/2(Y_{12})$	$(Y_m)''$	$(Y_m)''' + 1/2(Y_{13})$	$(Y_m) - 2(Y_m)''$	$-(Y_m) - 2(Y_m)'''$ $-1/2(Y_{11})$
B	$(Y_m)' + 1/2(Y_{21})$	$(Y_m)''$	$(Y_m) + 1/2(Y_{22}) + 1/2(Y_{21}) + 1/2(Y_{23})$	$-(Y_m)$	$(Y_m)' + 1/2(Y_{23})$	$(Y_m)''$	$+(Y_m) - 2(Y_m)'$ $-1/2(Y_{22})$	$(Y_m) - 2(Y_m)''$
b	$(Y_m)''$	$(Y_m)''' - 1/2(Y_{21})$	$-(Y_m)$	$(Y_m) + 1/2(Y_{22}) + 1/2(Y_{21}) + 1/2(Y_{23})$	$(Y_m)''$	$(Y_m)''' - 1/2(Y_{23})$	$(Y_m) - 2(Y_m)''$	$-(Y_m) - 2(Y_m)'''$ $-1/2(Y_{22})$
C	$(Y_m)' - 1/2(Y_{31})$	$(Y_m)''$	$(Y_m)' - 1/2(Y_{32})$	$(Y_m)''$	$(Y_m) + 1/2(Y_{33}) + 1/2(Y_{31}) + 1/2(Y_{32})$	$-(Y_m)$	$-(Y_m) - 2(Y_m)'$ $-1/2(Y_{33})$	$(Y_m) - 2(Y_m)''$
c	$(Y_m)''$	$(Y_m)''' - 1/2(Y_{31})$	$(Y_m)''$	$(Y_m)''' - 1/2(Y_{32})$	$-(Y_m)$	$(Y_m) + 1/2(Y_{33}) + 1/2(Y_{31}) + 1/2(Y_{32})$	$(Y_m) - 2(Y_m)''$	$-(Y_m) - 2(Y_m)'''$ $-1/2(Y_{33})$
N	$-(Y_m) - 2(Y_m)'$ $-1/2(Y_{11})$	$(Y_m) - 2(Y_m)''$	$-(Y_m) - 2(Y_m)'$ $-1/2(Y_{22})$	$(Y_m) - 2(Y_m)''$	$-(Y_m) - 2(Y_m)'$ $-1/2(Y_{33})$	$(Y_m) - 2(Y_m)''$	$3(Y_m) + 6(Y_m)'$ $+1/2(Y_{11}) + 1/2(Y_{22}) + 1/2(Y_{33})$	$-3(Y_m) + 6(Y_m)''$
n	$(Y_m) - 2(Y_m)''$	$-(Y_m) - 2(Y_m)'''$ $-1/2(Y_{11})$	$(Y_m) - 2(Y_m)''$	$-(Y_m) - 2(Y_m)'''$ $-1/2(Y_{22})$	$(Y_m) - 2(Y_m)''$	$-(Y_m) - 2(Y_m)'''$ $-1/2(Y_{33})$	$-3(Y_m) + 6(Y_m)''$	$3(Y_m) + 6(Y_m)'''$ $+1/2(Y_{11}) + 1/2(Y_{22}) + 1/2(Y_{33})$

Figura 4.5 Representación de Malla de armónicos de un transformador trifásico de múltiples ramas en conexión estrella-estrella
(a) Circuito equivalente de malla
(b) Matriz admitancia

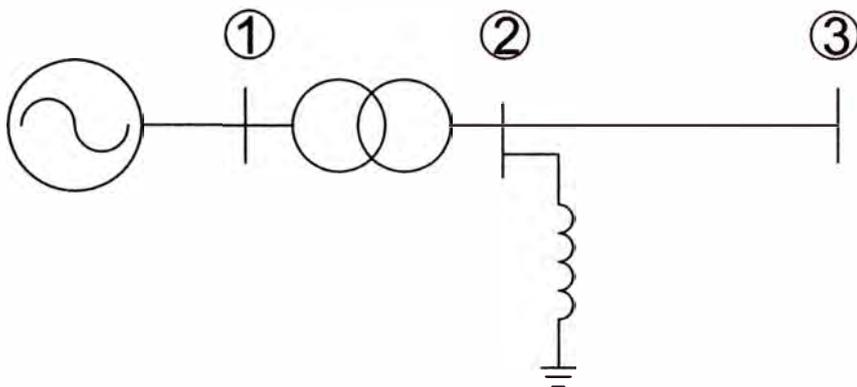


Figura 4.6 Sistema de prueba

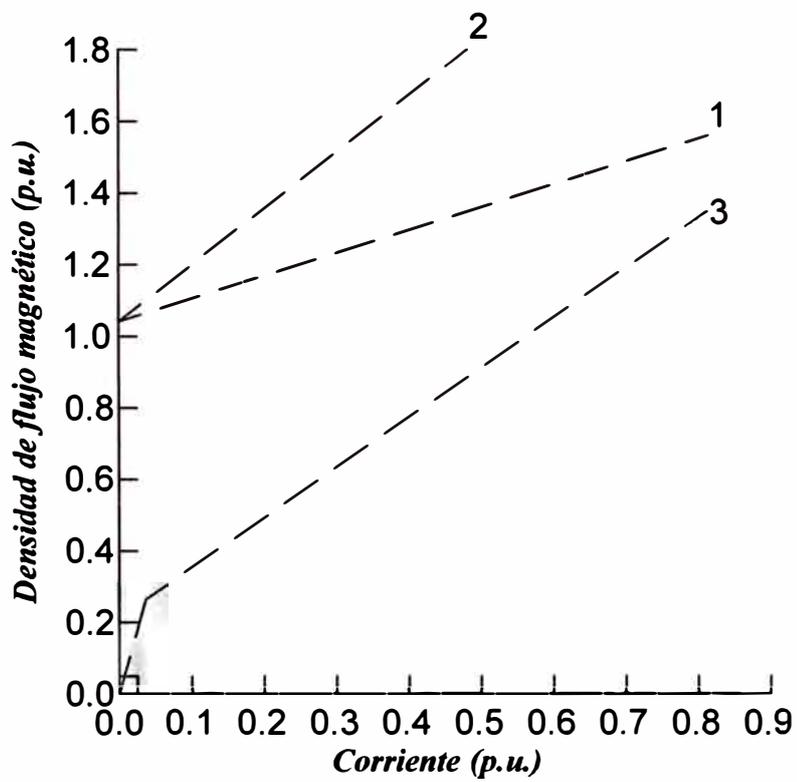
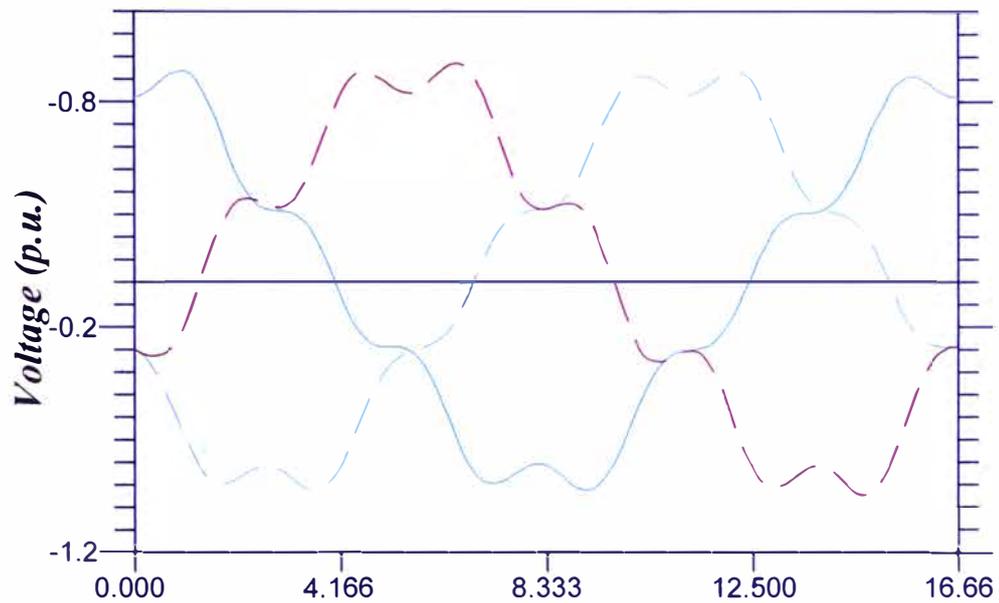


Figura 4.7 Características de magnetización asumidas

Curva 1 - Rama principal

Curva 2 - Rama de yugo

Curva 3 - Rama de dispersión



— FASE A
 - - FASE B
 . . FASE C

TIEMPO (mseg.)
(a)

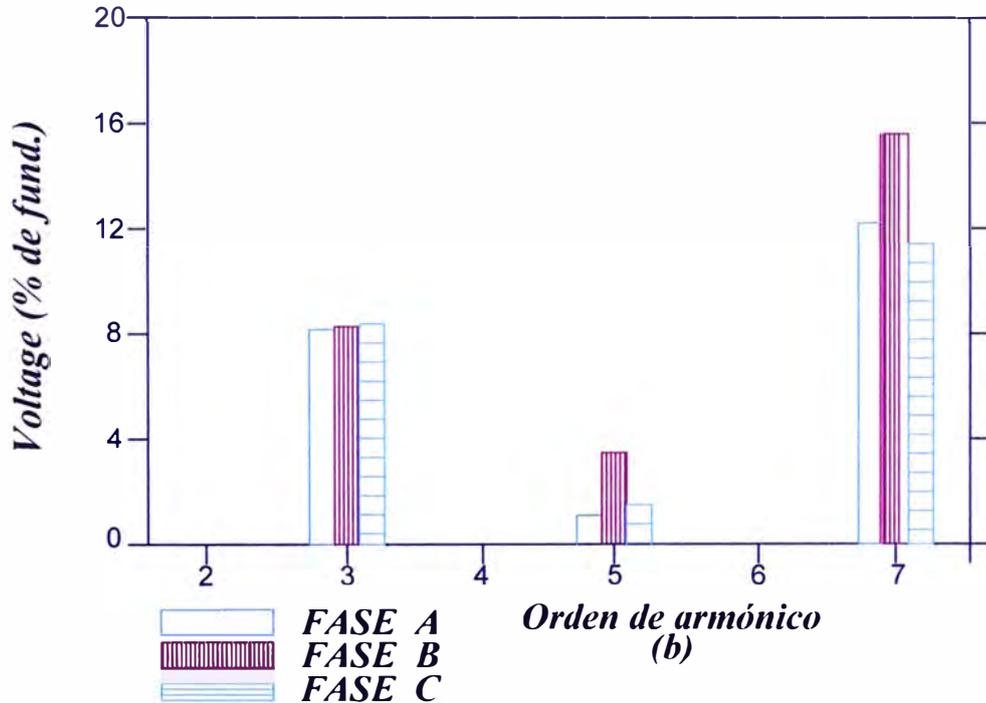


FIGURA 4.8 Forma de onda de tensión (a) y contenido de armónicos (b) en el nodo2 del sistema de prueba con banco de transformadores trifasicos

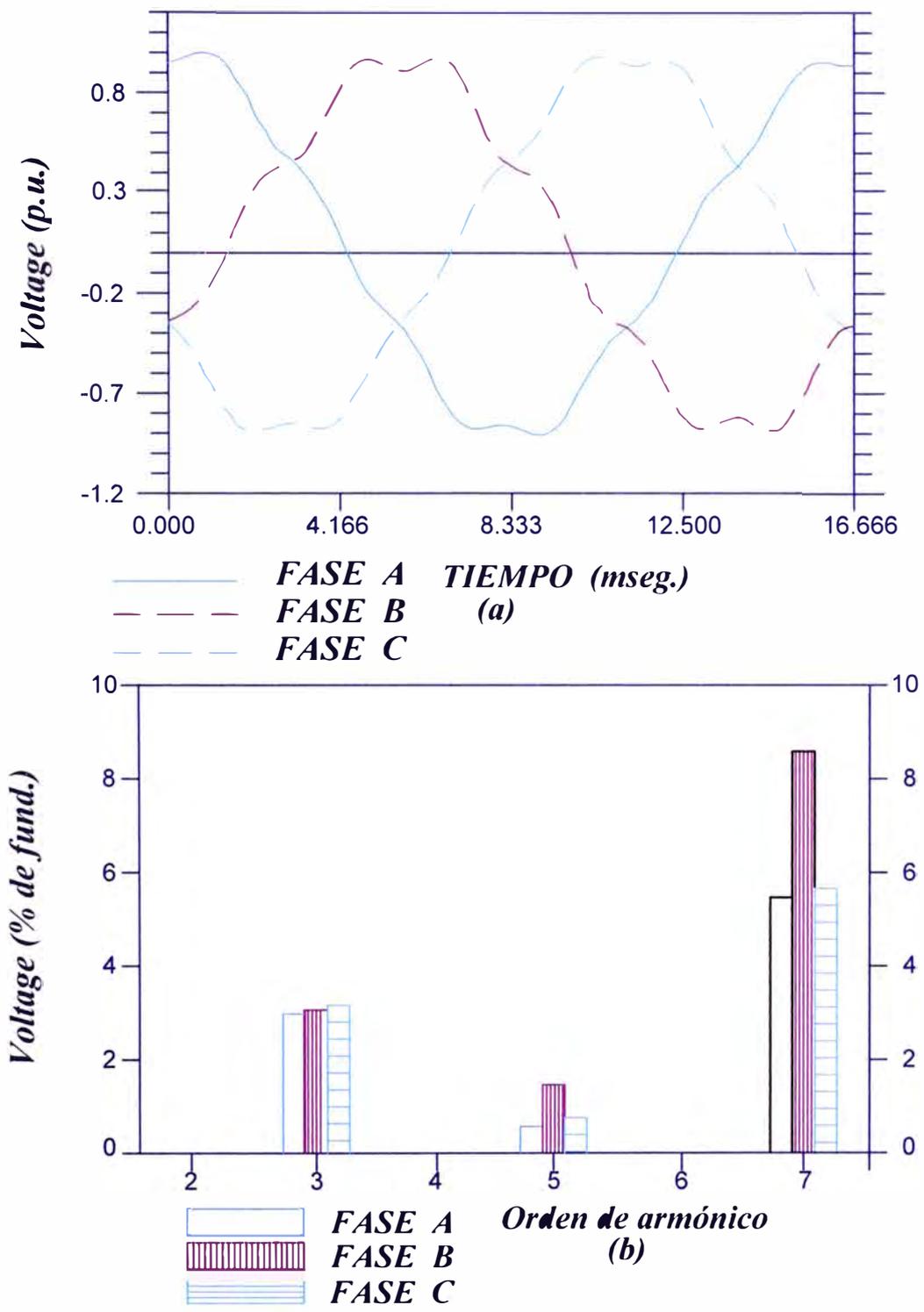


FIGURA 4.9 Forma de onda de tensión (a) y contenido de armónicos (b) en el nodo 2 del sistema de prueba con un transformador trifásico de tres ramas

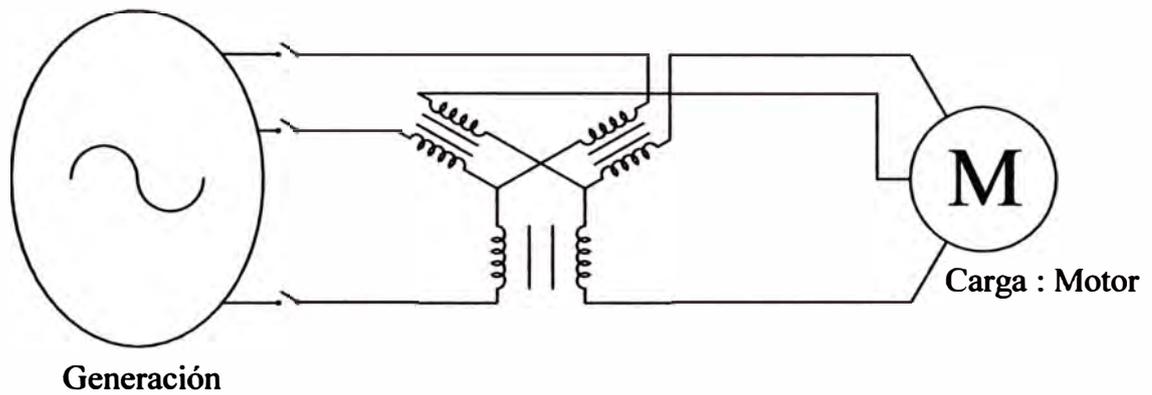


Fig 4.10 Tres transformadores monofásicos individuales conex. Yy

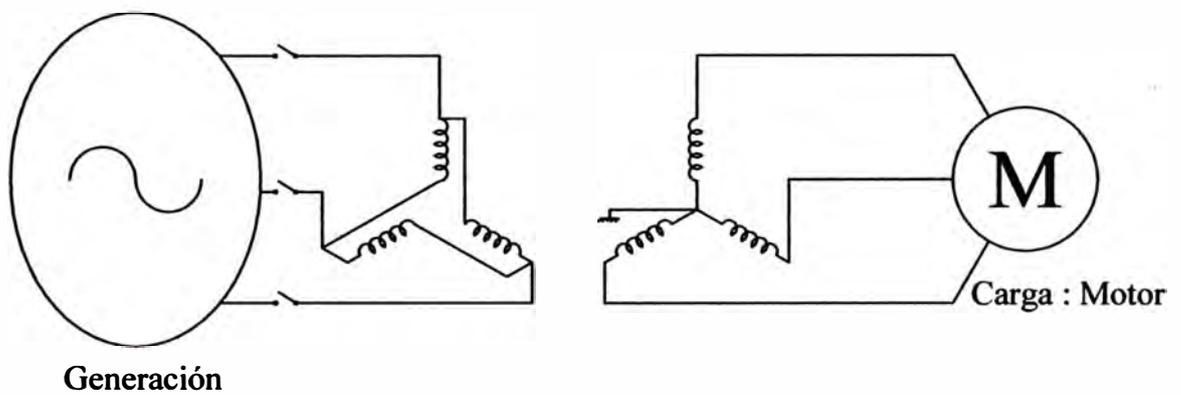


Fig 4.11 Transformador trifásico con un solo núcleo y tres ramas magnéticas
conexión Dy5

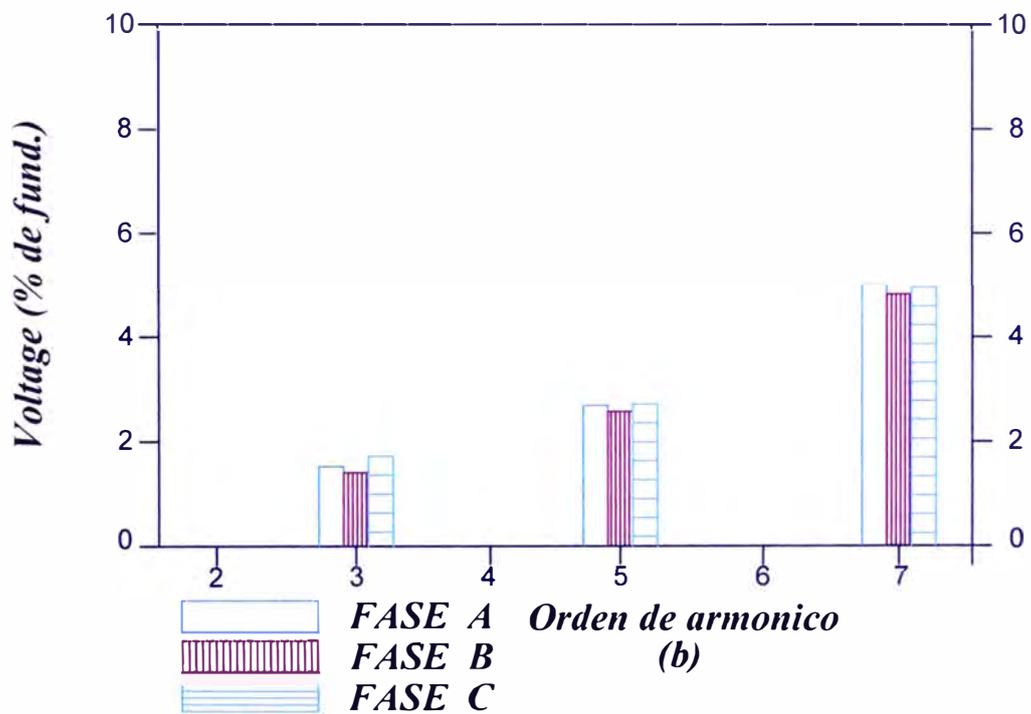
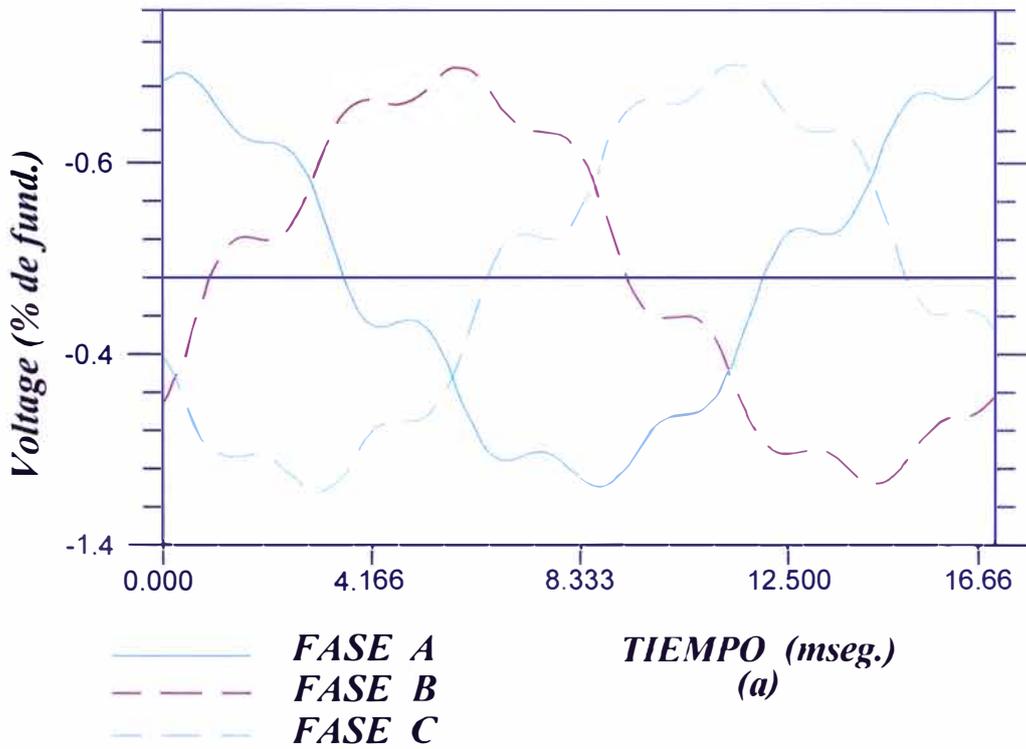


FIGURA 4.12 (a) Forma de onda de tensión y contenido armónico (b) en función del número de armónico representado en forma explícita.

(a),(b) Ocho armónicos

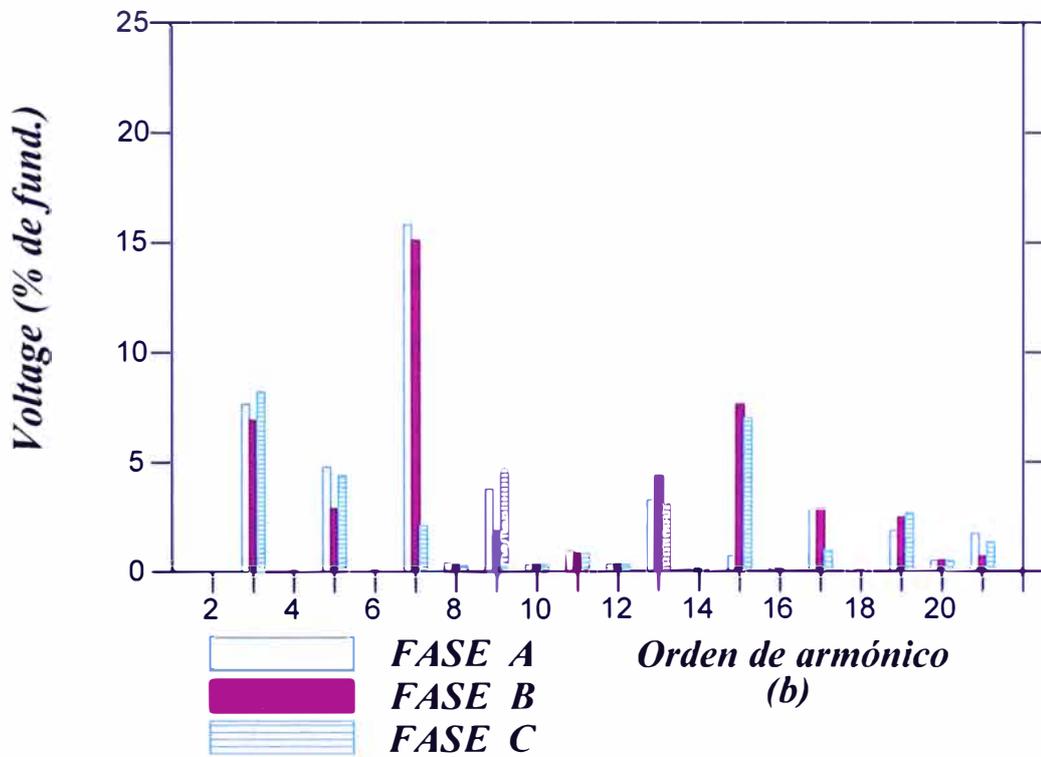
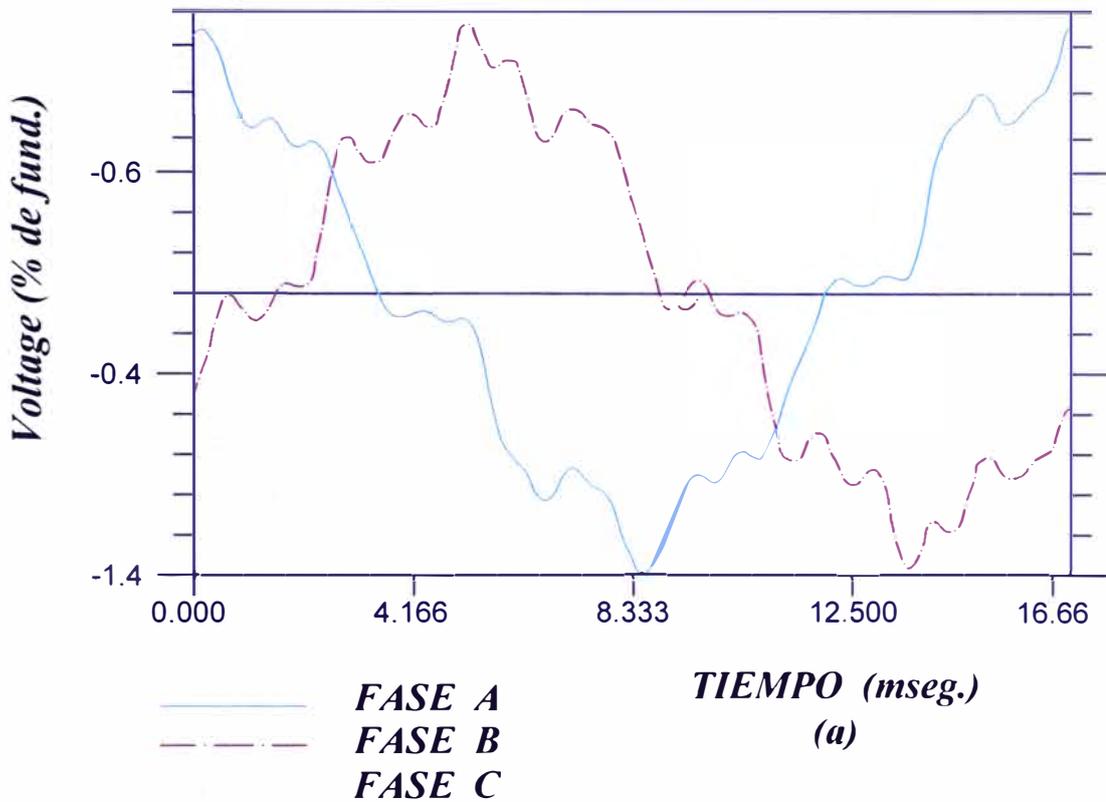


FIGURA 4.13 (a) Forma de onda de tensión y contenido armónico
(b) en función del número de armónico representado en forma explícita.
(a),(b) Veintidos armónicos

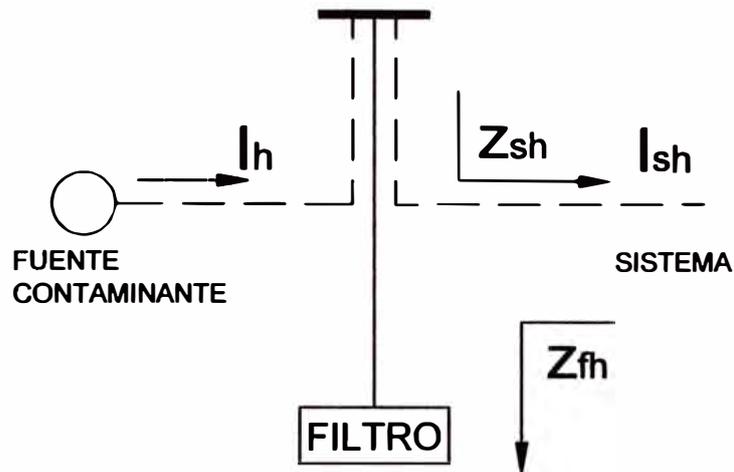
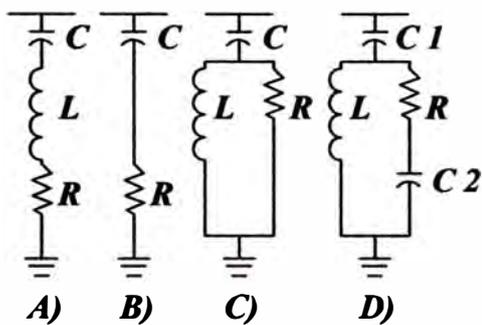


Figura 5.1 Mecanismo de acción de los filtros



- a) Filtro Sintonizado Simple**
- b) Filtro Pasa alto de primer orden**
- c) Filtro Pasa alto de segundo orden**
- d) Filtro Pasa alto de tercer orden**

Figura 5.2 Configuraciones usuales de filtros shunt pasivos.

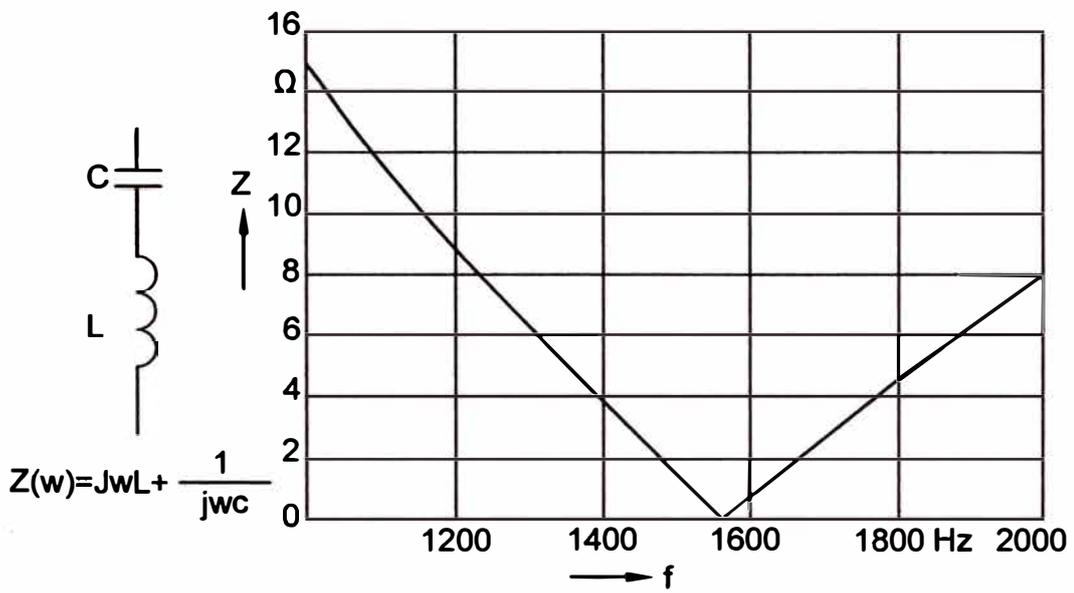


Figura. 5.3 Configuración y comportamiento en frecuencia de un filtro sintonizado simple

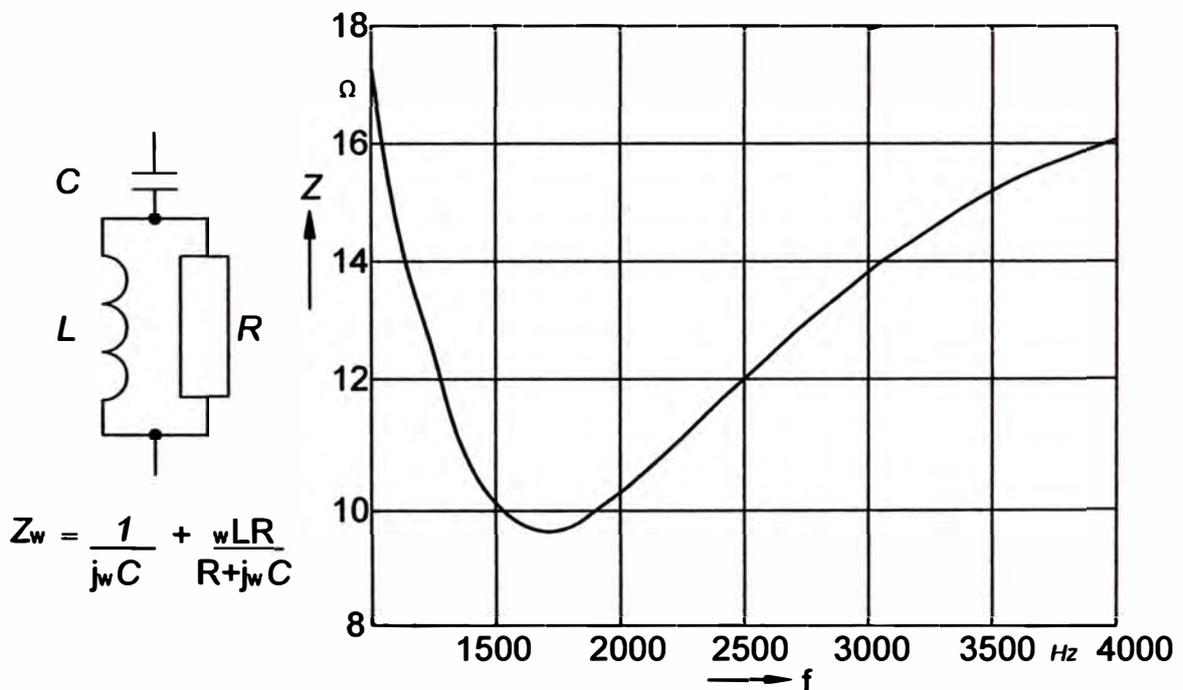


Figura 5.4 Configuración y comportamiento en frecuencia de un filtro Pasa-altos de 2° Orden.

ANEXO B
FOTOGRAFÍAS

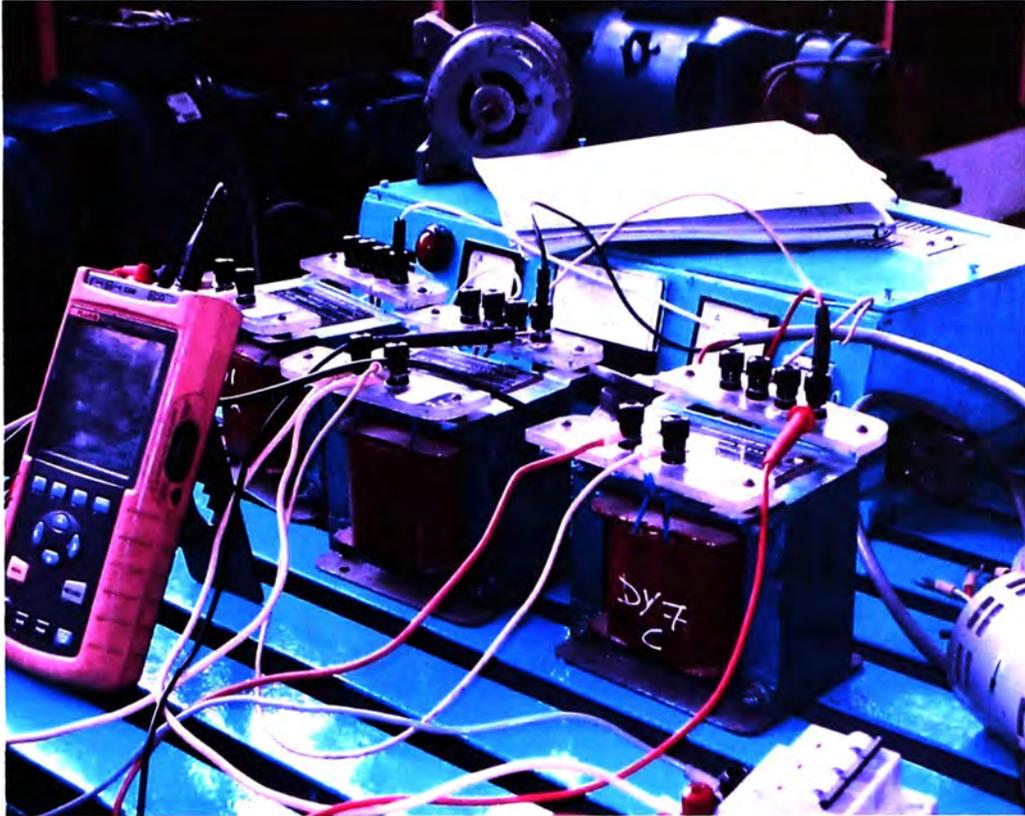


Foto No 1 Tres transformadores monofásicos individuales conex. Yy

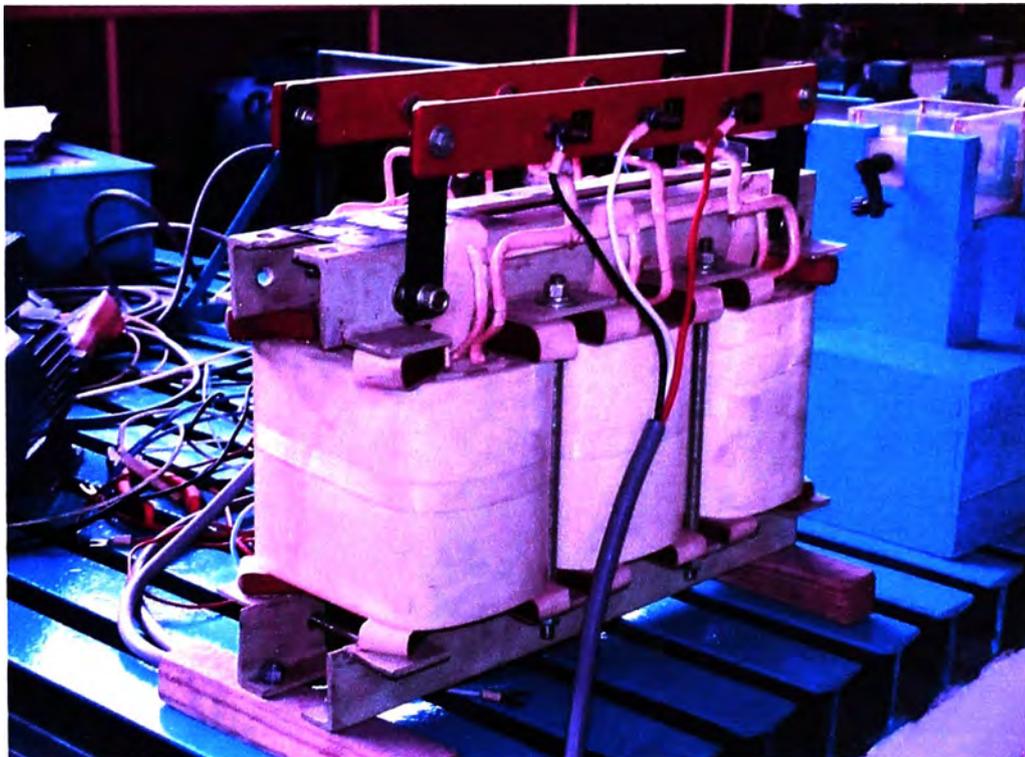


Foto No 2 Transformador Trifásico con un solo núcleo y tres ramas magnéticas conex Dy5

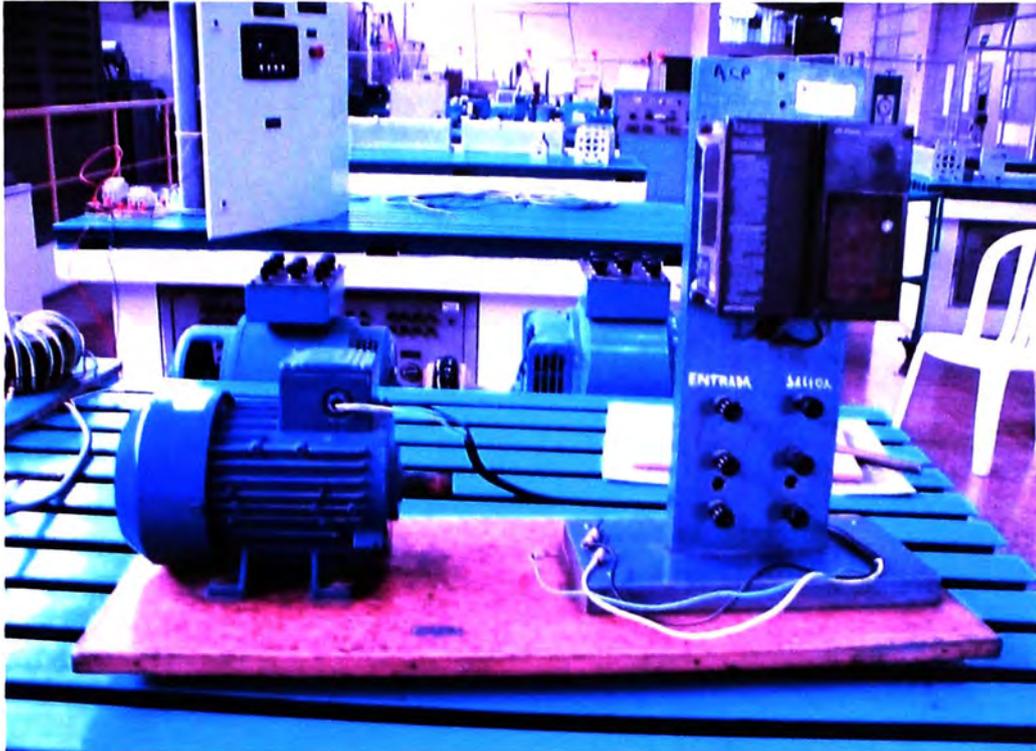


Foto No 3 Motor Trifásico y Variador de velocidad Mitsubishi

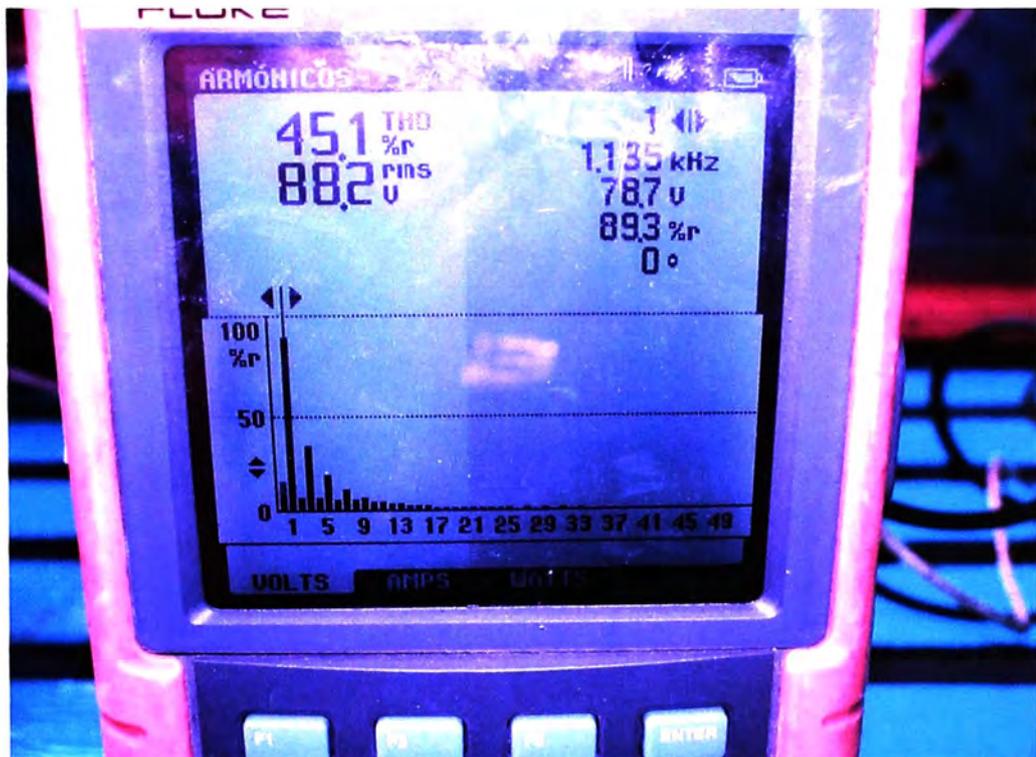


Foto No 4 Armónicos en tensión de línea salida de tres transformadores monofásicos

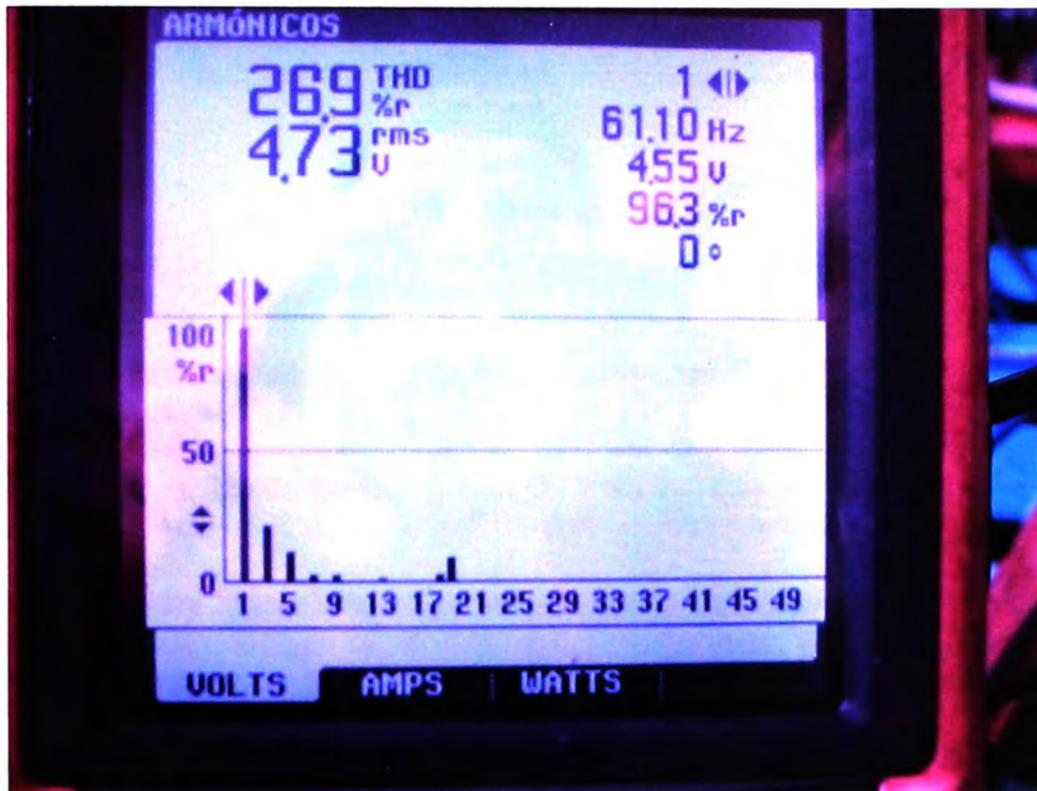


Foto No 5 Armónicos de tensión de línea salida de un transformador trifásico un núcleo y tres ramas magnéticas

BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Arrillaga, L.I Eguíluz “Armónicos en Sistemas de Potencia”, Universidad de Cantabria 1994.
- [2] Jos Arrillaga, Bruce Smith, Neville R Watson, Alan R Wood, “Power System Harmonic Analysis”, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 1997
- [3] Enrique Acha, Manuel Madrigal, “Power System Harmonics Computer Modelling and Analysis”, University of Glasgow, UK, Institute Tecnológico de Morelia, Mexico, 2001.
- [4] Generalized Modelling of Power Transformers in the Harmonic Domain, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol, No3, Julio 1992,
- [5] A. Semley an A. Castro, A Digital Transformer Model for Switching Transient Calculation in Three-Phase Systems, 9th PICA Conf., pp 121-126, June 1975.
- [6] E.P Dick and W. Watson, “Transformer Models.for Transient Studies Based on Field Measurements”, IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 1, pp. 409-419, January 1981.
- [7] H.W. Dommel,”Transformer Models in the Simulation of Electromagnetic Transients”, 5th Power Systems Computation Conference, Paper 3.1/4, Cambridge, England, September 1-5, 1975.
- [8] Lista IPD 411 “Armónicos en sistemas industriales” Universidad Técnica Federico Santa María, Chile enero, 2004.
- [9] Eugenio Téllez Ramírez “DISTORSION ARMÓNICA” Automatización, Productividad y Calidad S.A.