

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



EFFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

JUAN CESAR ATALAYA SÁNCHEZ

**PROMOCIÓN
2000 - I**

**LIMA – PERÚ
2010**

EFFECTOS DE LOS ARMÓNICOS EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

SUMARIO

El uso de cargas no lineales conectadas a sistemas eléctricos de potencia incluye convertidores estáticos de potencia, dispositivos descargadores de arco, dispositivos magnéticos saturados, y en un menor grado, máquinas rotativas. Los convertidores estáticos de potencia son las mayores cargas no lineales y son usados en la industria para una gran variedad de propósitos, tales como fuentes de alimentación electromecánicas, variadores de velocidad, y fuentes de alimentación ininterrumpidas.

Las cargas no lineales cambian la naturaleza de la onda sinusoidal de la corriente de alimentación AC (y consecuentemente la caída de tensión AC), resultando en un flujo de corrientes armónicas en los sistemas de potencia AC que pueden causar diversos tipos de problemas en los equipos y componentes de la red eléctrica.

El presente informe, estudia el comportamiento de los armónicos generados por los variadores de velocidad en redes eléctricas de distribución y mostrar sus efectos en transformadores de distribución. Haciendo uso de programas computacionales para el modelamiento armónico de los componentes de la red eléctrica, se pretende entender y dar solución al fenómeno de distorsión armónica y proponer medidas correctivas a fin de evitar los daños producidos por estos. Dentro de las medidas aplicadas a los transformadores de distribución, fueron consideradas las que optan por la especificación de transformadores especiales tipo factor K y por la reevaluación de la capacidad nominal de transformadores convencionales.

ÍNDICE

PROLOGO	1
CAPÍTULO I	
INTRODUCCIÓN	
1.1 Planteamiento de ingeniería del problema	2
1.2 Objetivo	3
1.3 Alcances	4
1.4 Situación inicial.....	4
CAPÍTULO II	
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	
2.1 Distorsión armónica	7
2.1.1. Características de la distorsión armónica	7
2.1.2. Definición de armónicas.....	8
2.1.3. Cargas lineales y no lineales	10
2.1.4. Medidas de la distorsión en tensión y corriente	10
2.1.5. Potencia fundamental y armónica	12
2.2 Normas asociadas a los niveles de distorsión armónica.....	14
2.2.1. Normalización	14
2.2.2. Límites de distorsión en tensión.....	14
2.2.3. Límites de distorsión en corriente	15
2.2.4. Punto de medición del nivel de armónicas.....	17
2.3 Fuentes que producen las armónicas.....	17
2.3.1. Armónicas Características.....	18
2.4 Efectos de la distorsión armónica.....	18
2.4.1. Impacto en la vida de los equipos	19
2.4.2. Efecto de la distorsión armónica en transformadores	20
CAPÍTULO III	
METODOLOGÍA	
3.1 Análisis de distorsión armónica	22

3.1.1.	Modelos para flujo de armónicos.....	22
3.1.2.	Técnicas para resolución del flujo de carga armónico	33
3.2	Medidas de atenuación de la distorsión armónica en transformadores.....	34
3.2.1.	Pérdidas en transformadores	35
3.2.2.	Medidas correctivas ante la distorsión armónica	38
3.2.3.	Ejemplo práctico	40

CAPÍTULO IV

PROPUESTA DE ANÁLISIS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

4.1	Red eléctrica de estudio.....	43
4.1.1.	Punto de Acoplamiento Común (PAC).....	44
4.1.2.	Redes de distribución primaria.....	44
4.1.3.	Transformadores de potencia y distribución.....	44
4.1.4.	Cargas lineales.....	46
4.1.5.	Cargas no lineales.....	46
4.1.6.	Capacitores shunt	46
4.2	Evaluación de la operación en régimen permanente.....	46
4.2.1.	Resumen de balance de potencia.....	47
4.2.2.	Tensiones en barras y control de reactivos.....	49
4.2.3.	Flujos de potencia y sobrecarga de redes	49
4.3	Evaluación de la distorsión armónica.....	50
4.3.1.	Tensiones armónicas individuales y THD_v	51
4.3.2.	Corrientes armónicas individuales y THD_i en transformadores	53
4.4	Medidas correctivas en transformadores de distribución.....	54
4.4.1.	Cálculo de los factores K y D	54
4.4.2.	Interpretación de los factores K y D	55
	CONCLUSIONES	56
	ANEXOS	58
	BIBLIOGRAFÍA	74

PROLOGO

El propósito de este informe es analizar el fenómeno de distorsión armónica en las redes eléctricas de distribución, interpretando el efecto de la presencia de fuentes de inyección armónicas típicas, como los variadores de velocidad, en los distintos componentes de la red eléctrica. La distorsión armónica es evaluada mediante el estudio de flujo de armónicos, el cual es realizado apoyado en herramientas computacionales para el análisis de redes eléctricas. En presencia de fuentes de inyección armónica, las tensiones y corrientes resultantes del sistema presentan componentes armónicas en menor o mayor grado, esto en función de la distribución de las corrientes armónicas en la red eléctrica.

Con respecto a los transformadores, existe cierto interés en analizar la distorsión armónica en transformadores de distribución desde que estos tienen proximidad con las cargas no lineales. La distorsión armónica produce aumento en las pérdidas eléctricas con el calentamiento de distintos componentes, en consecuencia se produce la pérdida de la vida útil e incluso daño permanente en los componentes de los transformadores de distribución.

Para atenuar los efectos de los armónicos en los transformadores de distribución se proponen dos medidas: *i)* el reemplazo del transformador actual por uno especial llamado transformador de factor K , y *ii)* utilizar el transformador actual considerando la desclasificación del mismo usando el factor D . Ambas medidas comprobadas permiten reducir los efectos de la distorsión armónica en los transformadores de distribución.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La energía eléctrica comúnmente se genera en las grandes centrales utilizando máquinas rotatorias síncronas cuyo campo es excitado con una tensión DC e impulsado mecánicamente por una turbina, produciendo una tensión senoidal trifásica en las terminales de su armadura. Dicha forma de onda es característica del diseño de la máquina y de la disposición de sus devanados. Cuando una tensión senoidal es aplicada a un circuito lineal las corrientes que fluyen en el sistema y caídas de tensión también son senoidales.

Durante los últimos 20 años ha crecido la preocupación debido al hecho de que la forma de onda de corrientes y tensiones en alimentadores y barras se ha distorsionado por la aparición de corrientes armónicas en los sistemas eléctricos de potencia, debido principalmente a la introducción masiva de la electrónica de potencia en las redes industriales, así como a la operación, cada vez más extendida, de grandes hornos de arco usados para fundición de acero, grandes instalaciones de computadoras y equipo electrónico de control.

El presente trabajo es de aplicación al análisis de ingeniería eléctrica específicamente en el tema de análisis de distorsión armónica de redes eléctricas, tema que hoy en día es de gran importancia para las empresas del sector eléctrico y compañías consultoras a escala mundial.

1.1 Planteamiento de ingeniería del problema

Las armónicas son corrientes y/o tensiones presentes en un sistema eléctrico, con una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. Así, en sistemas con frecuencia de 60 Hz y cargas monofásicas, las armónicas características son la tercera (180 Hz), quinta (300 Hz), y séptima (420 Hz) por ejemplo. Con el creciente aumento en el uso de cargas no lineales (procedentes de la electrónica de potencia), se han empezado a tener algunos problemas en las instalaciones eléctricas debido a los efectos de las componentes

armónicas de corrientes y tensiones en el sistema eléctrico, que no se contemplaban anteriormente. Entre estos están el sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, corrientes excesivas en el neutro, fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito (si se cuentan con bancos de capacitores para corrección del factor de potencia) y en general la calidad en el suministro de energía eléctrica se ha ido deteriorando por la distorsión presente en las tensiones y corrientes.

Esta situación puede llegar a causar un funcionamiento incorrecto de muchos equipos (especialmente los menos robustos) que han sido diseñados para operar bajo condiciones normales (poca distorsión armónica). Además, se presenta un incremento en los costos de operación como resultado de algunos factores ligados a la generación de armónicas. Estos problemas han sido ampliamente analizados en la literatura, se han desarrollado equipos de medición sofisticados que permiten realizar estudios acerca de éstos y además se cuenta con prácticas recomendadas para tener cierto grado de control sobre los mismos.

En los transformadores la principal consecuencia de las corrientes armónicas es un aumento de las pérdidas, principalmente en los arrollamientos, debido a la deformación de los campos de dispersión. El aumento de las pérdidas hace que se genere más calor en el transformador, de modo que la temperatura de funcionamiento aumenta, lo que provoca el deterioro del aislamiento y una potencial reducción de su vida útil.

El presente informe estudia el comportamiento de los armónicos generados por los variadores de velocidad y mostrar sus efectos en transformadores de distribución. Con el uso de programas computacionales para el modelamiento armónico de los componentes de la red eléctrica, se pretende entender y dar solución al fenómeno de distorsión armónica y proponer medidas correctivas a fin de evitarlo o minimizar su impacto en los transformadores de distribución.

1.2 Objetivo

El presente informe estudia el efecto de los armónicos en transformadores de distribución considerando los siguientes objetivos para ello:

- a. Realizar la revisión bibliográfica y el marco teórico conceptual del fenómeno de distorsión armónica resaltando los efectos de los armónicos en transformadores de distribución.
- b. Estudiar el comportamiento de los armónicos generados por los variadores de velocidad en las redes eléctricas de distribución. Para estos se presentará la metodología para la verificar la distorsión armónica presente en los transformadores

de distribución, la cual esta basada en el estudio de flujo de armónicos. Este estudio permitirá obtener el estado de las tensiones y corrientes armónicas en todos los componentes de una red eléctrica de estudio.

- c. Evaluar la distorsión armónica en transformadores de distribución usando indicadores mostrados en la literatura, como el THD de corrientes, entre otros. También se analizará el efecto de ubicación de los transformadores con respecto a su proximidad con las fuentes de armónicas. Para esto se analizará la distorsión armónica de conjunto de transformadores de distribución disperso en la red eléctrica de estudio.
- d. Proponer medidas para la reducción del efecto de los armónicos en los transformadores de distribución. En este caso se considerarán medidas como la especificación de transformadores especiales tipo factor K y la reevaluación de la capacidad nominal de transformadores convencionales usando el factor D .

1.3 Alcances

El presente informe se detalla el procedimiento de evaluación de armónicos mediante una plataforma de simulación la cual consiste en un programa computacional que soporta el análisis de flujo de armónico. Para esto se usa el software de simulación de redes eléctricas NEPLAN versión 5.2.4., en consecuencia se realiza la descripción de los modelos de los componentes, algoritmos usados y el análisis de los resultados. La evaluación de la distorsión armónica y las medidas para reducción del efecto de los armónicos cumplen con los estándares IEEE, permitiendo el mejor soporte de análisis para los objetivos trazados en este informe.

1.4 Situación inicial

La mayoría de los transformadores están diseñados para operar con corriente alterna a una frecuencia fundamental (50 ó 60 Hz), lo que implica que operando en condiciones de carga nominal y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador debe ser capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni deteriorar su vida útil.

Las pérdidas en los transformadores consisten en pérdidas sin carga o de núcleo y pérdidas con carga, que incluyen las pérdidas en el cobre, pérdidas por corrientes de eddy y pérdidas adicionales en el tanque, sujetadores, u otras partes de hierro.

El aumento de las pérdidas debido la distorsión armónica hace que se genere más calor en el transformador. En consecuencia, es preciso reducir la carga máxima del

transformador, práctica que se conoce como desclasificación, o poner un especial cuidado en el diseño del transformador a fin de reducir aquellas pérdidas.

Para evaluar la desclasificación del transformador, puede utilizarse el factor D de la carga. Este factor se calcula de acuerdo con el espectro armónico de la corriente de carga y es un indicativo de las pérdidas adicionales en la carga por corrientes parásitas. Refleja el exceso de pérdidas experimentado en el bobinado de un transformador tradicional.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

Durante los últimos 20 años ha crecido la preocupación debido al hecho de que la forma de onda de corrientes y tensiones en alimentadores y barras se ha distorsionado por la aparición de corrientes armónicas en los sistemas eléctricos de potencia, debido principalmente a la introducción masiva de la electrónica de potencia en las redes industriales, así como a la operación, cada vez más extendida, de grandes hornos de arco usados para fundición de acero, grandes instalaciones de computadoras y equipo electrónico de control [1].

Se han empezado a tener algunos problemas en las instalaciones eléctricas debido a los efectos de las componentes armónicas de corrientes y tensiones en el sistema eléctrico, que no se contemplaban anteriormente. Entre estos están el sobrecalentamiento de cables, transformadores y motores, corrientes excesivas en el neutro, fenómenos de resonancia entre los elementos del circuito [2] (si se cuentan con bancos de capacitores para corrección del factor de potencia) y en general la calidad en el suministro de energía eléctrica se ha ido deteriorando [3] por la distorsión presente en las tensiones y corrientes.

Esta situación puede llegar a causar un funcionamiento incorrecto de muchos equipos (especialmente los menos robustos) que han sido diseñados para operar bajo condiciones normales (poca distorsión armónica). Además, se presenta un incremento en los costos de operación como resultado de algunos factores ligados a la generación de armónicas. Estos problemas han sido ampliamente analizados en la literatura [4] y artículos, se han desarrollado equipos de medición sofisticados que permiten realizar estudios acerca de éstos y además se cuenta con prácticas recomendadas [5] para tener cierto grado de control sobre los mismos.

En este capítulo se desarrolla el marco teórico conceptual sobre el tema de distorsión armónica, la normativa para el control de la distorsión armónica y las fuentes que provocan las armónicas así como los efectos de las armónicas en la operación de los

transformadores.

2.1 Distorsión armónica

Cuando la tensión o la corriente de un sistema eléctrico tienen deformaciones con respecto a la forma de onda senoidal, se dice que la señal está distorsionada. La distorsión armónica puede presentarse debido a los siguientes aspectos:

- ◆ Fenómenos transitorios: arranque de motores, conmutación de capacitores, efectos de tormentas o fallas por cortocircuito entre otras. En la Fig. 2.1 se observa el efecto en el voltaje debido a la conmutación de capacitores.

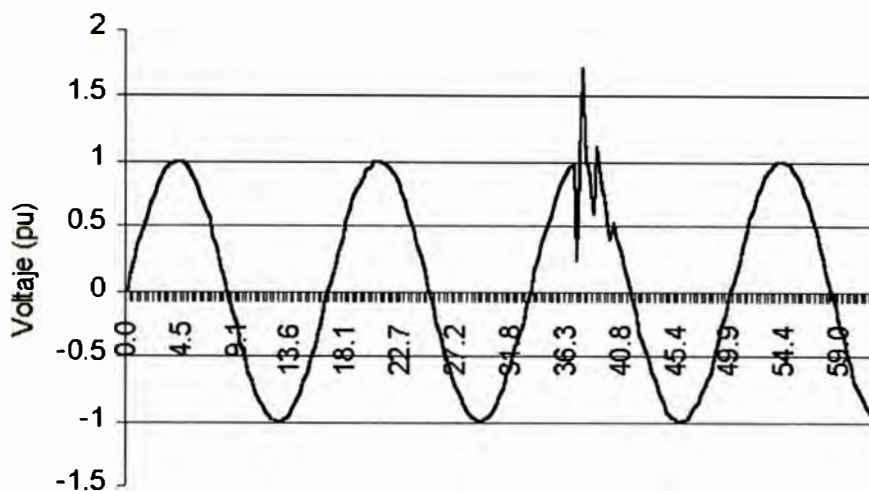


Fig. 2.1 Efecto en el voltaje debido a la conmutación de capacitores

- ◆ Condiciones permanentes: Están relacionadas con armónicas de estado estable. En las redes eléctricas es común encontrar que las señales tendrán una cierta distorsión que cuando es baja, no ocasiona problemas en la operación de equipos y dispositivos. Existen normas que establecen los límites permisibles de distorsión, dependiendo de la tensión de operación y de su influencia en el sistema. En la Fig. 2.2 se observa la forma de onda de corriente en un variador de velocidad AC observado a través una salida grafica de un medidor de energía típico.

2.1.1. Características de la distorsión armónica

Cuando la onda de corriente o de tensión medida en cualquier punto de un sistema eléctrico se encuentra distorsionada, con relación a la onda sinusoidal que idealmente deberíamos encontrar, se dice que se trata de una onda contaminada con componentes armónicas.

Para que se considere como distorsión armónica las deformaciones en una señal, se

deben de cumplir las siguientes condiciones:

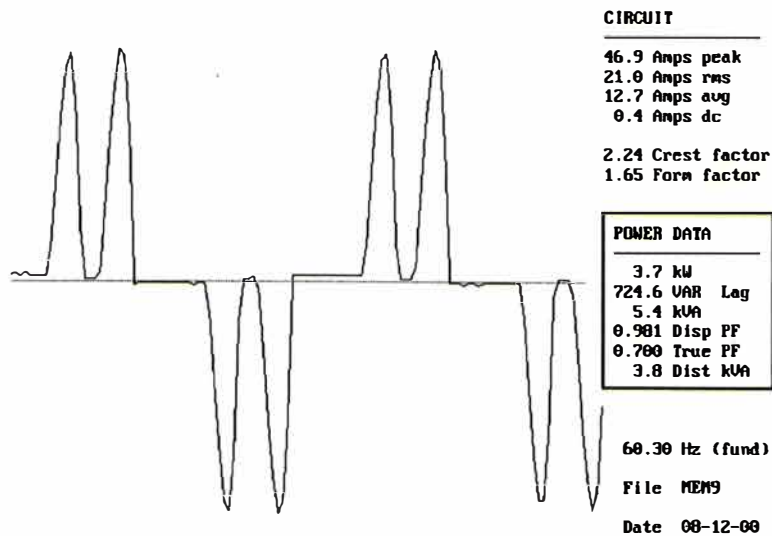


Fig. 2.2 Forma de onda de corriente en un variador de velocidad AC

- ◆ Que la señal tenga valores definidos dentro del intervalo, lo que implica que la energía contenida es finita
- ◆ Que la señal sea periódica, teniendo la misma forma de onda en cada ciclo de la señal de corriente o tensión.
- ◆ Permanente.- Cuando la distorsión armónica se presenta en cualquier instante de tiempo, es decir, que no es pasajera.

2.1.2. Definición de armónicas

Este concepto proviene del teorema de Fourier y define que, bajo ciertas condiciones analíticas, una función periódica cualquiera puede considerarse integrada por una suma de funciones senoidales, incluyendo un término constante en caso de asimetría respecto al eje de las abscisas, siendo la primera armónica, denominada también señal fundamental, del mismo período y frecuencia que la función original y el resto serán funciones senoidales cuyas frecuencias son múltiplos de la fundamental. Estas componentes son denominadas armónicas de la función periódica original.

Las armónicas son corrientes y/o tensiones presentes en un sistema eléctrico, con una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental. Así, en sistemas con frecuencia de 60 Hz y cargas monofásicas, las armónicas características son la tercera (180 Hz), quinta (300 Hz), y séptima (420 Hz) por ejemplo.

En la Fig. 2.3 se muestra un ejemplo de forma de onda la puede ser descompuesta en las componentes armónicas 1^a, 5^a, 7^a, 11^a.

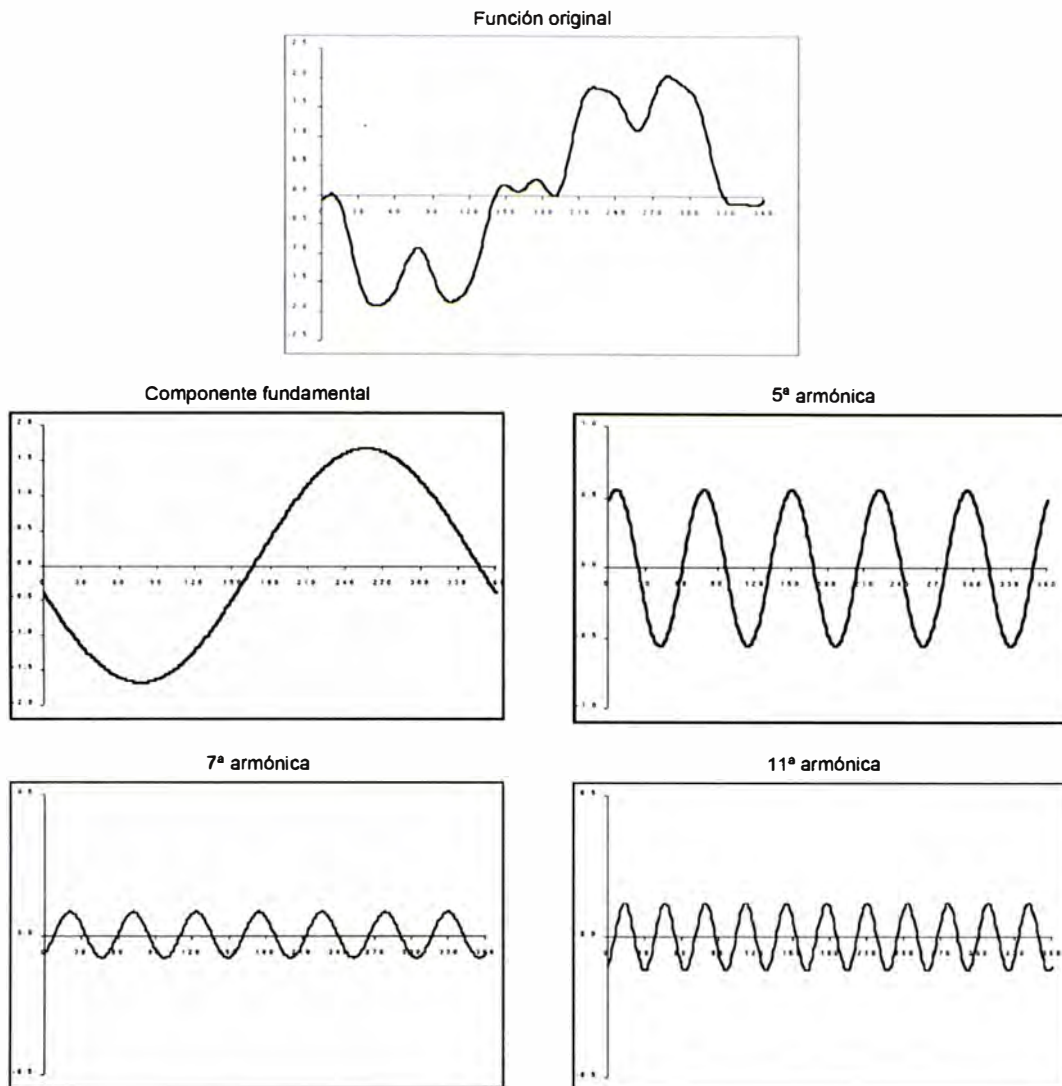


Fig. 2.3 Forma de onda original y sus componentes armónicos: 1ª ,5ª ,7ª ,11ª

Las ondas simétricas contienen únicamente armónicas impares, mientras que para ondas asimétricas existirán tanto armónicas pares como impares. En circuitos eléctricos es típico encontrar formas de onda simétricas, así en teoría las armónicas pares de tensión y corriente desaparecen.

Dependiendo de su secuencia y rotación, las armónicas presentan diferentes efectos:

- ◆ Secuencia (+): Rotación Directa, puede producir calentamiento de conductores, rotura de circuitos, etc.
- ◆ Secuencia (-): Rotación Inversa, produce un freno en el motor, además calentamiento de conductores y por ende problemas en el motor.
- ◆ Secuencia (0): No tiene sentido de rotación, pero puede causar calentamiento. La secuencia de armónicas cero (múltiplos de la 3ª armónica) son llamados "Triplens".

Cuando se hacen mediciones de las ondas de corriente o tensión utilizando analizadores de armónicas, el equipo efectúa integraciones mediante la técnica de la transformada rápida de Fourier, dando como resultado la serie de coeficientes A_h que expresadas con relación a la amplitud A_1 de la fundamental, constituye el espectro de corrientes armónicas relativo a la onda medida. En la Fig. 2.4 son mostradas todas las componentes armónicas relativas a la fundamental de la señal de la Fig. 2.3.

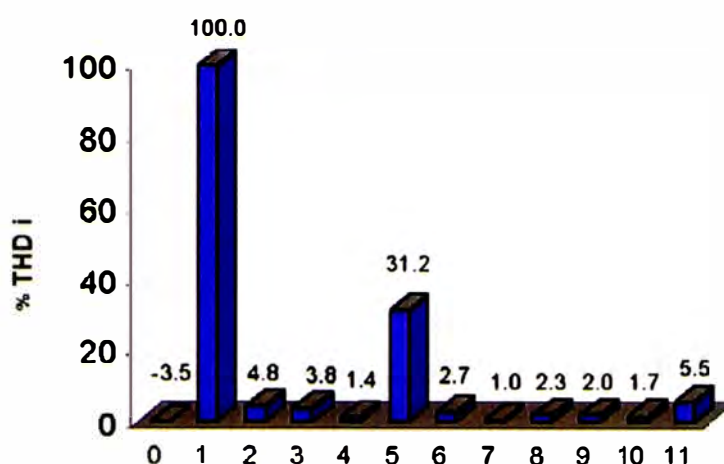


Fig. 2.4 Componentes armónicas relativas a la onda fundamental de la señal mostrada en la Fig. 2.3

2.1.3. Cargas lineales y no lineales

Cuando se aplica una tensión senoidal directamente a cargas tales como resistencias, inductancias, capacitores o una combinación de ellos, se produce una corriente proporcional que también es senoidal, por lo que se les denominan cargas lineales. En los circuitos en los que su curva corriente \times tensión no es lineal, la tensión aplicada no es proporcional a la corriente, resultando una señal distorsionada con respecto a la senoidal.

La curva característica corriente \times tensión de la carga define si es o no lineal su comportamiento y no se debe pensar que todos los equipos que tienen semiconductores por definición son no lineales. Existen aplicaciones donde se emplean SCR's conectados en antiparalelo con control de cruce por cero en los que prácticamente no existe distorsión, considerándose lineales y por otro lado una resistencia con control de fase es una carga no lineal.

La distorsión armónica en los sistemas eléctricos es provocada por las cargas no lineales, contaminando la red y pudiendo afectar incluso a otros usuarios que únicamente posean cargas lineales.

2.1.4. Medidas de la distorsión en tensión y corriente

Para cuantificar la distorsión existente en una señal, es preciso definir parámetros que determinen su magnitud y contar con equipos de medición adecuados. A continuación se presentan las expresiones necesarias para efectuar los cálculos relacionados con la distorsión armónica.

Valor eficaz (rms)

Cuando se suman señales de tensión o corriente de diferentes frecuencias para obtener su resultante.

$$\text{Corriente eficaz (rms): } I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (2.1)$$

$$\text{Tensión eficaz (rms): } V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (2.2)$$

Cofactor de distorsión (Cd)

Es la relación entre el contenido armónico de la señal y su valor eficaz (rms). Su valor se ubica entre 0% y 100%. También este es el índice más ampliamente usado en Europa.

Con una distorsión baja, Cd cambia notoriamente, por eso se recomienda su uso cuando se desea conocer el contenido armónico de una señal.

$$\text{Cd: cofactor de distorsión } Cd = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_{rms}} \times 100\% \quad (2.3)$$

Distorsión armónica total (THD¹)

Es la relación entre el contenido armónico de la señal y la primera armónica o fundamental. Su valor se ubica entre 0% e infinito. Este es el parámetro de medición de distorsión más conocido, por lo que es recomendable para medir la distorsión en parámetros individuales (I y V). Al igual que el Cd es útil cuando se trabaja con equipos que deben responder sólo a la señal fundamental, como en el caso de algunos relés de protección.

$$\text{THD: Distorsión armónica total } THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.4)$$

Distorsión de demanda total (TDD²)

¹ THD viene de las siglas en inglés: *total harmonic distortion*.

² TDD viene de las siglas en inglés: *total demand distortion*.

Es la relación entre la corriente armónica y la demanda máxima de la corriente de carga. Cuando se efectúan mediciones relacionadas con armónicas en los sistemas eléctricos, es común encontrar niveles de THD altos en condiciones de baja carga que no afectan la operación de los equipos ya que la energía distorsionante que fluye es también baja. Para evaluar adecuadamente estas condiciones se define el TDD que es el parámetro de referencia que establece los límites aceptables de distorsión en corriente en la norma IEEE 519-1992 “Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia” [5].

$$\text{TDD: Distorsión de demanda total} \quad TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\% , \quad (2.5)$$

donde:

I_h : Magnitud de la armónica individual.

h : Orden armónico.

I_L : Demanda máxima de la corriente fundamental de carga, que se calcula como el promedio máximo mensual de demanda de corriente de los 12 últimos meses o puede estimarse.

2.1.5. Potencia fundamental y armónica

Para definir la relación de potencias en sistemas eléctricos se utiliza ampliamente la relación:

$$S = P + jQ , \quad (2.6)$$

donde:

P : Potencia activa.

Q : Potencia reactiva.

S : Potencia aparente.

Su representación fasorial es el triángulo de potencias y muestra que P se ubica en el eje real, mientras Q esta en el imaginario, estando ambos en cuadratura y S es la resultante. En la Fig. 2.5 se muestra el triangulo de potencias.

Utilizando las potencias medidas, los suministradores de electricidad calculan el factor de potencia para efectos de facturación. Estos conceptos son válidos mientras el sistema sea lineal, es decir no exista distorsión armónica. Las cargas no lineales son las que generan la distorsión armónica en corriente, que al fluir por el cableado y el transformador de distribución, producen la distorsión en tensión.

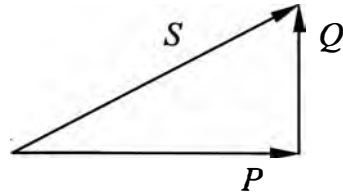


Fig. 2.5 Triángulo de potencias

Para aquellos sistemas en los que la distorsión en tensión es nula o mínima y existe distorsión armónica en corriente, se utiliza la pirámide de potencias para considerar tanto los valores fundamentales como los armónicos. En la Fig. 2.6 se muestra la pirámide de potencias.

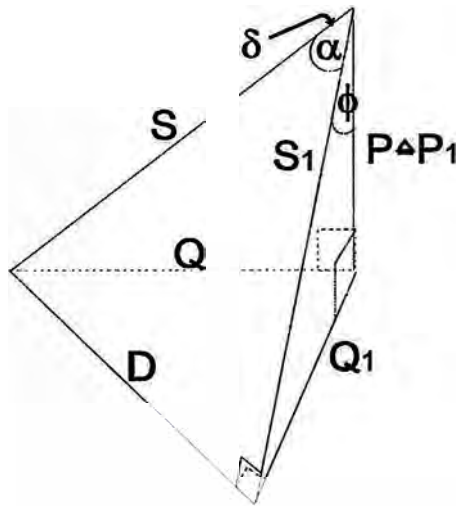


Fig. 2.6 Pirámide de potencias

Las siguientes expresiones son válidas cuando la tensión es senoidal y la corriente está distorsionada:

$$\text{Potencia aparente} \quad S = V I_{rms} = V \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}, \quad (2.7)$$

$$\text{Potencia eficaz} \quad P = P_1 = V I_1 \cos \phi_1, \quad (2.8)$$

$$\text{Potencia reactiva} \quad Q = \sqrt{S^2 - P^2}, \quad (2.9)$$

$$\text{Potencia reactiva fundamental} \quad Q_1 = V I_1 \sin \phi_1, \quad (2.10)$$

$$\text{Potencia distorsionante} \quad D = V \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}, \quad (2.11)$$

$$\text{Factor de potencia fundamental} \quad FP_1 = P / S_1 = \cos \phi_1, \quad (2.12)$$

$$\text{Factor de potencia} \quad FP = P / S = \cos \phi, \quad (2.13)$$

2.2 Normas asociadas a los niveles de distorsión armónica

2.2.1. Normalización

Para asegurar la integridad en el sistema de potencia global, es preciso establecer límites sobre los niveles de distorsión permisibles que apliquen tanto a los usuarios como a los suministradores de la energía.

Resulta especialmente delicada la relación usuario / compañía suministradora, ya que esta última tiene derecho a pedir al usuario que limite la contaminación al sistema de distribución y el usuario tiene el derecho a pedir el suministro de una energía con la menor contaminación posible.

Internacionalmente la norma técnica IEEE 519-1992 “Prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicas en sistemas eléctricos de potencia” [5] define entre sus puntos los valores máximos de distorsión permisible. Esta normativa está diseñada para limitar las corrientes armónicas de cada usuario en lo individual de forma que los niveles armónicos en tensión en la totalidad del sistema de potencia sean aceptables, siendo su cumplimiento una responsabilidad compartida entre suministrador y usuarios.

Las características principales del suministrador y usuario asociadas a la responsabilidad de la distorsión armónica son descritas a continuación:

- ◆ **Suministrador.** Es su responsabilidad que en la acometida, la distorsión armónica total en tensión THD_V se encuentre dentro de los límites establecidos, por lo que debe asegurarse que condiciones de resonancia en el sistema de generación, transmisión o distribución no ocasionen niveles inaceptables de distorsión en tensión, aun si los usuarios se encuentran dentro de los límites de generación armónica en corriente.
- ◆ **Usuarios.** Deben de asegurar que en la acometida, la generación de armónicas en corriente se ubique dentro de los límites establecidos, tanto para componentes armónicas individuales como para la Distorsión de Demanda Total TDD, especificándose dichos límites como porcentaje de la demanda promedio de corriente del usuario en lugar de la corriente fundamental instantánea, con el fin de proporcionar una base común de evaluación a lo largo del tiempo.

2.2.2. Límites de distorsión en tensión

El suministrador es responsable de mantener la calidad de la tensión en el sistema global, especificándose los límites para diferentes niveles de tensión. Es importante notar

que la definición de la distorsión armónica total THD que se utiliza es diferente a la convencional ya que se expresa la distorsión en función a la tensión nominal, que es un valor constante para cada usuario, estableciéndose así, una base fija de evaluación a lo largo del tiempo.

En la Tabla N° 2.1 se muestran los límites de distorsión armónica en tensión en % de la tensión nominal según estándar IEEE 519-1992 [5].

Tabla N° 2.1 Límites de distorsión armónica en tensión en % de la tensión nominal según estándar IEEE 519-1992 [5]

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

Con respecto al THD de la tensión, este es calculado de la siguiente forma:

$$THD_{V_n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \times 100\%, \quad (2.14)$$

donde:

V_h : Magnitud de la componente armónica individual.

h : Orden armónico.

V_n : Tensión nominal fundamental del sistema.

2.2.3. Límites de distorsión en corriente

Las corrientes armónicas para cada usuario son evaluadas en la acometida y los límites se establecen en base a la relación entre la corriente de cortocircuito y la demanda máxima de corriente de la carga del usuario.

En la Tabla N° 2.2 se muestran los límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida según estándar IEEE 519-1992 [5].

Algunas consideraciones deben ser tomadas para la verificación de la distorsión armónica de la Tabla N° 2.2, entre ellas se tiene:

- ◆ Para las armónicas pares, los límites son el 25% de los valores especificados en la Tabla N° 2.2.
- ◆ No se permite la existencia de componentes de corriente directa, que corresponden a la armónica cero.

Tabla N° 2.2 Límites de la distorsión armónica en corriente en la acometida según estándar IEEE 519-1992 [5]

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

* Todos los equipos de generación de energía están limitados a estos valores de corriente, sin importar la relación I_{cc}/I_L .

- ◆ Si las cargas que producen las armónicas utilizan convertidores con número de pulsos q mayor a 6, los límites indicados en la tabla se incrementan por el siguiente factor $\sqrt{q/6}$.
- ◆ I_{cc} : Debe utilizarse aquella que bajo condiciones normales de operación, resulte en la mínima corriente de cortocircuito en la acometida, ya que este valor reduce la relación I_{cc}/I_L y la evaluación es mas severa.
- ◆ I_L : Es la demanda máxima de la corriente fundamental en la acometida y puede calcularse como el promedio de las demandas máximas de corriente mensuales de los últimos 12 meses o puede estimarse para usuarios que inician su operación.
- ◆ Los límites son mas estrictos para los usuarios que representan mayor carga al sistema, ya que la relación I_{cc}/I_L es menor.

Con respecto al TDD de la corriente, este es calculado de la siguiente forma:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_L} \times 100\%, \quad (2.15)$$

donde:

I_h : Magnitud de la componente armónica individual.

h : Orden armónico impar.

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

2.2.4. Punto de medición del nivel de armónicas

Los límites establecidos en la norma IEEE 519-1992 [5] deben aplicarse en la acometida, es decir en el punto donde el suministrador entrega la energía al usuario en cuestión y a partir de ahí puede alimentar a otro usuario.

La norma puede aplicarse usando el mismo procedimiento por los usuarios para evaluar otros puntos dentro de su instalación, pero diferentes límites de distorsión podrían aplicarse en estos casos ya que aunque en un punto dado los límites se excedan, la interacción de diversas cargas puede producir cancelaciones de armónicas que arrojen valores dentro de los límites en la acometida.

2.3 Fuentes que producen las armónicas

La norma IEEE 519-1992 [5] agrupa a las fuentes emisoras de armónicas en tres categorías diferentes:

- ◆ Dispositivos electrónicos de potencia
- ◆ Dispositivos productores de arcos eléctricos
- ◆ Dispositivos ferromagnéticos

En general, cualquier tipo de carga no lineal conectada al sistema eléctrico causará distorsión armónica. A continuación se muestra una lista de ejemplos comunes de fuentes de armónicas en sistemas de potencia [6], entre las que se citan algunas cuyos efectos se pueden despreciar de manera segura en sistemas de distribución:

- ◆ Saturación de transformadores
- ◆ Corrientes de energización de transformadores
- ◆ Conexiones al neutro de transformadores
- ◆ Fuerzas magnetomotrices en máquinas rotatorias de corriente alterna
- ◆ Hornos de arco eléctrico
- ◆ Lámparas fluorescentes
- ◆ Fuentes reguladas por conmutación
- ◆ Cargadores de baterías
- ◆ Compensadores estáticos de VAR's
- ◆ Variadores de frecuencia para motores ("drives"), inversores
- ◆ Convertidores de estado sólido

Es importante señalar que las armónicas son una situación de estado estable, por lo que no se deben confundir con fenómenos transitorios. Aun y cuando las corrientes de

energización en los transformadores son transitorios en sistemas eléctricos, también se pueden citar dentro de fuentes que producen armónicas [7] si operan en sistemas que presentan una resonancia aguda en alguna de las frecuencias de esta corriente (en su mayoría de orden armónica 2, 3, 4 y 5). Esto causaría una distorsión en tensión que a su vez afectará a la corriente de energización del transformador, por ende excitando aún más la frecuencia de resonancia del sistema e incrementando la distorsión en tensión hasta niveles que pueden degradar o dañar equipo en forma instantánea o eventual.

2.3.1. Armónicas Características

Ciertas armónicas son inherentes al proceso de conversión que realizan los equipos, a estas se les llama armónicas características.

En el caso de convertidores estáticos y rectificadores las armónicas características pueden definirse a partir del número de pulsos p con que cuentan, asumiendo que los dispositivos funcionan correctamente.

En el caso de un variador de velocidad, las armónicas características son definidas por la siguiente expresión:

$$h = np \pm 1, \quad (2.16)$$

donde:

n : 1, 2, 3,...

h : Orden armónico.

p : Número de pulsos del variador de velocidad.

2.4 Efectos de la distorsión armónica

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

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

- ◆ Aumento en las pérdidas por efecto Joule ($I^2 R$).
- ◆ Sobrecalentamiento en conductores del neutro.
- ◆ Sobrecalentamiento en motores, transformadores y cables, reduciendo su vida.
- ◆ Vibración en motores y generadores.
- ◆ Falla de bancos de capacitores.

- ◆ Falla de transformadores.
- ◆ Efectos de resonancia que amplifican los problemas mencionados anteriormente y pueden provocar incidentes eléctricos, mal funcionamiento y fallos destructivos de equipos de potencia y control.
- ◆ Problemas de funcionamiento en dispositivos electrónicos sensibles.
- ◆ Interferencias en sistemas de telecomunicaciones.

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

Generalmente cuando la carga no lineal representa menos del 20% de la carga total, la distorsión armónica en corriente estará dentro de los límites establecidos en IEEE 519-1992 [5], sin que exista la necesidad de efectuar algún tipo de filtrado.

Si se cuenta con equipo electrónico sensible en plantas industriales o instalaciones médicas, donde las cargas no lineales sean solo una pequeña proporción, pueden llegar a ocurrir problemas en su funcionamiento atribuibles al sistema de puesta a tierra, conmutación de capacitores remotos, transitorios, o distorsión armónica producida por otros usuarios, debiendo de identificar las causas y tomar las acciones correctivas, que pudiera requerir la instalación de protecciones o filtros.

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

2.4.1. Impacto en la vida de los equipos

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

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

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

Estudios realizados sobre los efectos de la distorsión armónica, muestran reducciones de 20% a 30% en la vida de capacitores y de 10% a 20% en la vida de transformadores.

2.4.2. Efecto de la distorsión armónica en transformadores

En los transformadores de propósito general la potencia nominal esta definida para señales senoidales de tensiones balanceadas y corrientes que no excedan de 0,5% THD, en una magnitud dada que no se exceda el límite de elevación de temperatura, estableciéndose dichos parámetros en la placa de datos.

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

El proceso de degradación del sistema aislante aceite/papel evoluciona gradualmente hasta presentarse la falla en el transformador de potencia. La estadística de fallas de transformadores puede ser clasificada de acuerdo a su frecuencia de ocurrencia, como mostrado en la Tabla N° 2.3.

Tabla N° 2.3 Estadística de fallas en transformadores según su frecuencia de ocurrencia

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

Las corrientes armónicas producen un calentamiento adicional en los devanados de los transformadores, por el incremento en las pérdidas causadas por las corrientes de eddy, que son función tanto de la corriente eficaz que circula como de la frecuencia al cuadrado de la señal, debiéndose de considerar su capacidad en forma reducida con respecto a su nominal, cuando alimentan cargas no lineales de acuerdo al estándar IEEE C57.110-1998 “Prácticas recomendadas para la determinación de la capacidad de transformadores bajo corrientes de carga no sinusoidales” [8]. La distorsión en tensión causa pérdidas adicionales en el núcleo

pero su impacto es poco significativo.

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

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

En resumen los efectos de las armónicas en los transformadores son:

- ◆ Reducción de la eficiencia provocada tanto por el incremento en la corriente eficaz como por las corrientes de Eddy que son función del cuadrado de la frecuencia.
- ◆ Incremento en los costos de operación.
- ◆ Capacidad de operación reducida con relación a su nominal.
- ◆ Inversión en capital adicional.
- ◆ Incremento en la temperatura, pudiendo exceder los límites de elevación sobre la temperatura ambiente, provocando fallas prematuras.
- ◆ Incremento en los costos de mantenimiento por servicio y por reemplazo.
- ◆ Reducción de la productividad de la empresa por paros inesperados.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

En el presente informe se desarrolla la metodología usada para el análisis del impacto de distorsión armónica en transformadores de distribución. Lo anterior se enfoca en los siguientes aspectos:

- ◆ Análisis de distorsión armónica.
- ◆ Atenuación del impacto de distorsión armónica en transformadores de distribución.

En este capítulo se muestran los aspectos principales de los modelos para análisis de distorsión armónica de una red eléctrica genérica, técnicas para flujo de armónicos y medidas correctivas que están asociadas con la atenuación de la distorsión armónica en transformadores de distribución.

3.1 Análisis de distorsión armónica

El análisis de distorsión armónica consiste en determinar las magnitudes de corrientes en la red eléctrica y tensiones en barras del sistema para cada frecuencia armónica, y variables de interés como: THD, impedancias equivalentes (módulo y ángulo) en barras, entre otros. A partir de estos resultados se puede evaluar las frecuencias de resonancia del sistema y también pueden ser probadas medidas de atenuación de armónicos.

3.1.1. Modelos para flujo de armónicos

Los distintos componentes que conforman el sistema eléctrico (generadores, transformadores, líneas, condensadores, reactores, cargas lineales y no lineales) son modelados de acuerdo a su representación en régimen permanente (frecuencia fundamental) y para cada frecuencia armónica.

Las prácticas recomendadas para análisis de armónicos se encuentran en el estándar IEEE 399-1997 “Prácticas recomendadas para análisis de sistemas de energía eléctrica comerciales e industriales” [9]. Los datos usados para los estudios de cortocircuito y flujo de carga pueden también ser utilizados para los estudios de flujo de armónicos, sin

embargo los modelos requieren de información adicional para incluir la dependencia con la frecuencia. Los modelos recomendados por el estándar IEEE 399-1997 son mostrados en las Tablas N° 3.1. y 3.2. Se puede notar que los modelos y las constantes asumidas en las ecuaciones son ejemplos ilustrativos, es decir, estos pueden incorporar otros modelos y constantes.

Tabla N° 3.1 Modelos de los componentes para el estudio de flujo de armónicos

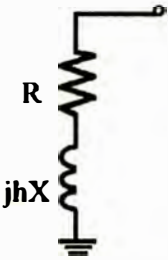
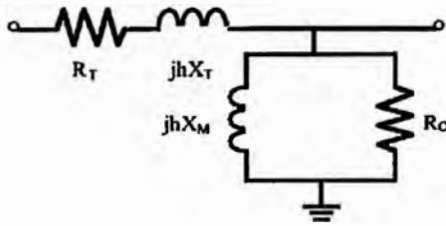
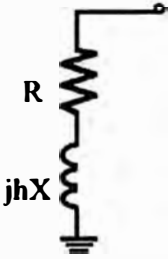
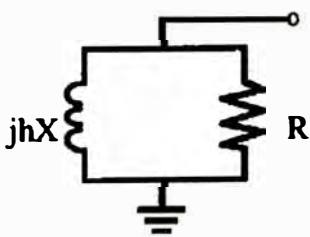

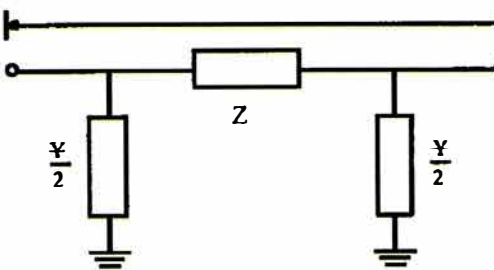
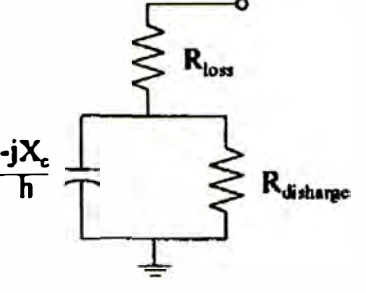
Componentes del Sistema	Modelo de circuito equivalente	Parámetros del modelo
Máquina síncrona		$R = R_{dc}(1 + Ah^B)$ $X = X'' \quad \text{o} \quad X_2 = \frac{X''_d + X''_q}{2}$
Transformador	 <p>Puede ser ignorado si no es una fuente de armónicos significativa</p>	$R_T = R_{dc}(1 + Ah^B)$ <p>R_T y X_T son valores nominales de R y X del transformador</p>
Máquinas de Inducción		$R = R_{dc}(1 + Ah^B)$ $X = X'' \quad \text{o} \quad X_2 = \frac{X''_d + X''_q}{2}$
Carga estáticas y motores		$R = \frac{V^2}{P} \quad X = \frac{V^2}{Q}$

Tabla N° 3.2 Modelos de los componentes para el estudio de flujo de armónicos
(continuación)

Componentes del Sistema	Modelo de circuito equivalente	Parámetros del modelo
Líneas y cables	<p>Línea corta</p>  <p>Línea larga</p> 	$M = 0.001585 \sqrt{\frac{f}{R_{dc}}}$ $Z_C = \sqrt{\frac{z}{y}}; \quad \gamma_e = \sqrt{zy}$ $Z = Z_C \sinh(\gamma_e l)$ $\frac{Y}{2} = \frac{1}{Z_C} \tanh\left(\frac{\gamma_e l}{2}\right)$ <p>f: frecuencia (Hz) R_{dc}: resistencia dc (ohm/m) l: longitud (m) $R = R_{dc} + (0.035M^2 + 0.938), M < 2.4$ $R = R_{dc} + (0.35M^2 + 0.3), M \geq 2.4$ $z = r + jx_L$ (ohm/m) $y = g + jb_C$ (ohm/m)</p>
Capacitor shunt		

A continuación se menciona algunos detalles usados en estos modelos.

Modelo de generador

Los generadores con diseño relativamente moderno no producen tensiones armónicas significantes, por tanto, estos no son fuentes de armónicas y pueden ser representados por una impedancia conectada a tierra. Cualquier reactancia, entre la reactancia de secuencia negativa o subtransitoria, es frecuentemente usada. En la ausencia de un modelo completo, y según lo reportado en la literatura, puede ser usado como modelo un circuito serie RL representado por una reactancia subtransitoria con relación X/R (a la frecuencia fundamental) entre los valores de 15 a 50. Sin embargo, la resistencia del generador debe

ser corregida a altas frecuencia debido al efecto skin. La siguiente ecuación proporciona una sugerencia para su cálculo:

$$R = R_{dc} (1 + Ah^B), \quad (3.1)$$

donde:

- R_{dc} : Resistencia de armadura dc.
- h : Orden armónico.
- A, B : Coeficientes con valores típicos de 0,1 y 1,5, respectivamente.

Modelo de transformador

Un transformador puede ser modelado como un transformador ideal en serie con una impedancia de fuga. La reactancia de fuga varía linealmente con la frecuencia, pero el modelo de resistencia debe contar el efecto skin. Puede ser usada una expresión similar a la utilizada para el caso de la resistencia del generador, usando también valores similares en los coeficientes A y B . Muchas variantes para la impedancia de fuga de transformadores son recomendadas por el CIGRE. Otros modelos complejos son sugeridos considerando la reactancia magnetizante, pérdidas en el núcleo y capacitancias entre los devanados. Desde que la resonancia en transformadores empieza a ocurrir en altas frecuencias, arriba del orden armónico 50, las capacitancias usualmente son despreciadas en el modelo. El circuito magnetizante junto con las pérdidas en el núcleo es también despreciado en muchos casos.

Modelo de motor de inducción

El modelo del circuito estándar para el motor de inducción, véase Fig. 3.1, es válido para el análisis armónico. El modelo consiste en una impedancia de estator, un circuito magnetizante con la resistencia de pérdidas en el núcleo, y una impedancia de rotor dependiente del deslizamiento. En estudios armónicos, las resistencias del estator y del circuito magnetizante son consideradas dependientes de la frecuencia. Sin embargo, algunas consideraciones son dadas para la variación de la impedancia del rotor debido al efecto skin y la definición del deslizamiento en las frecuencias diferentes a la fundamental.

El efecto skin es un factor importante en la evaluación de la impedancia del rotor de las máquinas con jaula de ardilla. A rotor bloqueado, la frecuencia del rotor es alta ($S = 1$). Debido al efecto skin, las construcciones del rotor proveen una alta resistencia e incrementan el torque de arranque. En carga nominal, la frecuencia del rotor es baja y el efecto skin es despreciable.

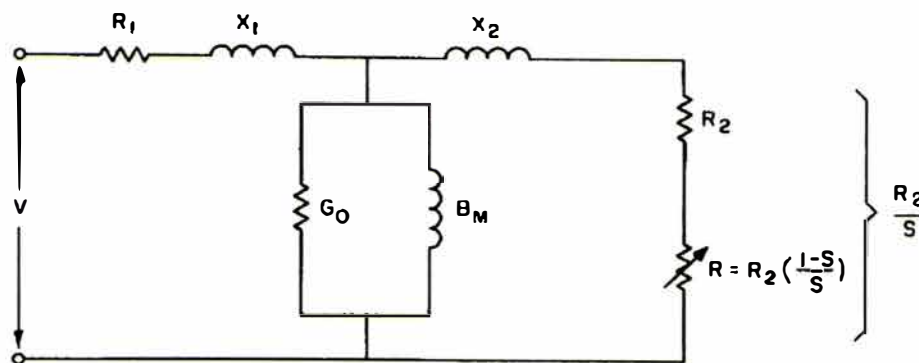


Fig. 3.1 Modelo estático del motor de inducción

Para análisis armónico, la variación de la resistencia e inductancia del rotor están en función del deslizamiento y usualmente son modeladas usando ecuaciones lineales. Las expresiones de la resistencia e inductancia del rotor son las siguientes:

$$R_r(h) = \frac{R_{r0}}{S_h} \times (1 + CR \times S_h), \quad (3.2)$$

$$L_r(h) = L_{r0} \times (1 + CX \times S_h), \quad (3.3)$$

donde:

$R_r(h), L_r(h)$: Resistencia y reactancia del rotor dependiente de la frecuencia.

R_{r0}, L_{r0} : Resistencia y reactancia del rotor dc.

CR, CX : Factores para la resistencia e inductancia. Pueden ser usados los valores típicos de $CR = 2$ y $CX = -0,01$.

S_h : Deslizamiento en la armónica h .

Cada componente armónica de corriente fluye dentro del motor y será visto como una impedancia cuyo valor es determinado por las ecuaciones anteriores. Una primera expresión del deslizamiento S_h es obtenido de la forma básica del deslizamiento, en este caso se recomienda usar la siguiente expresión:

$$S_h \cong \frac{h-1}{h}, \quad (3.4)$$

donde:

h : Orden armónica.

Se puede notar que para valores altos en el orden de armónicos, el deslizamiento armónico alcanza valores próximos a 1, donde la resistencia e inductancia comienzan a ser constantes. En la práctica, el deslizamiento armónico puede ser considerado 1 para armónicos de orden mayor que 9, y la inductancia del motor puede ser aproximada al valor subtransitorio o de rotor bloqueado.

El modelo de las máquinas asíncronas es similar al del estudio de cortocircuito, pero solo llevando en cuenta la secuencia positiva. Son necesarios los valores nominales de tensión, corriente, potencia mecánica, eficiencia, factor de potencia, relación de la corriente del rotor bloqueado con relación a la nominal y resistencia equivalente del motor. Los valores de eficiencia de los motores varían desde 0,93 a 0,96, los valores de factor de potencia varían desde 0,85 hasta 0,9, y las potencias eléctricas de consumo son obtenidas de la información de las cargas. La relación de la corriente del rotor bloqueado con relación a la corriente nominal³ pueden ser fijados a 6 y el deslizamiento nominal es fijado en 1% para todos los motores.

En el análisis armónico se asume que los motores trabajan en régimen permanente, es decir el deslizamiento permanece a su valor nominal.

Modelo de carga

Varios modelos fueron propuestos para representar cargas individuales y agregadas en estudios armónicos. Modelos específicos están disponibles para cargas individuales, si ellas son pasivas, rotativas, de estado sólido, etc. Una carga agregada es usualmente representada como una combinación serie paralelo de inductancias y resistencia, estimadas desde el flujo de carga a la frecuencia fundamental. Este modelo puede ser usado para representar una carga de motor o cargas pasivas. El modelo de resistencia e inductancia son considerados constantes sobre el rango de frecuencias.

Las cargas lineales son modelados en régimen permanente usando una conversión a impedancias equivalentes, similares al caso del análisis de cortocircuito pero solo usando la secuencia positiva. Para las cargas lineales se considera un equivalente RL paralelo, donde los valores de R y L son calculados con base a factores asociados al tipo de carga [10] (comercial, residencial, industrial). Si se tienen datos de potencia se realizan las conversiones necesarias teniendo en cuenta la tensión a frecuencia fundamental.

Modelo de líneas y cables

Una línea corta puede ser representada por un circuito serie RL representando una resistencia y reactancia en serie. La resistencia debe ser corregida para tomar en cuenta el efecto skin para altas frecuencias. Para líneas largas, comienza a ser necesario el modelo de línea con capacitores shunt. El modelo equivalente π y el modelo de parámetros

³ Valores típicos obtenidos de modelos de máquinas asíncronas con similares potencias eléctricas y tensiones nominales.

distribuidos son usados, pero el ultimo es mejor usados para representar la respuesta de la línea sobre un gran intervalo de frecuencias. El modelo de línea distribuida puede ser aproximado por modelos equivalente π en cascada. Las secciones en cascada del modelo para representar la línea larga producen un perfil de armónicos a lo largo de la línea.

La variación de la resistencia de la línea debido al efecto skin puede ser evaluado usando las siguientes expresiones:

$$R = R_{dc} + (0,035M^2 + 0,938), \quad M < 2,4, \quad (3.5)$$

$$R = R_{dc} + (0,35M^2 + 0,3), \quad M \geq 2,4, \quad (3.6)$$

donde:

f : Frecuencia (Hz).

R_{dc} : Resistencia dc (ohm/milla).

También M es calculado como: $M = 0,001585 \sqrt{\frac{f}{R_{dc}}}$.

Cada línea se representa por sus elementos del circuito equivalente: resistencias, inductancias y capacitancias. Se asume un sistema trifásico balanceado, de modo que se pueda hacer uso de una representación monofásica de la red, en el sistema de secuencia positiva. Por lo general, en altas frecuencias la resistencia se incrementa y la inductancia disminuye. Las capacitancias son prácticamente independientes de la frecuencia. Para todas las frecuencias, se deben recalculan la inductancia y la resistencia del circuito equivalente.

La Fig. 3.2 se muestra las respuestas características de la resistencia e inductancia de acuerdo a la dependencia de la frecuencia en forma exponencial. Esto es definido sólo para frecuencias por encima de la nominal del sistema.

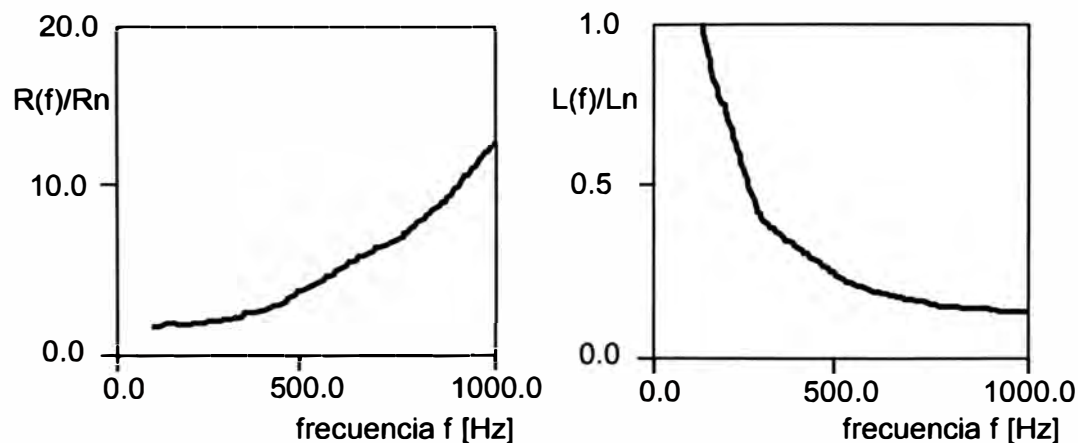


Fig. 3.2 Dependencia de la frecuencia para la resistencia y reactancia de los elementos de la red eléctrica

Para modelar la línea se hace uso de un modelo de parámetros distribuidos. Los elementos serie y paralelo se calculan a partir de la ecuación exacta de la línea para cada frecuencia. Se lleva en cuenta solamente la secuencia positiva.

Compensación reactiva

Los compensadores, en los sistemas de distribución están básicamente constituidos por bancos de condensadores, su modelo es una impedancia constante obtenida a partir del valor de la capacitancia o de la potencia reactiva a frecuencia fundamental y la tensión de barra a frecuencia fundamental.

Fuente de armónicos: variadores de velocidad

Existe una diferencia entre las fuentes de corriente y de tensión. Las fuentes de corriente inyectan su corriente en la red. Las fuentes de tensión crean una tensión de fuente en el nodo de red. Las fuentes de armónicos se necesitan para reproducir los siguientes fenómenos:

- ◆ Equipamientos con característica tensión \times corriente no lineal
- ◆ El rizado de AF de los transmisores de control.

Entre las fuentes con característica no lineal de tensión \times corriente se encuentran los convertidores y los hornos de arco. Como regla general, estos equipos se representan como fuentes de armónicos. Las corrientes armónicas con sus frecuencias, amplitudes y ángulos de fase dependen de la construcción y operación de estos equipos. En el caso de un horno de arco, éstos son valores estadísticos que dependen del horno en particular.

El variador de velocidad convencional de 6 pulsos consta de 6 elementos rectificadores (dos por fase: uno para el medio ciclo positivo y otro para el medio ciclo negativo). El variador que utiliza el control de 12 pulsos consta de dos unidades de rectificación con 6 elementos rectificadores cada una (12 en total); la segunda unidad se conecta mediante un transformador de desplazamiento de fase. En la Fig. 3.3 se muestra el diagrama de bloques general de un variador de velocidad.

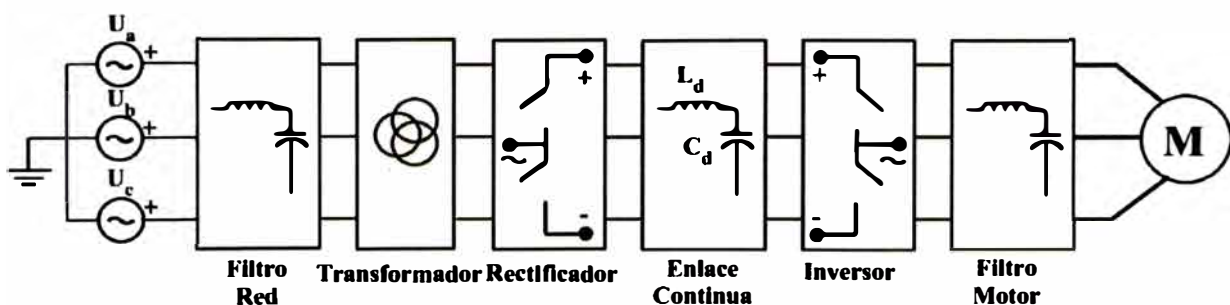


Fig. 3.3 Diagrama de bloques general de un variador de velocidad.

Una descripción resumida de cada uno de los bloques que componen al variador de velocidad es mostrada a continuación:

- ◆ Filtro lado red. Reduce el contenido armónico y mejora el factor de potencia.
- ◆ Transformador. Suele ser un transformador con múltiples secundarios para la reducción de las corrientes armónicas.
- ◆ Rectificador. Convierte la tensión alterna del sistema a una tensión continua fija o ajustable. Las topologías más comunes incluyen rectificadores multipulso con diodos, rectificadores controlados y rectificadores PWM (*Pulse-Width Modulation*).
- ◆ Enlace en continua. Puede ser un capacitor que provee una tensión de continua estable para los convertidores tipo fuente de tensión (VSC) o un inductor para suavizar la corriente de continua en los convertidores tipo fuente de corriente (CSI).
- ◆ Inversor. Se clasifica generalmente en convertidores tipo fuente de tensión (VSC) y convertidores tipo fuente de corriente (CSI). Los VSC convierten la tensión continua en tres tensiones alternas con magnitud y frecuencia ajustables. Los CSI, en cambio, convierten la corriente continua en tres corrientes alternas ajustables.
- ◆ Filtro lado motor. La acción de conmutación del rectificador y del inversor genera señales de modo común. Si no se mitigan, estas señales aparecen en el neutro del bobinado de estator del motor lo que puede provocar un fallo prematuro de la aislación de los bobinados del motor.

En la Tabla N° 3.3 se muestra las características de los convertidores de 6 pulsos comparadas con otros de 12, 18 y 24 pulsos.

Tabla N° 3.3 Características de las corrientes armónicas en sistemas de múltiples pulsos.

Armónico N°.	Número de pulsos del rectificador				Frecuencia armónica	Corriente armónica en porcentaje de la fundamental	
	6	12	18	24		Teórico	Práctico
5	X				300	20.00	19.20
7	X				420	14.20	13.20
11	X	X			660	9.09	7.30
13	X	X			780	7.69	5.70
17	X		X		1020	5.88	3.50
19	X		X		1140	5.26	2.70
23	X	X		X	1380	4.36	2.00
25	X	X		X	1500	4.00	1.60
29	X				1740	3.45	1.40
31	X				1860	3.23	1.20
35	X		X		2100	2.86	1.10
37	X		X		2220	2.70	1.00

Se demuestra que ciertas características armónicas pueden ser canceladas por la

multiplicación de fase. Las armónicas generadas por el convertidor de 6 pulsos para una onda cuadrada de 120° de duración son bien conocidos (véase estándar IEEE 519-1992). La magnitud de corriente armónica es dada por

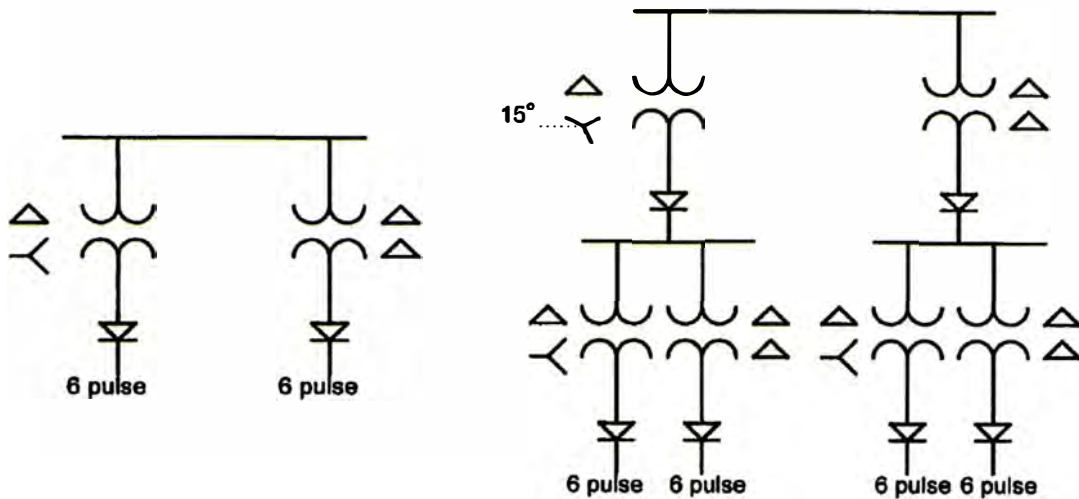
$$I_h = \frac{I_1}{h}, \quad (3.7)$$

donde:

I_1 : Corriente a frecuencia fundamental (A).

h : Orden armónico, dado por la ecuación 2,16 con $p = 6$.

En la Fig. 3.4 se muestra los distintos arreglos de convertidores de múltiples pulsos en función del convertidor de 6 pulsos.



a) arreglo de convertidor de 12 pulsos

b) arreglo de convertidor de 24 pulsos

Fig. 3.4 Arreglos de convertidores de múltiples pulsos.

Usando la información del estándar IEEE 399-1997 [9], se puede modelar el variador de velocidad de 6 pulsos como una fuente de corriente armónica de acuerdo con la Fig. 3.5, en este caso se consideran los valores típicos de las componentes armónicas.

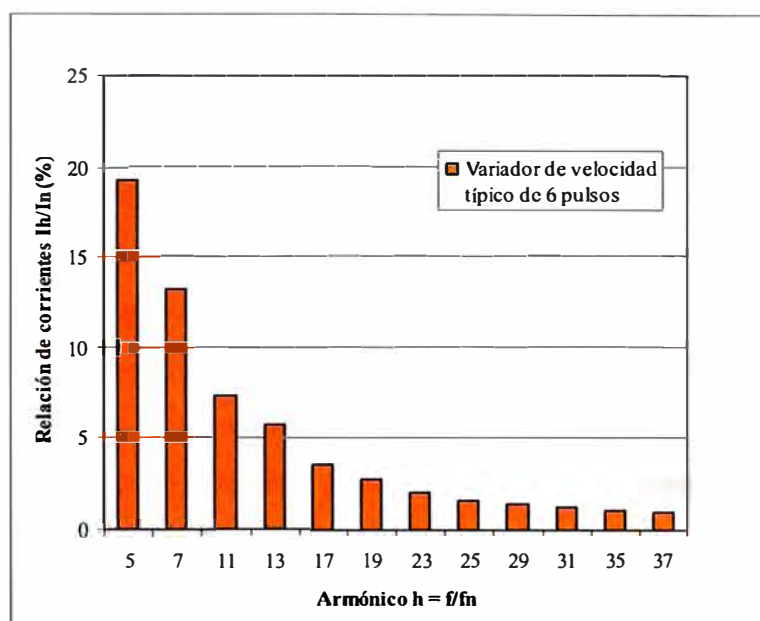
Equivalente de red

En condición de operación la red eléctrica de estudio se conecta al sistema principal a través del PAC⁴. La red eléctrica aguas arriba es modelada como un equivalente de red en la barra acople, similar al régimen permanente.

En este caso el modelo consiste en un equivalente de Thevenin en el cual la tensión de Thevenin se considera de forma senoidal pura y la impedancia de Thevenin involucra el

⁴ PAC viene de las siglas Punto de Acoplamiento Común.

efecto de la distorsión en el nodo generador. En la Fig. 3.6 se muestra el equivalente de red del sistema de distribución.



h	1	5	7	11	13	17	19	23	25	29	31	35	37
Ih/In (%)	100	19	13	7.3	5.7	3.5	2.7	2	1.6	1.4	1.2	1.1	1

Fig. 3.5 Características de fuente de corriente armónica de un variador de velocidad típico de 6 pulsos

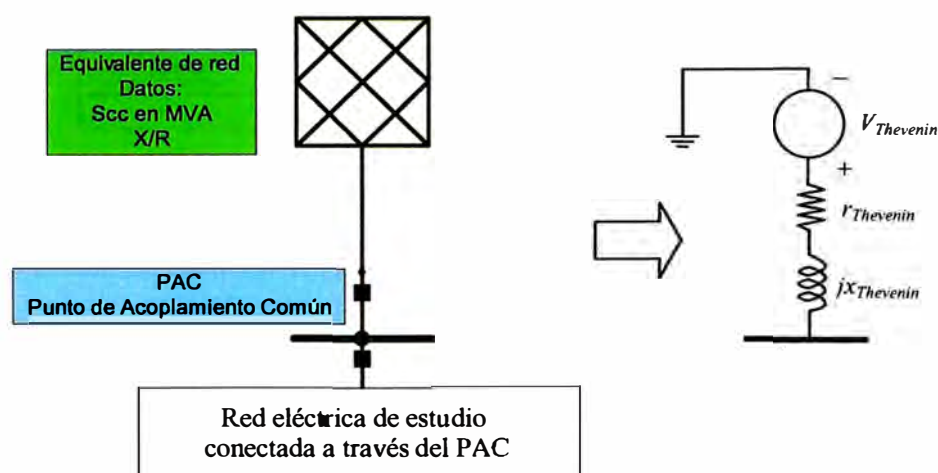


Fig. 3.6 Equivalente de red del sistema de distribución

Este equivalente Thevenin incorpora características X/R , adicionalmente puede ser considerado un capacitor C . Para el cálculo de análisis de armónicos sólo se considera la secuencia positiva y la impedancia se calcula con la potencia de cortocircuito y la relación X/R del PAC.

3.1.2. Técnicas para resolución del flujo de carga armónico

El flujo de carga armónico, al igual que el flujo de carga convencional, busca establecer el estado del sistema a partir de los parámetros de los elementos lineales que lo conforman, de información sobre demanda en los nodos, de la potencia generada por las máquinas síncronas, de la topología del sistema y de las características de los elementos no lineales que dan origen a tensiones y corrientes de frecuencias múltiplos de la fundamental en el sistema. Los elementos lineales y no lineales deben ser modelados considerando la variación que éstos pueden presentar con la frecuencia.

Para una red radial con N nodos, el número mínimo de incógnitas que determinan el estado del sistema es $2 N_{PQ} + N_{PV}$ donde N_{PQ} es el número de nodos de carga del sistema y N_{PV} es el número de nodos de generación.

Cuando una red posee cargas no-lineales el problema se hace más complejo, ya que además de las incógnitas a frecuencia fundamental aparecen las tensiones y los ángulos a frecuencias armónicas de cada nodo del sistema para cada una de las frecuencias armónicas (h) como se muestra en la Tabla N° 3.4.

Tabla N° 3.4 Variables del flujo de carga armónico

ELEMENTOS	VARIABLES CONOCIDAS	VARIABLES DESCONOCIDAS	NUMERO DE INCÓGNITAS
Slack	$V^{(1)}$ y $\theta^{(1)}$	$V^{(h)}$ y $\theta^{(h)}$	$2 \bullet h$
Generadores (N_G)	$V^{(1)}$ y $P^{(1)}$ generados	$Q^{(1)}$ y $\theta^{(1)}$ $V^{(h)}$ y $\theta^{(h)}$	$2 \bullet N_G + 2 \bullet N_G \bullet h$
Cargas (N_C)	$P^{(1)}$ y $Q^{(1)}$	$V^{(1)}$ y $\theta^{(1)}$ $V^{(h)}$ y $\theta^{(h)}$	$2 \bullet N_C + 2 \bullet N_C \bullet h$
Cargas no-lineales (N_L)	Parámetros (β)	$V^{(1)}$ y $\theta^{(1)}$ $V^{(h)}$ y $\theta^{(h)}$	$2 \bullet N_L + 2 \bullet N_L \bullet h$
Total		$2 \bullet [h + (N_G + N_C + N_L) \bullet (1+h)]$	

Existen diversas técnicas para solucionar este problema, la mayoría de estas utilizan algoritmos basados en Newton-Raphson tradicional. Entre estas se tienen:

- ◆ Flujo de carga completo.
- ◆ Penetración armónica.
- ◆ Penetración armónica iterativa.

Flujo de carga completo

El primer enfoque a este problema fue propuesto por Xia [11] y es una extensión del algoritmo de Newton-Raphson para un sistema más extenso de ecuaciones correspondiente al flujo de carga armónico. Esta propuesta requiere un modelo analítico de las cargas no-lineales que pueda ser introducido en la matriz Jacobiana.

Penetración armónica

Un enfoque distinto es suponer la división del problema $F(X) = 0$ en dos sub-problemas (F_1, F_h) . Estos se resuelven de manera separada bajo las siguientes aproximaciones:

- ◆ El modelo de las cargas no-lineales depende de las tensiones de frecuencia fundamental.
- ◆ La potencia de las cargas lineales esta asociada a la frecuencia fundamental.

Estas suposiciones implican que el flujo de carga convencional puede ser aplicado para encontrar los parámetros a frecuencia fundamental. Una vez finalizado este paso se tienen definidos los modelos de las cargas lineales y no lineales.

Esta metodología tiene claras ventajas por su simplicidad pero no considera la interacción armónica, es decir, la relación entre las corrientes armónicas y las tensiones armónicas en los modelos de las cargas no-lineales.

Penetración armónica iterativa

Esta metodología tiene la misma estructura básica de la penetración armónica, y adicionalmente tiene pasos que llevan en cuenta la interacción armónica, para esto se hace un subproceso iterativo en el cual se actualizan los modelos de las cargas no-lineales de acuerdo al cambio de las tensiones armónicas.

Finalizado el cálculo de penetración armónica, las tensiones armónicas cambian respecto a sus valores iniciales y esto produce un cambio en los modelos de las cargas no-lineales haciendo que las corrientes también se modifiquen. El cambio en las corrientes modifica nuevamente las tensiones armónicas. Este proceso iterativo se repite hasta que los modelos no cambien de una iteración a otra. Esta metodología puede ser complementada realizando iteraciones adicionales de flujo de carga a frecuencia fundamental para considerar la interacción con la frecuencia fundamental. El algoritmo completo se muestra en la Fig. 3.7.

3.2 Medidas de atenuación de la distorsión armónica en transformadores

La mayoría de los transformadores están diseñados para operar con corriente alterna a una frecuencia fundamental (50 ó 60 Hz), lo que implica que operando en condiciones de carga nominal y con una temperatura no mayor a la temperatura ambiente especificada, el transformador debe ser capaz de disipar el calor producido por sus pérdidas sin sobrecalentarse ni deteriorar su vida útil.

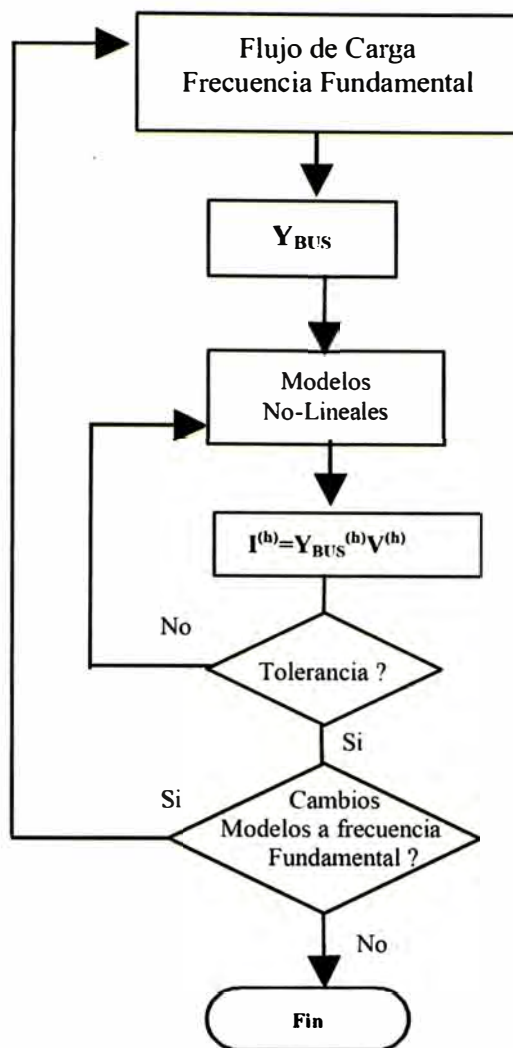


Fig. 3.7 Diagrama de flujo del algoritmo de penetración armónica iterativa

3.2.1. Pérdidas en transformadores

Las pérdidas en los transformadores consisten en pérdidas sin carga o de núcleo y pérdidas con carga, que incluyen las pérdidas I^2R , pérdidas por corrientes de eddy y pérdidas adicionales en el tanque, sujetadores, u otras partes de hierro. De manera individual, el efecto de las armónicas en estas pérdidas se explica a continuación.

Pérdidas sin carga o de núcleo

De acuerdo con la referencia [12] estas son producidas por la tensión de excitación en el núcleo. La forma de onda de tensión en el primario es considerada senoidal independientemente de la corriente de carga, por lo que no se considera que aumentan para corrientes de carga no senoidales.

Aunque la corriente de magnetización consiste de armónicas, éstas son muy pequeñas comparadas con las de la corriente de carga, por lo que sus efectos en las pérdidas totales

son mínimos. En consecuencia, en normas como la IEEE C57.110-1998 [8] se acepta que la presencia de armónicos no incrementa las pérdidas del núcleo.

Pérdidas I^2R

Si la corriente de carga contiene componentes armónicas, entonces estas pérdidas también aumentarán por el efecto skin.

Las pérdidas I^2R las genera la corriente que pasa por la resistencia de los arrollamientos. También se conoce como pérdida óhmica o pérdida óhmica de c.c. [13]. La pérdida óhmica es proporcional al cuadrado de la magnitud de la corriente de carga, incluyendo los componentes armónicos, pero es independiente de la frecuencia. Se determina midiendo la resistencia en c.c. y calculando las pérdidas resultantes utilizando las corrientes de los arrollamientos a plena carga.

Pérdidas por corrientes de eddy

De acuerdo con la referencia [12] estas pérdidas, llamadas también pérdidas a corrientes parásitas, para la frecuencia fundamental son proporcionales al cuadrado de la corriente de carga y al cuadrado de la frecuencia, razón por la cual se puede tener un aumento excesivo de éstas en los devanados que conducen corrientes de carga no senoidal (y por lo tanto en también en su temperatura). Estas pérdidas se pueden expresar como:

$$P_e = P_{e,n} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_n} \right)^2 h^2, \quad (3.8)$$

donde:

- h : Orden armónico.
- I_h : Corriente de la armónica h , en amperes.
- I_n : Corriente nominal, en amperes.
- $P_{e,n}$: Pérdidas de eddy a corriente y frecuencia nominal.

Estas pérdidas dependen del cuadrado de la dimensión del conductor perpendicular al campo del flujo de pérdida. En los extremos del arrollamiento el campo de flujo se curva y la dimensión mayor del conductor rectangular es perpendicular a un vector componente del campo de flujo de pérdida. Igualando la altura de los arrollamientos primario y secundario, que se puede conseguir con cualquier diseño de arrollamiento, se reducen las pérdidas parásitas concentradas en los extremos del arrollamiento. Sin embargo, la magnitud todavía sigue siendo mayor que en la mitad del arrollamiento, debido a esa curvatura del campo de flujo de pérdida. Reduciendo el tamaño del conductor, se reduce el porcentaje de

pérdidas por corrientes parásitas, pero las pérdidas óhmicas aumentan.

La utilización de varios hilos por arrollamiento reduce tanto las pérdidas por corrientes parásitas, como las pérdidas óhmicas pero, al ser los conductores de longitudes desiguales, se generan corrientes de circulación que producen pérdidas adicionales. Esto puede evitarse mediante el uso de conductores continuamente transpuestos, como el que se muestra en la Fig. 3.8, para el arrollamiento de corriente de alta intensidad. Los transformadores pequeños presentan tamaños reducidos de los conductores debido a la baja intensidad de las corrientes involucradas.

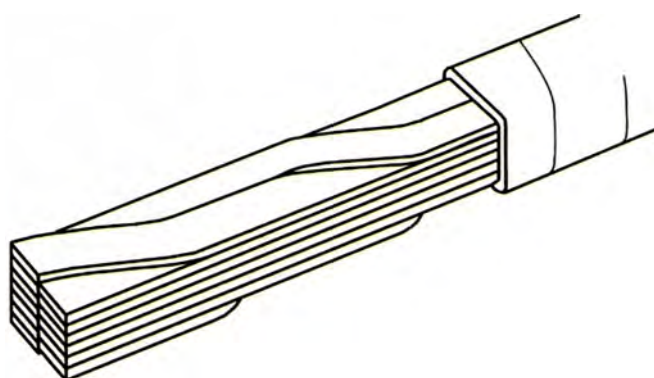


Fig. 3.8 Conductor continuamente transpuesto

Pérdidas adicionales

Estas pérdidas, llamada también de pérdidas de dispersión, aumentan la temperatura en las partes estructurales del transformador, y dependiendo del tipo de transformador contribuirán o no en la temperatura más caliente del devanado.

Las pérdidas por dispersión se presentan debido al flujo disperso que origina pérdidas en el núcleo, soportes, depósitos y otras partes de hierro. Estas pérdidas por dispersión elevan la temperatura de las partes estructurales del transformador. Para los transformadores de tipo seco, los aumentos de temperatura de esas regiones no contribuyen a aumentar la temperatura de la zona caliente de los arrollamientos. Para los transformadores sumergidos en líquido, las pérdidas por dispersión aumentan la temperatura del aceite y por lo tanto la temperatura de la zona caliente de los arrollamientos.

Se considera que varían con el cuadrado de la corriente y la frecuencia, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_{AD} = P_{AD,n} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left(\frac{I_h}{I_n} \right)^2 h^2, \quad (3.9)$$

donde:

$P_{AD,n}$: Pérdidas adicionales a corriente y frecuencia nominal.

Efecto de la componente de corriente directa

Aunado a estas pérdidas, algunas cargas no lineales presentan una componente de corriente directa en la corriente de carga. Si este es el caso, esta componente aumentará las pérdidas de núcleo ligeramente, pero incrementarán substancialmente la corriente de magnetización y el nivel de sonido audible, por lo que este tipo de cargas se debe evitar.

Tipo de conexión en transformadores trifásicos

En el caso de transformadores conectados en delta - estrella (comúnmente de distribución) que suministran cargas no lineales monofásicas como pueden ser fuentes reguladas por conmutación, las armónicas “triplen” (múltiplos de 3) circularán por las fases y el neutro del lado de la estrella, pero no aparecerán en el lado de la delta (caso balanceado), ya que se quedan atrapadas en ésta produciendo sobrecalentamiento de los devanados. Se debe tener especial cuidado al determinar la capacidad de corriente de estos transformadores bajo condiciones de carga no lineal puesto que es posible que los volts-amperes medidos en el lado primario sean menores que en el secundario.

3.2.2. Medidas correctivas ante la distorsión armónica

Con el constante aumento de cargas no lineales, se han analizado diversas medidas correctivas las cuales se agrupan en las siguientes alternativas:

- ◆ Transformadores de factor K . En el caso de transformadores que operarán bajo condiciones de carga no lineal, es conveniente en lugar de sobredimensionar el transformador, utilizar un transformador con un factor K mayor a 1.
- ◆ Desclasificación de los transformadores. Se llevan a cabo estudios para disminuir la capacidad nominal de los transformadores ya instalados que suministran energía a este tipo de cargas.

Transformadores con factor K

Estos transformadores son aprobados por el Underwriters Laboratory para su operación bajo condiciones de carga no senoidal, puesto que operan con menores pérdidas a las frecuencias armónicas. Este laboratorio establece el método denominado factor K para transformadores secos, que es un índice de la capacidad del transformador para

soportar los efectos del calentamiento producidos por las cargas no lineales, siendo diseñados para operar a su capacidad nominal con corrientes que tengan niveles de distorsión de acuerdo a dicho factor, sin que se excedan los límites nominales de elevación de temperatura.

Entre las modificaciones con respecto a los transformadores normales se tienen las siguientes [14]:

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

El factor K se puede encontrar mediante un análisis armónico de la corriente de la carga o del contenido armónico estimado de la misma. El factor K es calculado a partir de la siguiente ecuación [15]:

$$\text{factor } K = \sum_{h=1}^{h=h \max} \left[h \times \frac{I_h}{I_1} \right]^2, \quad (3.10)$$

donde:

h : Orden armónico.

I_h : Corriente de la armónica h , en amperes.

I_1 : Corriente a la frecuencia fundamental, en amperes.

Con el valor del factor K de la corriente de la carga, se puede escoger el transformador adecuado. Los valores de factor K normalizados en transformadores son 4, 9, 13, 20, 30, 40 y 50, siendo los mas usados 4, 13 y 20. En la referencia [16] se puede encontrar una lista

del factor K estimado de un buen número de cargas no lineales comunes.

Desclasificación de los transformadores

En el caso de usar transformadores estándares diseñados para cargas no armónicas, es necesaria una reevaluación de su operación a fin de disminuir la capacidad nominal de los transformadores.

Con este objetivo es usado el factor D^5 (de la sigla en ingles *derated*), el cual es calculado por el método 1 de la norma IEEE C57.110-1998 [8]. El factor D es obtenido de la siguiente expresión [8]:

$$\text{factor } D = \frac{1,5}{1 + 0,15K}, \quad (3.11)$$

donde:

K : Factor K calculado en la ecuación (3.10).

El factor D en valores porcentuales (%) señala el porcentaje de carga que el transformador estándar puede soportar, es decir, es desclasificado la capacidad nominal original de ese transformador.

3.2.3. Ejemplo práctico

Si se conoce el espectro de armónicos, o puede medirse, o predecirse, se pueden calcular con facilidad las pérdidas adicionales. En principio el proceso de cálculo es el siguiente:

- ◆ Se determinan todas las componentes adicionales de pérdidas debidas a la presencia de armónicos.
- ◆ Se determina el espectro de armónicos, bien sea por medio de mediciones o por estimación, teniendo en cuenta todos los equipos generadores de armónicos (esencialmente los convertidores electrónicos).
- ◆ Se calcula la contribución de cada armónico y se determina la pérdida adicional total.

En la práctica, es importante utilizar magnitudes de corriente armónica reales en lugar de valores teóricos.

Pérdidas en transformadores

En la Tabla N° 3.5 se muestran las pérdidas adicionales calculadas para corrientes armónicas hasta el orden 25 para dos transformadores a temperatura ambiente normal,

⁵ Viene de la sigla en ingles *derated*.

suponiendo que el espectro de armónicos de corriente es el que indican los valores teóricos del convertidor de 6 pulsos mostrado en la Fig. 3.9.

Tabla N° 3.5 Pérdidas adicionales calculadas en presencia de corrientes no sinusoidales

Tipo de pérdida	Primer Transformador (21.5°C)	Segundo Transformador (22.8°C)
Adicional con corriente sinusoidal	520 W	1721 W
Adicional con no corriente sinusoidal	871 W	4351 W

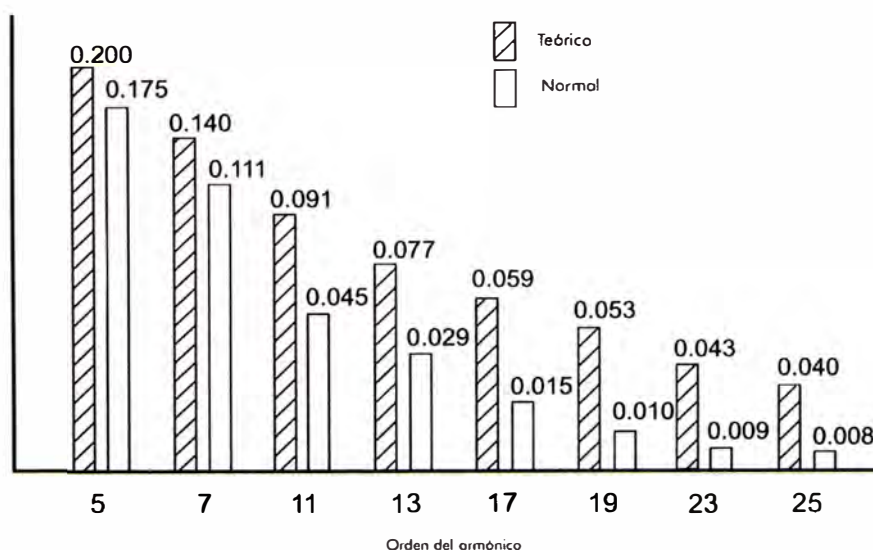


Fig. 3.9 Valores teóricos y reales de las corrientes armónicas correspondientes a un convertidor de 6 pulsos

Los resultados demuestran que las características del transformador desempeñan un papel importante en la determinación de las pérdidas con cargas armónicas. Las medidas de los transformadores de este ejemplo se tomaron a temperaturas ligeramente diferentes (21,5° C para el primero y 22,8° C para el segundo). Esto no altera el carácter del resultado.

Calculo de los factores K y D

En la Tabla N° 3.6 se muestra el cálculo del factor K para el espectro teórico de armónicos del convertidor de 6 pulsos mostrado en la Fig. 3.9.

El primer paso consiste en calcular el valor eficaz (o rms) de la corriente total I , en este caso 1,0410, después de lo cual se pueden calcular los cuadrados de los valores proporcionales de cada armónico de corriente, con lo que se llega al valor de K . Para esa carga un transformador con una clasificación K de un valor 9 sería adecuado para un convertidor de seis pulsos.

El factor D para la desclasificación del transformador resulta en el valor de 0,488, es

decir, este transformador puede ser cargado solamente hasta un 48,8% del valor en plena carga

Tabla N° 3.6 Ejemplo de cálculo para la determinación del factor K y D

Armónico N°.	I_h/I_1	$(I_h/I_1)^2$	$(h \times I_h/I_1)$	$(h \times I_h/I_1)^2$
1	100.0%	1.000	1.000	1.000
5	20.0%	0.040	1.000	1.000
7	14.0%	0.020	0.980	0.960
11	9.1%	0.008	1.001	1.002
13	7.7%	0.006	1.001	1.002
17	5.8%	0.003	0.986	0.972
19	5.6%	0.003	1.064	1.132
23	4.3%	0.002	0.989	0.978
25	4.0%	0.002	1.000	1.000
Suma =		1.084	Factor K =	9.047
$I_{rms}/I_1 =$		1.041	Factor D =	0.488

CAPÍTULO IV

PROPUESTA DE ANÁLISIS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN

Como parte del estudio de la distorsión armónica en redes eléctricas y evaluación de su impacto en transformadores de distribución, en este capítulo se muestra una propuesta de análisis basada en los siguientes puntos:

- ◆ Red eléctrica de estudio.- Se usó como red eléctrica de estudio un sistema eléctrico en 22,9 kV con características similares a las redes eléctricas de las empresas de distribución. Dentro del sistema eléctrico son introducidas instalaciones eléctricas de plantas industriales, las cuales generan armónicos caracterizados por variadores de velocidad de 6 pulsos.
- ◆ Evaluación de la operación en régimen permanente.- La operación de la red eléctrica de estudio es evaluada a régimen permanente usando el estudio de flujo de carga. Estos resultados permitirán obtener información del balance de potencia, caídas de tensión y toma de carga de los componentes de la red. Adicionalmente se obtendrán las corrientes a frecuencia fundamental que servirán para el análisis de distorsión armónica.
- ◆ Evaluación de la distorsión armónica.- La distorsión armónica de la red eléctrica de estudio es evaluada para los armónicos característicos usando el estudio de flujo de armónicos. Estos resultados permitirán verificar la distorsión en tensiones de barra, corrientes armónicas por los componentes del sistema, entre otros.
- ◆ Medidas correctivas.- Se analizan los efectos de la distorsión armónica en algunos de los transformadores de distribución dispersos en el sistema. Se propondrá el cálculo de los factores K y D para el reemplazo de transformadores y desclasificación de los mismos, respectivamente.

4.1 Red eléctrica de estudio

La red eléctrica de estudio tiene un punto de conexión con el SEIN a través de Punto de Acoplamiento Común. Este sistema está compuesto por dos subsistemas de distribución de red primaria en 22,9 kV, transformadores de distribución, cargas de consumidores en BT a un nivel de 0,38 kV (tensión trifásica). Dentro del sistema se ubican instalaciones industriales compuestas por transformadores de potencia, cargas no lineales formadas por los variadores de velocidad y cargas de iluminación.

En la Fig. 4.1 se presenta el diagrama unifilar de la red eléctrica de estudio para la propuesta de análisis de distorsión armónica en transformadores de distribución.

4.1.1. Punto de Acoplamiento Común (PAC)

Esta interconexión de la red eléctrica en estudio al SEIN⁶ se realiza a través del PAC en la barra de 60 kV. La red externa asociada a este punto es modelada a partir de una S_{cc} de 1003 MVA y una relación X/R de 6,5, lo cual permite construir el equivalente Thevenin para análisis de flujo de carga y flujo de armónicos.

4.1.2. Redes de distribución primaria

Las redes de distribución primaria están a un nivel de tensión MT de 22,9 kV y se caracterizan por ser redes aéreas con características mecánicas y eléctricas típicas de redes reales. Con los parámetros de resistencia, reactancia y susceptancia obtenidas por catálogos de fabricante de cables y conductores [17] fueron construidos los modelos de impedancia serie y paralelo para análisis de flujo de carga y flujo de armónicos. La ampacidad de los conductores es utilizada para la evaluación de la cargabilidad de las redes.

4.1.3. Transformadores de potencia y distribución

Dentro de los transformadores de potencia, tenemos un transformador reductor de 60/22,9 kV con capacidad nominal de 16 MVA y dos transformadores de 22,9/0,46 kV con capacidad nominal de 1,25 MVA ubicados en las instalaciones industriales. Los transformadores de distribución MT/BT tienen una relación de transformación de 22,9/0,38 kV con capacidad nominal de 160 kVA.

Con los parámetros de resistencia, reactancia y susceptancia obtenidas de transformadores típicos fueron construidos los modelos de impedancia serie y paralelo para análisis de flujo de carga y flujo de armónicos. Los valores nominales de potencia de los transformadores son usados para la evaluación de la cargabilidad.

⁶ SEIN viene de las siglas de Sistema Eléctrico Interconectado Nacional.

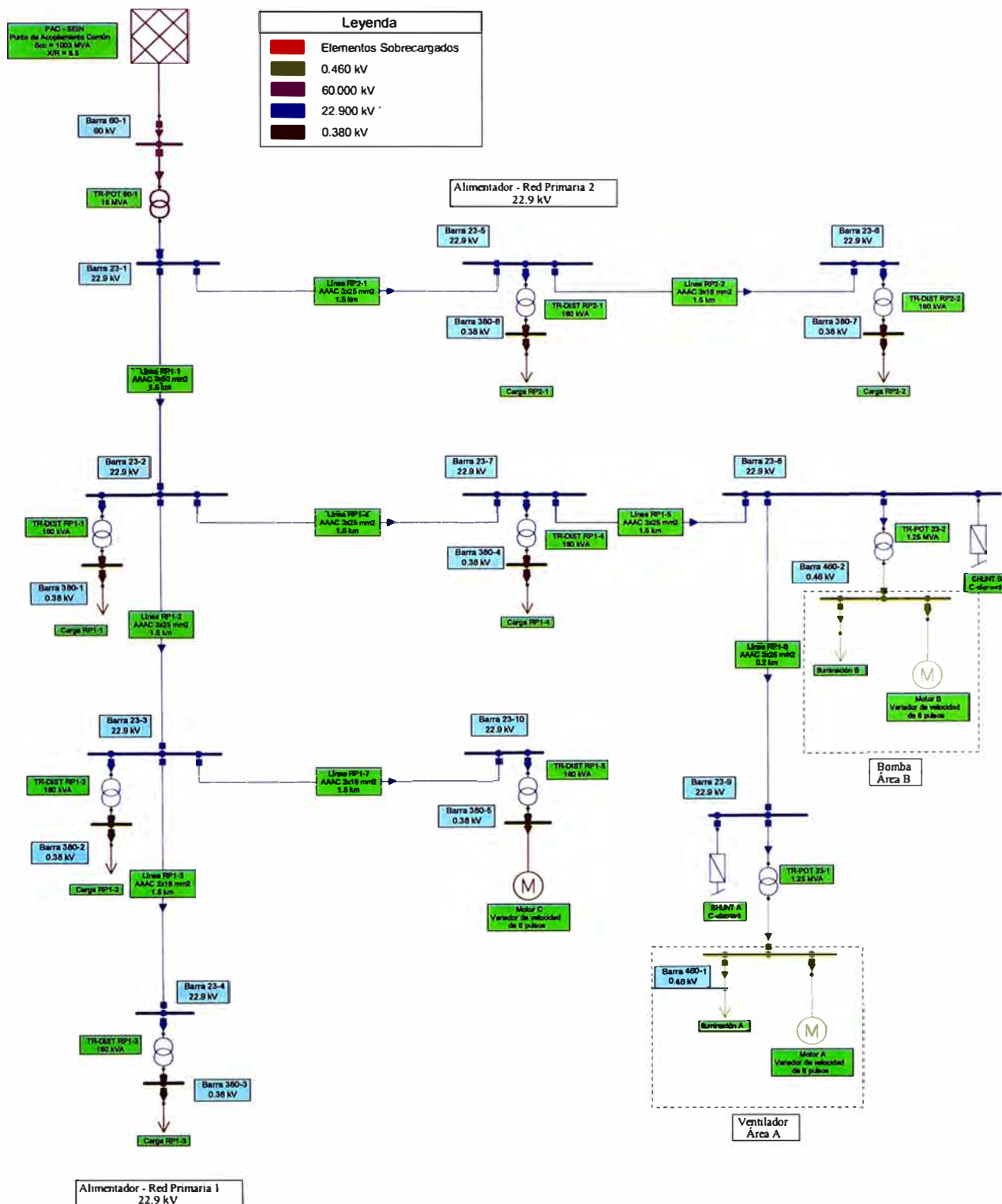


Fig. 4.1 Red eléctrica de estudio para la propuesta de análisis de distorsión armónica en transformadores de distribución

4.1.4. Cargas lineales

Estas son conformadas por las cargas BT (en 0,38 kV) de consumidores residenciales y comerciales ubicadas en el sistema de distribución. En promedio, el consumo estimado de estas cargas es de 130 kW por punto de carga del transformador. En las plantas industriales estas cargas forman parte de la demanda de iluminación. Para el análisis de flujo de carga estas cargas son usados modelos de potencia constante y para análisis de armónicos son usados modelos de con impedancia constante calculados con los resultados de flujo de carga.

4.1.5. Cargas no lineales

Estas están formadas por tres variadores de velocidad de 6 pulsos dispersos como: dos en las plantas industriales con tensión nominal de 0,46 kV y uno dentro de la red primaria con tensión nominal de 0,38 kV. Las cargas en las plantas industriales son motores que alimentan una bomba y un ventilador. Los parámetros del modelo de los motores como deslizamiento, velocidad nominal, eficiencia, Factor ANSI, potencia mecánica nominal, entre otros, son usados en los modelos para cálculo de flujo de carga y flujo de armónicos.

4.1.6. Capacitores shunt

Algunos capacitores shunt son conectados a la red como parte de las políticas de compensación reactiva del sistema. Estos elementos son modelados como un elemento shunt en barra.

En el Anexo A (Datos de la red eléctrica de estudio) son mostrados los parámetros eléctricos de los componentes del sistema usados en los modelos para flujo de carga y flujo de armónicos.

4.2 Evaluación de la operación en régimen permanente

Para la evaluación de operación en régimen permanente de la red eléctrica de estudio se usó la herramienta de flujo de carga incluida en el software de simulación de redes eléctricas NEPLAN versión 5.2.4.

Dentro del estudio de flujo de carga fueron definidas las siguientes premisas asociadas a los modelos y condiciones de simulación:

- ◆ El PAC es modelado como una barra *slack*, la cual permite el balance de potencia y pérdidas eléctricas al final de la evaluación.
- ◆ Se estableció como tolerancia de convergencia un error de 10^{-3} p.u en las potencias activas y reactivas.
- ◆ Se usó el método de Newton Raphson extendido con opción de barra distribuida.

- ◆ Las barras de carga operan a plena carga.

Los resultados del estudio de flujo de carga son mostrados en la Fig. 4.2, donde se puede apreciar las tensiones en barras (en p.u. %), flujo de potencia activa (en MW) y reactiva (en MVAR), corriente en la red primaria y transformadores (en A.), y la cargabilidad de los componentes (en %).

4.2.1. Resumen de balance de potencia

Los resultados del balance de potencia de generación, carga y pérdidas totales de la red eléctrica de estudio son mostrados en la Tabla N° 4.1.

Tabla N° 4.1 Resumen de balance de potencia para la red eléctrica de estudio

		Potencias:	P	Q
		Unidades:	MW	MVAR
Balance de Potencia	Generación	G1 - SEIN	3.361	0.778
		G2 - Cap. Shunt	0.000	0.939
		Total: GT	3.361	1.717
	Carga	C1 - Motores	2.330	1.136
		C2 - Clientes BT	0.780	0.256
		C3 - Iluminación	0.134	0.044
		Total: CT	3.244	1.436
Total Balance (pérdidas) = GT - CT		0.117	0.281	
Pérdidas de Potencia	Cables	PL1 - 22.9 kV	0.069	0.012
		PL2 - 60 kV	0.000	0.000
		Total: PLT	0.069	0.012
	Transformadores	PT1 - 22.9 kV	0.045	0.217
		PT2 - 60 kV	0.003	0.052
		Total: PTT	0.048	0.269
Total Pérdidas = PLT + PTT		0.117	0.281	

Con respecto a la generación, podemos ver que en la operación el SEIN inyecta al sistema 3,361 MW y 0,778 MVAR, con un total de pérdidas eléctricas del sistema de 0,117 MW y 0,281 MVAR. Las pérdidas eléctricas alcanzan un 3,48 % con respecto a la inyección total.

Con respecto a la compensación reactiva, en la operación se inyecta 0,939 MVAR producidos por los 2 bancos de capacitores de 500 kVAR cada uno.

Con respecto a las cargas, el mayor consumo es debido a los motores los cuales están distribuidos la red eléctrica de estudio en tres zonas: dos en las plantas industriales y uno en el transformador TR-DIST RP1-5.

Con respecto a las pérdidas eléctricas, la mayor parte de ellas está contenida en los transformadores de distribución (con 0,217 MW) y en segundo lugar se tiene las redes primarias en 22,9 kV (con 0,069 MW).

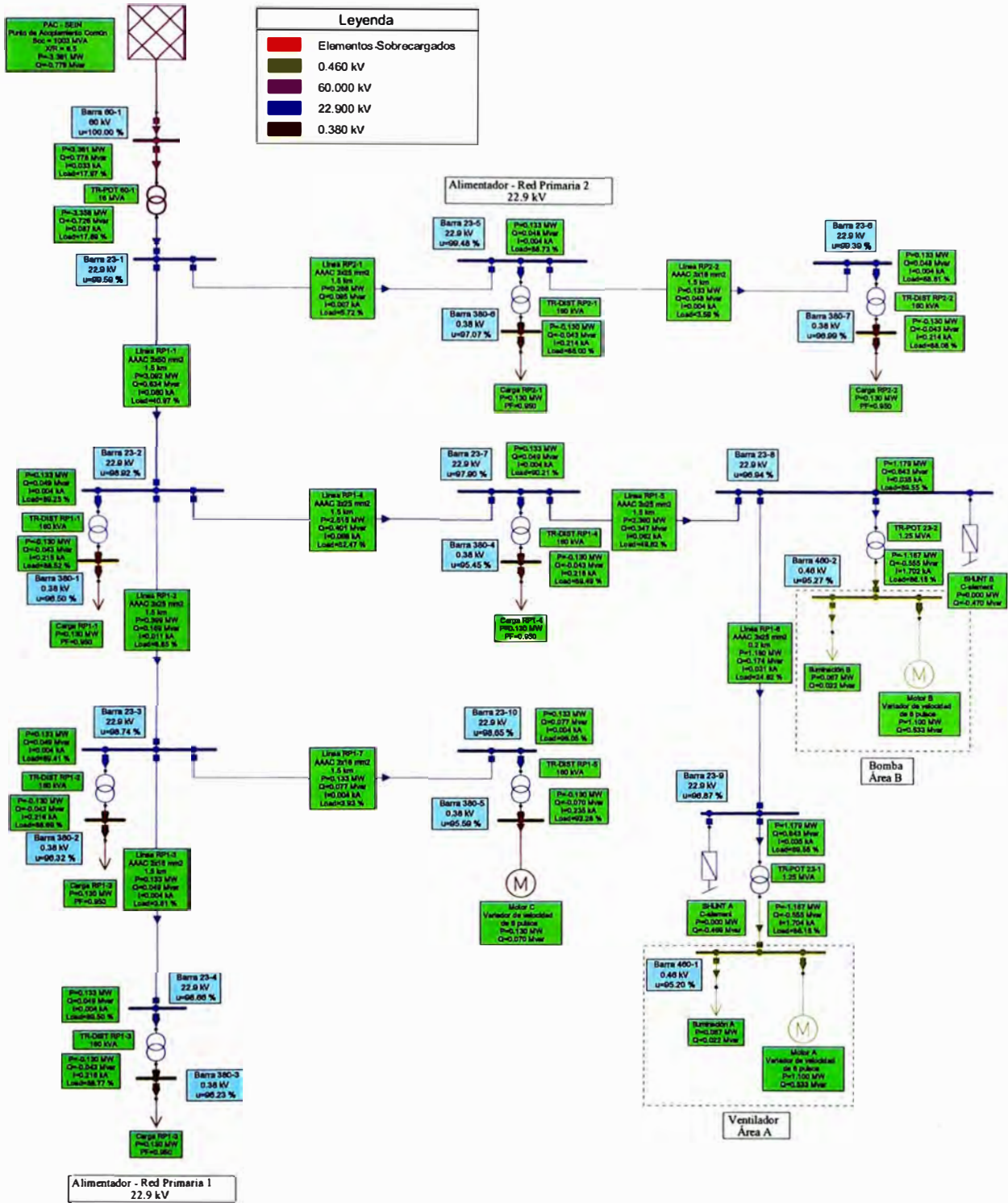


Fig. 4.2 Resultados de la operación en régimen permanente de la red eléctrica de estudio (flujo de carga)

4.2.2. Tensiones en barras y control de reactivos

Los resultados de tensiones en barras y control de reactivos del sistema son mostrados en la Tabla N° 4.2.

Tabla N° 4.2 Tensiones en barras y control de tensión/potencia reactiva

Nombre Barra	Nivel de Tensión	Equipamiento de Inyección de Reactivos	Tensión		Q (MVAR)
			(kV)	(p.u.%)	
Barra 23-1	22.9 kV		22.81	99.59	0
Barra 23-10	22.9 kV		22.59	98.65	0
Barra 23-2	22.9 kV		22.65	98.92	0
Barra 23-3	22.9 kV		22.61	98.74	0
Barra 23-4	22.9 kV		22.59	98.66	0
Barra 23-5	22.9 kV		22.78	99.48	0
Barra 23-6	22.9 kV		22.76	99.39	0
Barra 23-7	22.9 kV		22.42	97.9	0
Barra 23-8	22.9 kV	Cap. Shunt 500 kVAR	22.20	96.94	-0.47
Barra 23-9	22.9 kV	Cap. Shunt 500 kVAR	22.18	96.87	-0.469
Barra 380-1	0.38 kV		0.37	96.5	0
Barra 380-2	0.38 kV		0.37	96.32	0
Barra 380-3	0.38 kV		0.37	96.23	0
Barra 380-4	0.38 kV		0.36	95.45	0
Barra 380-5	0.38 kV		0.36	95.59	0
Barra 380-6	0.38 kV		0.37	97.07	0
Barra 380-7	0.38 kV		0.37	96.99	0
Barra 460-1	0.46 kV		0.44	95.2	0
Barra 460-2	0.46 kV		0.44	95.27	0
Barra 60-1	60 kV		60.00	100	0
Mínima Tensión:		Barra 460-1	0.44	95.2	

Con respecto a las tensiones, en la condición de operación las tensiones en barra están dentro de la tolerancia permitida⁷ en $\pm 5\%$ de la tensión nominal. Las tensiones mínimas se registran en las barras de 0,46 kV de las plantas industriales.

Con respecto al control de tensión/potencia reactiva, en la operación cada capacitor shunt inyecta alrededor de 0,47 MVAR permitiendo aumentar el perfil de tensión en las redes de 0,46 kV. Es importante resaltar que el modelo de capacitor usado depende de la tensión de conexión, es decir en los casos de peor control de tensión se podría tener poca contribución de reactivos por parte de los capacitores.

4.2.3. Flujos de potencia y sobrecarga de redes

Los resultados de flujos de potencia y sobrecarga de redes (en cables y transformadores) son mostrados en la Tabla N° 4.3.

Con respecto a la cargabilidad de las redes, en la operación se puede observar que las líneas de red primaria RP1-4 (conductores de AAAC 50 mm²), RP1-5 (conductores de

⁷ Tolerancia típica de tensión usada para operación de servicios eléctricos, como definida por la Norma Técnica en la Calidad de los Servicios Eléctricos [18].

AAAC 25 mm²) y RP1-1 (conductores de AAAC 25 mm²) presentan las mayores cargabilidades, es decir, 52,5%, 49,6% y 40,9%, respectivamente, debido principalmente a ser parte de la troncal del alimentador. En el caso de los transformadores, todos están operando en plena carga y con cargabilidad arriba de 88%, con excepción del transformador en 60 kV.

Tabla N° 4.3 Flujos de potencia y sobrecarga de redes

Elemento			P (MW)	Q (MVAR)	Cargabilidad (%)
Nombre	Descripción	Tipo			
Línea RP1-1	AAAC 3x50 mm ²	Red primaria	3.092	0.634	40.97
Línea RP1-2	AAAC 3x25 mm ²	Red primaria	0.4	0.167	8.83
Línea RP1-3	AAAC 3x16 mm ²	Red primaria	0.133	0.046	3.59
Línea RP1-4	AAAC 3x25 mm ²	Red primaria	2.54	0.408	52.46
Línea RP1-5	AAAC 3x25 mm ²	Red primaria	2.382	0.353	49.61
Línea RP1-6	AAAC 3x25 mm ²	Red primaria	1.18	0.174	24.82
Línea RP1-7	AAAC 3x16 mm ²	Red primaria	0.133	0.077	3.93
Línea RP2-1	AAAC 3x25 mm ²	Red primaria	0.266	0.092	5.7
Línea RP2-2	AAAC 3x16 mm ²	Red primaria	0.133	0.046	3.57
TR-DIST RP1-1	160 kVA	Transformador de distribución	0.133	0.049	89.25
TR-DIST RP1-2	160 kVA	Transformador de distribución	0.133	0.049	89.41
TR-DIST RP1-3	160 kVA	Transformador de distribución	0.133	0.049	89.5
TR-DIST RP1-4	160 kVA	Transformador de distribución	0.133	0.049	90.21
TR-DIST RP1-5	160 kVA	Transformador de distribución	0.133	0.077	96.05
TR-DIST RP2-1	160 kVA	Transformador de distribución	0.133	0.048	88.73
TR-DIST RP2-2	160 kVA	Transformador de distribución	0.133	0.048	88.81
TR-POT 23-1	1.25 MVA	Transformador de potencia	1.179	0.643	89.55
TR-POT 23-2	1.25 MVA	Transformador de potencia	1.179	0.643	89.55
TR-POT 60-1	16 MVA	Transformador de potencia	3.358	0.726	17.89

4.3 Evaluación de la distorsión armónica

Para la evaluación de distorsión armónica de la red eléctrica de estudio se usó la herramienta de flujo de armónicos incluida en el software de simulación de redes eléctricas NEPLAN versión 5.2.4.

Dentro del estudio de flujo de armónicos fueron definidas las siguientes premisas asociadas a los modelos y condiciones de simulación:

- ◆ El efecto total de todas las fuentes armónicas se evalúa considerando una suma vectorial entre las mismas.
- ◆ La evaluación se realiza mediante modelos de impedancia considerando un barrido de frecuencias con paso de 10 Hz desde 60 Hz hasta 1800 Hz.
- ◆ Las fuentes armónicas consideradas para los variadores de velocidad de 6 pulsos fueron modeladas mediante inyección de corrientes usando un espectro típico en la práctica.

Los resultados del estudio de flujo de armónicos son mostrados en la Fig. 4.3, donde se puede apreciar los THD de las tensiones en barras (en p.u. %).

En el Anexo B (Resultados del análisis de distorsión armónica) son mostrados todos los resultados (tensiones y corrientes individuales, así como el THD_v y THD_i) obtenidos en el análisis de distorsión armónica usando el flujo de armónicos en la red eléctrica de estudio.

4.3.1. Tensiones armónicas individuales y THD_v

Según las prácticas recomendadas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas de potencia, que puede ser encontrado en el estándar IEEE 519-1992 [5], las máximas distorsiones armónicas de tensión permitidas fueron mostradas en la Tabla N° 2.1 del Capítulo 2. La red eléctrica de estudio tiene tensiones menores a 69 kV, así los límites permitidos en tensiones individuales armónicas es de 3% y en el THD de tensión de 5%.

Los resultados de las máximas tensiones armónicas individuales y THD_v del sistema son mostrados en la Tabla N° 4.4.

Tabla N° 4.4 Máximas tensiones armónicas individuales y THD_v del sistema

Nombre Barra	Nivel de Tensión	Máxima V _h		THD _v (%)
		h	(%)	
Barra 23-1	22.9 kV	11	5.80	6.74
Barra 23-10	22.9 kV	11	7.21	8.39
Barra 23-2	22.9 kV	11	7.23	8.39
Barra 23-3	22.9 kV	11	7.22	8.39
Barra 23-4	22.9 kV	11	7.21	8.39
Barra 23-5	22.9 kV	11	5.80	6.73
Barra 23-6	22.9 kV	11	5.80	6.73
Barra 23-7	22.9 kV	11	8.76	10.16
Barra 23-8	22.9 kV	11	10.29	11.95
Barra 23-9	22.9 kV	11	10.39	12.07
Barra 380-1	0.38 kV	11	6.62	7.71
Barra 380-2	0.38 kV	11	6.61	7.70
Barra 380-3	0.38 kV	11	6.61	7.70
Barra 380-4	0.38 kV	11	8.02	9.33
Barra 380-5	0.38 kV	7	6.08	10.42
Barra 380-6	0.38 kV	11	5.32	6.18
Barra 380-7	0.38 kV	11	5.31	6.18
Barra 460-1	0.46 kV	7	9.60	16.12
Barra 460-2	0.46 kV	7	9.56	16.05
Barra 60-1	60 kV	11	1.11	1.29

Con respecto a las tensiones individuales, podemos observar que las máximas tensiones armónicas se ubican entre las armónicas de orden 11 y 7, lo cual es un resultado esperado debido que el variador de velocidad de 6 pulsos presenta una inyección de corrientes armónicas en los armónicos de orden 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35 y 37.

Las tensiones individuales de los armónicos de orden 11 y 7 sobrepasan el límite permitido (límite de 3%), con excepción de la barra de 60 kV.

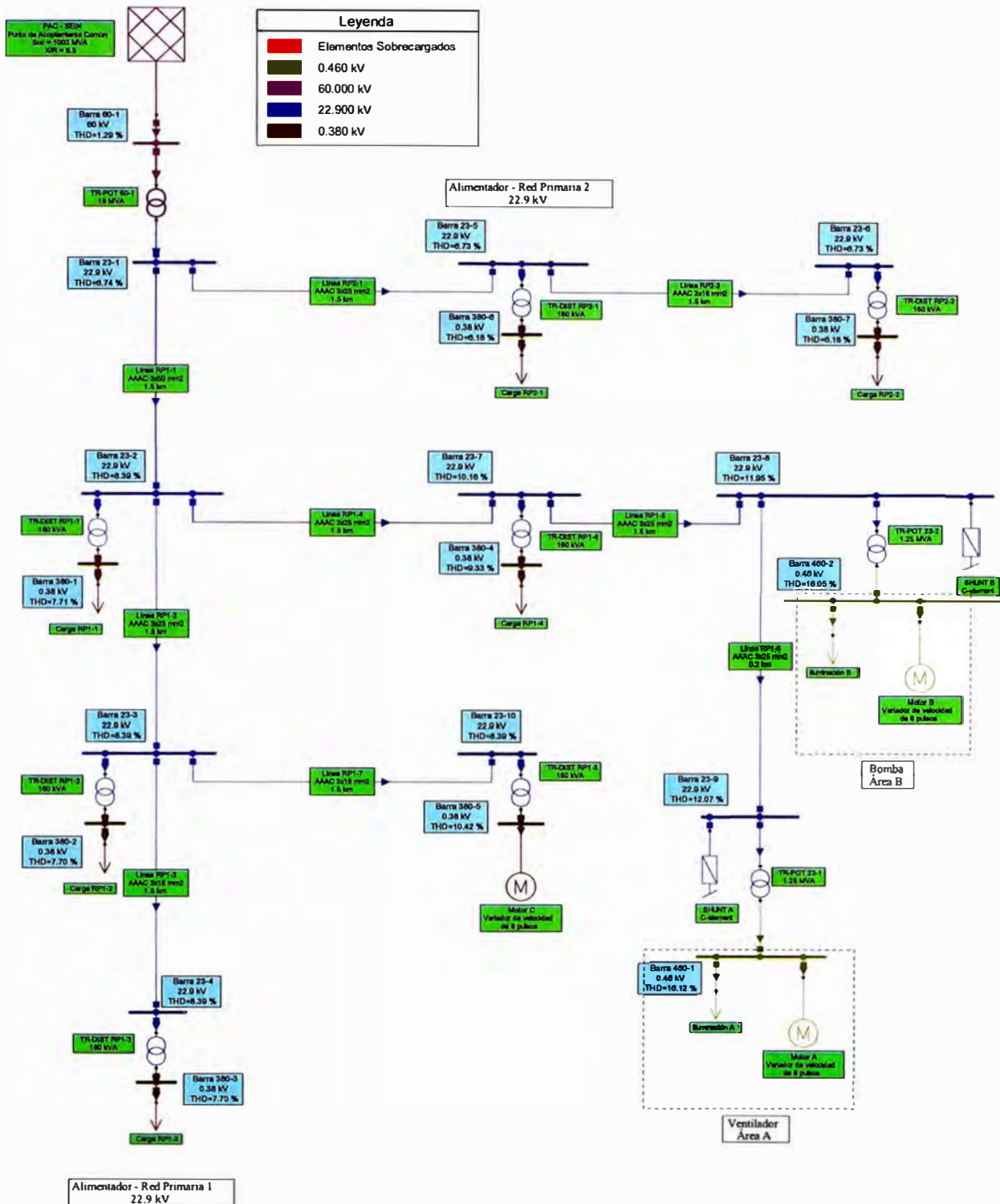


Fig. 4.3 Resultados de la distorsión armónica de tensiones, medida en THD de tensiones en barra, de la red eléctrica de estudio (flujo de armónicos)

Con respecto a los THDV, en todas las barras el THDV es mayor que el límite permitido (límite de 5%). Los valores de THDV son menores al límite permitido solamente en la barra 60 kV.

4.3.2. Corrientes armónicas individuales y THD_i en transformadores

Los resultados de las corrientes armónicas individuales y THDI en transformadores de distribución son mostrados en la Tabla N° 4.5. Los valores de corrientes para la frecuencia fundamental fueron obtenidos del estudio de flujo de carga.

Tabla N° 4.5 Corrientes armónicas individuales y THD_i en transformadores de distribución

Nombre Transformador	Descripción	Lado primario lh		THDi (%)
		h	(A)	
TR-DIST RP1-1	160 kVA	5	0.0385	2.15%
		7	0.0397	
		11	0.0641	
		13	0.0152	
		17	0.0033	
		19	0.0018	
		23	0.0008	
		25	0.0005	
		29	0.0003	
		31	0.0002	
		35	0.0001	
		37	0.0001	
		TR-DIST RP1-2	160 kVA	
7	0.0400			
11	0.0640			
13	0.0151			
17	0.0032			
19	0.0018			
23	0.0008			
25	0.0005			
29	0.0003			
31	0.0002			
35	0.0001			
37	0.0001			
TR-DIST RP1-3	160 kVA			5
		7	0.0399	
		11	0.0640	
		13	0.0151	
		17	0.0032	
		19	0.0018	
		23	0.0008	
		25	0.0005	
		29	0.0003	
		31	0.0002	
		35	0.0001	
		37	0.0001	
		TR-DIST RP1-4	160 kVA	5
7	0.0479			
11	0.0777			
13	0.0185			
17	0.0040			
19	0.0022			
23	0.0010			
25	0.0006			
29	0.0004			
31	0.0003			
35	0.0002			
37	0.0002			

Tabla N° 4.5 Corrientes armónicas individuales y THD_1 en transformadores de distribución (continuación)

Nombre Transformador	Descripción	Lado primario I_h		THDi (%)
		h	(A)	
TR-DIST RP1-5	160 kVA	5	0.7283	24.37%
		7	0.5007	
		11	0.2769	
		13	0.2162	
		17	0.1328	
		19	0.1024	
		23	0.0759	
		25	0.0607	
		29	0.0531	
		31	0.0455	
		35	0.0417	
		37	0.0379	
TR-DIST RP2-1	160 kVA	5	0.0308	1.73%
		7	0.0318	
		11	0.0515	
		13	0.0122	
		17	0.0026	
		19	0.0015	
		23	0.0006	
		25	0.0004	
		29	0.0002	
		31	0.0002	
		35	0.0001	
		37	0.0001	
TR-DIST RP2-2	160 kVA	5	0.0308	1.72%
		7	0.0318	
		11	0.0514	
		13	0.0122	
		17	0.0026	
		19	0.0015	
		23	0.0006	
		25	0.0004	
		29	0.0002	
		31	0.0002	
		35	0.0001	
		37	0.0001	

Con respecto a los THD_1 , se observan que la mayoría de transformadores de distribución posee valores de THD_1 menores a 3% con excepción del transformador TR-DIST RP1-5, el cual tiene como carga un motor que trabaja con un variador de velocidad de 6 pulsos con una capacidad de 130 kVAR.

4.4 Medidas correctivas en transformadores de distribución

Antes de tomar las medidas correctivas necesarias para atenuar los efectos de la distorsión armónica en los transformadores de distribución, se evaluará el grado de penetración armónica mediante el cálculo de los factores K y D .

4.4.1. Cálculo de los factores K y D

Los resultados del cálculo de los factores K y D en transformadores de distribución debido a la distorsión armónica son mostrados en la Tabla N° 4.6. Lo anterior fue calculado usando las ecuaciones (3.10) y (3.11) conjuntamente con los valores de corrientes

individuales obtenidos de la Tabla N° 4.5.

Tabla N° 4.6 Factores K y D de los transformadores de distribución del sistema

Nombre Transformador	Descripción	Factor K (adim)	Factor D (%)
TR-DIST RP1-1	160 kVA	1.04	99.5%
TR-DIST RP1-2	160 kVA	1.04	99.5%
TR-DIST RP1-3	160 kVA	1.04	99.5%
TR-DIST RP1-4	160 kVA	1.06	99.2%
TR-DIST RP1-5	160 kVA	5.09	65.2%
TR-DIST RP2-1	160 kVA	1.03	99.7%
TR-DIST RP2-2	160 kVA	1.03	99.7%

4.4.2. Interpretación de los factores K y D

Los valores de los factores K y D mostrados en la Tabla N° 4.6 pueden ser interpretados de la siguiente forma:

- ◆ Para los transformadores con factor K alrededor a 1, presentan problemas leves de distorsión armónica que no amerita el uso de transformadores especiales. Los factores D de estos transformadores están próximos de 100%, es decir, estos pueden seguir siendo usados para la conexión a plena carga sin provocar problemas en la vida útil del mismo. Los armónicos de la red no contaminan lo suficiente los transformadores de distribución para establecer su reemplazo.
- ◆ Para el transformador TR-DIST RP1-5 tiene un factor K mayor a 4, lo que indica que es necesario el uso de un transformador especial con valor de factor K igual a 4. En caso no se quiera cambiar el transformador actual, el factor D indica que este transformador solo podrá estar cargado a un 65,2% de su capacidad máxima.

CONCLUSIONES

Respecto al análisis de la distorsión armónica en transformadores de distribución realizado en este trabajo podemos decir lo siguiente:

1. La distorsión armónica está presente en las redes eléctricas actuales cuando son usadas diferentes tipos de tecnologías de electrónica de potencia. Al simular la conexión de un variador de velocidad de 6 pulsos se pueden observar armónicas de orden 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35 y 37.
2. Para el análisis del comportamiento completo de la distorsión armónica es necesario primero del estudio de flujo de carga para la obtención de las magnitudes eléctricas en la frecuencia fundamental. Para la evaluación de armónicos es necesario de introducir modelos adecuados para reproducir el fenómeno total. La herramienta de flujo de armónicos permite la evaluación de las tensiones y corrientes armónicas de redes eléctricas considerando la inyección de armónicos de corriente de las cargas no lineales.
3. De acuerdo a las simulaciones realizadas se observó que las armónicas orden 11, 7 y 5 son las que aportan más contaminación al sistema considerando la inclusión de variadores de velocidad de 6 pulsos.
4. La distorsión armónica está presente en todos los componentes de la red eléctrica en un menor o mayor grado. La conexión de transformadores de distribución próximos a cargas no lineales provoca el aumento de la distorsión armónica en el mismo.
5. Para atenuar los efectos de la distorsión armónica en transformadores de distribución se propusieron dos alternativas: i) el reemplazo del transformador actual por uno especial llamado transformador de factor K, y ii) utilizar el transformador actual pero considerar la desclasificación del mismo usando el factor D.
6. Con el valor del factor K de la corriente de la carga, se puede escoger el transformador adecuado. Los valores de factor K normalizados en transformadores son 4, 9, 13, 20, 30, 40 y 50, siendo los mas usados 4, 13 y 20. Este tipo de transformador permite una protección especial en función del grado de penetración de la distorsión armónica de la

red.

7. El factor D permite la desclasificación de los transformadores, es decir, se usa el transformador actual pero se recalcula su capacidad nominal máxima. Este valor puede ser obtenido directamente del factor D.

Dentro de los trabajos futuros que pueden ser enfocados a partir de la experiencia alcanzada a partir de este trabajo se puede mencionar lo siguiente:

1. Otros componentes de la red eléctrica se ven afectados por la distorsión armónica. Un siguiente paso después de la evaluación de las corrientes de distorsión es emprender medidas correctivas para mejorar la vida útil de los componentes, por ejemplo, la aplicación de filtros armónicos y atenuación del rizo presente en las fuentes armónicas.
2. La introducción de la generación distribuida a las redes de distribución modifican el punto de vista de estudio de la distorsión armónica. En efecto, ahora la evaluación de la distorsión armónica en las redes de distribución se hace necesaria por el aumento del riesgo en la pérdida y daño de los equipamientos de la red. A partir de esto, se hace necesario el estudio de la distorsión armónica en redes con generación distribuida.

ANEXOS

ANEXO A

DATOS DE LA RED ELÉCTRICA DE ESTUDIO

Los datos de la red eléctrica de estudio consisten en las características nominales y parámetros eléctricos principales de los componentes del sistema. Dentro del estudio se realizaron los siguientes análisis con sus respectivas herramientas de simulación:

- ◆ Análisis de operación en régimen permanente, usando flujo de carga (FC),
- ◆ Análisis de distorsión armónica, usando flujo de armónicos (FA).

Los parámetros eléctricos fueron agrupados en las dos herramientas de simulación mencionadas, así en lo sucesivo será identificado de esa forma dentro de las tablas.

Transformadores

Los datos de los transformadores son presentados en la Tabla N° A.1.

Tabla N° A.1 Datos de transformadores del sistema

Item	Nombre	Barra Inicial	Barra Final	Grupo	Sr	Vr1	Vr2	Zcc(1)	R(1)
				Vectorial	MVA	kV	kV	%	%
				(FC) (FA)	(FC) (FA)	(FC) (FA)	(FC) (FA)	(FC) (FA)	(FC) (FA)
1	TR-POT 60-1	Barra 60-1	Barra 23-1	Dyn1	16	16	60	7.01	0.376
2	TR-DIST RP1-3	Barra 23-4	Barra 380-3	Dyn5	0.16	0.16	22.9	3.90	1.650
3	TR-DIST RP1-1	Barra 23-2	Barra 380-1	Dyn5	0.16	0.16	22.9	3.90	1.650
4	TR-DIST RP1-2	Barra 23-3	Barra 380-2	Dyn5	0.16	0.16	22.9	3.90	1.650
5	TR-DIST RP1-4	Barra 23-7	Barra 380-4	Dyn5	0.16	0.16	22.9	3.90	1.650
6	TR-DIST RP2-1	Barra 23-5	Barra 380-6	Dyn5	0.16	0.16	22.9	3.90	1.650
7	TR-DIST RP1-5	Barra 23-10	Barra 380-5	Dyn5	0.16	0.16	22.9	3.90	1.650
8	TR-DIST RP2-2	Barra 23-6	Barra 380-7	Dyn5	0.16	0.16	22.9	3.90	1.650
9	TR-POT 23-2	Barra 23-8	Barra 460-2	Dy11	1.25	1.25	22.9	5.81	0.810
10	TR-POT 23-1	Barra 23-9	Barra 460-1	Dy11	1.25	1.25	22.9	5.81	0.810

Conductores y cables de energía

Los datos de los conductores y cables son presentados en la Tabla N° A.2.

Tabla N° A.2 Datos de conductores y cables de energía del sistema

Item	Nombre	Tipo	Barra Inicial	Barra Final	Longitud km	R(1) Ohm/km	X(1) Ohm/km	C(1) uF/km	I nom máx A
	(FC) (FA)		(FC) (FA)	(FC) (FA)	(FC) (FA)	(FC) (FA)	(FC) (FA)	(FC) (FA)	(FC) (FA)
1	Línea RP1-1	AAAC 3 50 22.9KV	Barra 23-1	Barra 23-2	1.5	0.663	0.463	0.009	195
2	Línea RP1-2	AAAC 3 25 22.9KV	Barra 23-3	Barra 23-2	1.5	1.310	0.488	0.009	125
3	Línea RP1-3	AAAC 3 16 22.9KV	Barra 23-4	Barra 23-3	1.5	2.090	0.505	0.008	100
4	Línea RP1-4	AAAC 3 25 22.9KV	Barra 23-7	Barra 23-2	1.5	1.310	0.488	0.009	125
5	Línea RP2-1	AAAC 3 25 22.9KV	Barra 23-5	Barra 23-1	1.5	1.310	0.488	0.009	125
6	Línea RP1-7	AAAC 3 16 22.9KV	Barra 23-10	Barra 23-3	1.5	2.090	0.505	0.008	100
7	Línea RP2-2	AAAC 3 16 22.9KV	Barra 23-6	Barra 23-5	1.5	2.090	0.505	0.008	100
8	Línea RP1-5	AAAC 3 25 22.9KV	Barra 23-8	Barra 23-7	1.5	1.310	0.488	0.009	125
9	Línea RP1-6	AAAC 3 25 22.9KV	Barra 23-8	Barra 23-9	0.2	1.310	0.488	0.009	125

Cargas asociadas a iluminación y clientes BT

Los datos de las cargas asociadas a iluminación y clientes BT son presentados en la Tabla N° A.3.

Tabla N° A.3 Datos de cargas asociadas a iluminación y clientes BT del sistema

Item	Nombre	Tipo	Barra de conexión	P kW	Q kVAr
				(FC) (FA)	(FC) (FA)
1	Carga RP1-3	PC	Barra 380-3	130	43
2	Carga RP1-1	PC	Barra 380-1	130	43
3	Carga RP1-2	PC	Barra 380-2	130	43
4	Carga RP1-4	PC	Barra 380-4	130	43
5	Carga RP2-1	PC	Barra 380-6	130	43
6	Carga RP2-2	PC	Barra 380-7	130	43
7	Iluminación B	PQ	Barra 460-2	67	22
8	Iluminación A	PQ	Barra 460-1	67	22

Cargas asociadas a motores

Los datos de las cargas asociadas a motores son presentados en la Tabla N° A.4.

Tabla N° A.4 Datos de cargas asociadas a motores del sistema

Item	Nombre	Barra de conexión	Pr MW	Vr kV	Ir A	cosphi	Eficiencia	Ia/Ir	Pares de polos	Rm Ohm	P oper MW	Q oper MVAr
			(FC) (FA)	(FA)	(FA)	(FA)	(FA)	(FA)	(FA)	(FA)	(FC)	(FC)
1	Motor A	Barra 460-1	1.056	0.46	1.534	0.9	0.96	6	1	0.003	1.1	0.533
2	Motor B	Barra 460-2	1.056	0.46	1.534	0.9	0.96	6	1	0.003	1.1	0.533
3	Motor C	Barra 380-5	0.13	0.38	0.2286	0.9	0.96	6	1	0.003	0.13	0.07

Capacitores shunt

Los datos de los elementos reactivos shunt son presentados en la Tabla N° A.5.

Tabla N° A.5 Datos de capacitores shunt del sistema

Item	Nombre	Barra de conexión	Vr kV	Q(1) MVAr	Regulación	Fases
	(FC) (FA)	(FC) (FA)	(FC) (FA)	(FC) (FA)	(FC) (FA)	(FC) (FA)
1	SHUNT A	Barra 23-9	22.9	-0.5	fija	L1L2L3N
2	SHUNT B	Barra 23-8	22.9	-0.5	fija	L1L2L3N

Equivalente de red

Los datos del equivalente de red son presentados en la Tabla N° A.6.

Tabla N° A.6 Datos de equivalente de red del sistema

Descripción	Nombre	Barra de conexión	Tipo FC	Poper (MW)	Qoper (MVAR)	Sk'min (MVA)	Sk'max (MVA)	Ik'min (KA)	Ik'max (KA)	Ik'acc. IEC	Voper (pu)	R(1)/X(1) min	R(1)/X(1) max
			(FC) (FA)	(FC)	(FC)	(FA)	(FA)	(FA)	(FA)	(FA)	(FA)	(FA)	(FA)
PAC Scc = 1003 MVA X/R = 6.5	PAC - SEIN	Barra 60-1	Slack	3.36	0.78	1003.01	1003.01	19.30	19.30	1	1	0.1538	0.1538

ANEXO B

RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE DISTORSIÓN ARMÓNICA

Los resultados del análisis de distorsión armónica en la red eléctrica de estudio fueron mostrados en forma resumida en el texto del informe (Capítulo IV). La totalidad de resultados del estudio de flujo de armónicos puede ser agrupada en lo siguiente:

- ◆ Resultados de tensiones armónicas individuales y THD_V ,
- ◆ Resultados de corrientes armónicas individuales y THD_I .

En las siguientes Tablas son mostrados todos los resultados de interés del estudio de flujo de armónicos.

Tensiones armónicas individuales y THD_V

Los resultados de tensiones armónicas individuales y THD_V son obtenidos en cada una de las siguientes barras de la red eléctrica de estudio:

- ◆ Barra de 60 kV (PAC),
- ◆ Barras de 22,9 kV (red de distribución primaria),
- ◆ Barras de 0,46 kV (plantas industriales),
- ◆ Barras de 0,38 kV (clientes en BT).

Los resultados son presentados en la Tabla N° B.1.

Tabla N° B.1 Resultados de tensiones armónicas individuales y THD_v

Nombre Barra	Nivel de Tensión	THD (%)	f (Hz)	V (V)	u (%)
Barra 60-1	60 kV	1.29	300	201.525	0.34
			420	273.825	0.46
			660	666.081	1.11
			780	185.365	0.31
			1020	51.917	0.09
			1140	31.918	0.05
			1380	16.907	0.03
			1500	11.829	0.02
			1740	8.218	0.01
			1860	6.356	0.01
			2100	4.817	0.01
2220	4.002	0.01			
Barra 23-1	22.9 kV	6.74	300	401.995	1.76
			420	546.314	2.39
			660	1329.058	5.8
			780	369.874	1.62
			1020	103.597	0.45
			1140	63.69	0.28
			1380	33.738	0.15
			1500	23.604	0.1
			1740	16.399	0.07
			1860	12.684	0.06
			2100	9.612	0.04
2220	7.986	0.03			
Barra 23-10	22.9 kV	8.39	300	511.686	2.23
			420	690.533	3.02
			660	1650.512	7.21
			780	454.013	1.98
			1020	123.388	0.54
			1140	74.433	0.33
			1380	37.607	0.16
			1500	25.554	0.11
			1740	16.514	0.07
			1860	12.21	0.05
			2100	8.253	0.04
2220	6.37	0.03			
Barra 23-2	22.9 kV	8.39	300	501.865	2.19
			420	681.225	2.97
			660	1655.399	7.23
			780	460.486	2.01
			1020	128.853	0.56
			1140	79.175	0.35
			1380	41.89	0.18
			1500	29.288	0.13
			1740	20.318	0.09
			1860	15.701	0.07
			2100	11.877	0.05
2220	9.858	0.04			
Barra 23-3	22.9 kV	8.39	300	506.345	2.21
			420	685.441	2.99
			660	1652.619	7.22
			780	457.278	2
			1020	126.211	0.55
			1140	76.89	0.34
			1380	39.831	0.17
			1500	27.492	0.12
			1740	18.487	0.08
			1860	14.019	0.06
			2100	10.127	0.04
2220	8.171	0.04			

Tabla N° B.1 Resultados de tensiones armónicas individuales y THD_V (continuación)

Nombre Barra	Nivel de Tensión	THD (%)	f (Hz)	V (V)	u (%)
Barra 23-4	22.9 kV	8.39	300	506.042	2.21
			420	685.079	2.99
			660	1651.992	7.21
			780	457.146	2
			1020	126.202	0.55
			1140	76.894	0.34
			1380	39.845	0.17
			1500	27.507	0.12
			1740	18.504	0.08
			1860	14.035	0.06
			2100	10.143	0.04
2220	8.186	0.04			
Barra 23-5	22.9 kV	6.73	300	401.604	1.75
			420	545.848	2.38
			660	1328.417	5.8
			780	369.787	1.61
			1020	103.637	0.45
			1140	63.739	0.28
			1380	33.793	0.15
			1500	23.654	0.1
			1740	16.453	0.07
			1860	12.733	0.06
			2100	9.663	0.04
2220	8.034	0.04			
Barra 23-6	22.9 kV	6.73	300	401.364	1.75
			420	545.56	2.38
			660	1327.914	5.8
			780	369.68	1.61
			1020	103.63	0.45
			1140	63.742	0.28
			1380	33.805	0.15
			1500	23.667	0.1
			1740	16.468	0.07
			1860	12.747	0.06
			2100	9.679	0.04
2220	8.049	0.04			
Barra 23-7	22.9 kV	10.16	300	607.018	2.65
			420	822.312	3.59
			660	2004.909	8.76
			780	559.627	2.44
			1020	158.088	0.69
			1140	97.725	0.43
			1380	52.468	0.23
			1500	37.005	0.16
			1740	26.206	0.11
			1860	20.497	0.09
			2100	15.948	0.07
2220	13.455	0.06			
Barra 23-8	22.9 kV	11.95	300	714.965	3.12
			420	965.531	4.22
			660	2356.637	10.29
			780	659.158	2.88
			1020	187.327	0.82
			1140	116.245	0.51
			1380	62.994	0.28
			1500	44.672	0.2
			1740	32.039	0.14
			1860	25.241	0.11
			2100	19.964	0.09
2220	16.999	0.07			

Tabla N° B.1 Resultados de tensiones armónicas individuales y THD_v (continuación)

Nombre Barra	Nivel de Tensión	THD (%)	f (Hz)	V (V)	u (%)
Barra 23-9	22.9 kV	12.07	300	722.228	3.15
			420	975.138	4.26
			660	2380.229	10.39
			780	665.842	2.91
			1020	189.298	0.83
			1140	117.497	0.51
			1380	63.71	0.28
			1500	45.196	0.2
			1740	32.441	0.14
			1860	25.569	0.11
			2100	20.245	0.09
2220	17.249	0.08			
Barra 460-1	0.46 kV	16.12	300	40.137	8.73
			420	44.17	9.6
			660	31.962	6.95
			780	6.681	1.45
			1020	12.057	2.62
			1140	11.32	2.46
			1380	10.995	2.39
			1500	9.767	2.12
			1740	10.186	2.21
			1860	9.417	2.05
			2100	9.873	2.15
2220	9.533	2.07			
Barra 460-2	0.46 kV	16.05	300	39.998	8.7
			420	43.983	9.56
			660	31.538	6.86
			780	6.812	1.48
			1020	12.097	2.63
			1140	11.346	2.47
			1380	11.009	2.39
			1500	9.778	2.13
			1740	10.194	2.22
			1860	9.424	2.05
			2100	9.878	2.15
2220	9.538	2.07			
Barra 380-1	0.38 kV	7.71	300	7.745	2.04
			420	10.426	2.74
			660	25.174	6.62
			780	6.993	1.84
			1020	1.954	0.51
			1140	1.2	0.32
			1380	0.6346	0.17
			1500	0.4436	0.12
			1740	0.3076	0.08
			1860	0.2377	0.06
			2100	0.1798	0.05
2220	0.1492	0.04			
Barra 380-2	0.38 kV	7.7	300	7.814	2.06
			420	10.491	2.76
			660	25.132	6.61
			780	6.944	1.83
			1020	1.914	0.5
			1140	1.165	0.31
			1380	0.6034	0.16
			1500	0.4164	0.11
			1740	0.2799	0.07
			1860	0.2122	0.06
			2100	0.1533	0.04
2220	0.1237	0.03			

Tabla N° B.1 Resultados de tensiones armónicas individuales y THD_v (continuación)

Nombre Barra	Nivel de Tensión	THD (%)	f (Hz)	V (V)	u (%)
Barra 380-3	0.38 kV	7.7	300	7.809	2.06
			420	10.485	2.76
			660	25.123	6.61
			780	6.942	1.83
			1020	1.914	0.5
			1140	1.165	0.31
			1380	0.6036	0.16
			1500	0.4166	0.11
			1740	0.2802	0.07
			1860	0.2125	0.06
			2100	0.1535	0.04
2220	0.1239	0.03			
Barra 380-4	0.38 kV	9.33	300	9.368	2.47
			420	12.586	3.31
			660	30.489	8.02
			780	8.499	2.24
			1020	2.397	0.63
			1140	1.481	0.39
			1380	0.7948	0.21
			1500	0.5605	0.15
			1740	0.3968	0.1
			1860	0.3103	0.08
			2100	0.2414	0.06
2220	0.2037	0.05			
Barra 380-5	0.38 kV	10.42	300	20.657	5.44
			420	23.108	6.08
			660	20.186	5.31
			780	2.648	0.7
			1020	5.489	1.44
			1140	5.253	1.38
			1380	5.189	1.37
			1500	4.63	1.22
			1740	4.855	1.28
			1860	4.496	1.18
			2100	4.726	1.24
2220	4.568	1.2			
Barra 380-6	0.38 kV	6.18	300	6.198	1.63
			420	8.354	2.2
			660	20.202	5.32
			780	5.616	1.48
			1020	1.571	0.41
			1140	0.9661	0.25
			1380	0.5119	0.13
			1500	0.3583	0.09
			1740	0.2491	0.07
			1860	0.1928	0.05
			2100	0.1463	0.04
2220	0.1216	0.03			
Barra 380-7	0.38 kV	6.18	300	6.194	1.63
			420	8.35	2.2
			660	20.194	5.31
			780	5.614	1.48
			1020	1.571	0.41
			1140	0.9661	0.25
			1380	0.5121	0.13
			1500	0.3584	0.09
			1740	0.2494	0.07
			1860	0.193	0.05
			2100	0.1465	0.04
2220	0.1218	0.03			

Corrientes armónicas individuales y THD_I

Los resultados de corrientes armónicas individuales y THD_V son obtenidos en cada elemento de la red eléctrica de estudio. Estos son presentados en la Tabla N° B.2.

Tabla N° B.2 Resultados de corrientes armónicas individuales y THD_I

Nombre Elemento	Tipo	f (Hz)	I _l (A)	I _l áng (deg)
Carga RP1-1	Carga	300	2.319	21.17
		420	2.394	11.19
		660	3.865	228.43
		780	0.9178	202.87
		1020	0.1982	194.01
		1140	0.1093	192.14
		1380	0.0479	189.8
		1500	0.0309	189.02
		1740	0.0185	187.87
		1860	0.0134	187.45
		2100	0.009	186.81
2220	0.007	186.57		
Carga RP1-2	Carga	300	2.339	20.96
		420	2.408	11.11
		660	3.858	228.52
		780	0.9114	203.02
		1020	0.1942	194.3
		1140	0.1061	192.49
		1380	0.0456	190.3
		1500	0.029	189.6
		1740	0.0168	188.65
		1860	0.0119	188.34
		2100	0.0076	187.99
2220	0.0058	187.93		
Carga RP1-3	Carga	300	2.338	20.96
		420	2.407	11.11
		660	3.857	228.52
		780	0.9111	203.02
		1020	0.1942	194.29
		1140	0.1061	192.48
		1380	0.0456	190.29
		1500	0.029	189.59
		1740	0.0168	188.64
		1860	0.012	188.33
		2100	0.0077	187.97
2220	0.0058	187.92		
Carga RP1-4	Carga	300	2.804	16.77
		420	2.889	7.98
		660	4.681	226.29
		780	1.115	201
		1020	0.2432	192.47
		1140	0.1349	190.7
		1380	0.06	188.49
		1500	0.039	187.74
		1740	0.0238	186.62
		1860	0.0175	186.19
		2100	0.012	185.51
2220	0.0096	185.24		

Tabla N° B.2 Resultados de corrientes armónicas individuales y THD_I (continuación)

Nombre Elemento	Tipo	f (Hz)	I _I (A)	I _I áng (deg)
Carga RP2-1	Carga	300	1.855	24.21
		420	1.918	13.35
		660	3.102	229.8
		780	0.737	204.02
		1020	0.1594	194.88
		1140	0.088	192.91
		1380	0.0387	190.43
		1500	0.0249	189.59
		1740	0.015	188.36
		1860	0.0108	187.9
		2100	0.0073	187.2
2220	0.0057	186.94		
Carga RP2-2	Carga	300	1.854	24.21
		420	1.917	13.35
		660	3.1	229.8
		780	0.7368	204.02
		1020	0.1594	194.88
		1140	0.088	192.91
		1380	0.0387	190.43
		1500	0.0249	189.58
		1740	0.015	188.35
		1860	0.0109	187.89
		2100	0.0073	187.19
2220	0.0058	186.92		
Iluminación A	Carga	300	4.228	24.3
		420	3.569	15.4
		660	1.727	245.96
		780	0.3086	-3.98
		1020	0.4306	8.8
		1140	0.3628	8.24
		1380	0.2923	7
		1500	0.2392	6.48
		1740	0.2155	5.62
		1860	0.1865	5.27
		2100	0.1733	4.68
2220	0.1584	4.43		
Iluminación B	Carga	300	4.214	24.39
		420	3.554	15.49
		660	1.704	246.38
		780	0.3147	-3.64
		1020	0.432	8.8
		1140	0.3637	8.23
		1380	0.2927	7
		1500	0.2395	6.48
		1740	0.2156	5.62
		1860	0.1866	5.27
		2100	0.1734	4.68
2220	0.1585	4.43		
Línea RP1-I	Línea	300	16.404	175.77
		420	15.921	172.13
		660	24.608	35.89
		780	5.788	12.19
		1020	1.236	5.78
		1140	0.6784	4.76
		1380	0.2955	3.69
		1500	0.1897	3.39
		1740	0.113	3.01
		1860	0.0815	2.9
		2100	0.0543	2.78
2220	0.0425	2.76		

Tabla N° B.2 Resultados de corrientes armónicas individuales y THD_I (continuación)

Nombre Elemento	Tipo	f (Hz)	I _I (A)	I _I áng (deg)
Línea RP1-2	Línea	300	0.6701	-2.55
		420	0.4483	-2.59
		660	0.2833	8.25
		780	0.2126	1.56
		1020	0.1275	0.26
		1140	0.098	0.11
		1380	0.0725	-0.02
		1500	0.058	-0.06
		1740	0.0508	-0.09
		1860	0.0436	-0.11
		2100	0.0402	-0.13
		2220	0.0366	-0.13
Línea RP1-3	Línea	300	0.0388	200.96
		420	0.0399	191.11
		660	0.064	48.52
		780	0.0151	23.02
		1020	0.0032	14.29
		1140	0.0018	12.48
		1380	0.0008	10.29
		1500	0.0005	9.59
		1740	0.0003	8.64
		1860	0.0002	8.33
		2100	0.0001	7.97
		2220	0.0001	7.92
Línea RP1-4	Línea	300	15.747	-4.24
		420	15.471	-7.96
		660	24.767	215.64
		780	5.961	191.85
		1020	1.347	185.3
		1140	0.7651	184.2
		1380	0.3604	182.98
		1500	0.2419	182.6
		1740	0.159	182.05
		1860	0.1211	181.85
		2100	0.091	181.53
		2220	0.076	181.4
Línea RP1-5	Línea	300	15.782	-4.17
		420	15.5	-7.91
		660	24.776	215.68
		780	5.957	191.89
		1020	1.343	185.34
		1140	0.7617	184.24
		1380	0.3577	183.01
		1500	0.2397	182.63
		1740	0.157	182.08
		1860	0.1194	181.88
		2100	0.0894	181.56
		2220	0.0746	181.42
Línea RP1-6	Línea	300	7.9	175.79
		420	7.769	172.04
		660	12.463	35.6
		780	3.004	11.8
		1020	0.6812	5.21
		1140	0.3877	4.1
		1380	0.1836	2.84
		1500	0.1236	2.44
		1740	0.0819	1.87
		1860	0.0627	1.64
		2100	0.0476	1.29
		2220	0.04	1.14

Tabla N° B.2 Resultados de corrientes armónicas individuales y THD_I (continuación)

Nombre Elemento	Tipo	f (Hz)	I _I (A)	I _I áng (deg)
Línea RP1-7	Línea	300	0.7283	0
		420	0.5007	0
		660	0.2769	0
		780	0.2162	0
		1020	0.1328	0
		1140	0.1024	0
		1380	0.0759	0
		1500	0.0607	0
		1740	0.0531	0
		1860	0.0455	0
		2100	0.0417	0
2220	0.0379	0		
Línea RP2-1	Línea	300	0.0569	206.89
		420	0.0542	197.43
		660	0.0654	58.42
		780	0.0121	37.21
		1020	0.001	67.78
		1140	0.0006	136.7
		1380	0.0008	172.8
		1500	0.0008	176.38
		1740	0.0008	179.36
		1860	0.0007	180.08
		2100	0.0007	180.94
2220	0.0006	181.23		
Línea RP2-2	Línea	300	0.0308	204.21
		420	0.0318	193.35
		660	0.0514	49.8
		780	0.0122	24.02
		1020	0.0026	14.88
		1140	0.0015	12.91
		1380	0.0006	10.43
		1500	0.0004	9.58
		1740	0.0002	8.35
		1860	0.0002	7.89
		2100	0.0001	7.19
2220	0.0001	6.92		
Motor A	Máquina Asíncrona	300	294.528	0
		420	202.488	0
		660	111.982	0
		780	87.438	0
		1020	53.69	0
		1140	41.418	0
		1380	30.68	0
		1500	24.544	0
		1740	21.476	0
		1860	18.408	0
		2100	16.874	0
2220	15.34	0		
Motor B	Máquina Asíncrona	300	294.528	0
		420	202.488	0
		660	111.982	0
		780	87.438	0
		1020	53.69	0
		1140	41.418	0
		1380	30.68	0
		1500	24.544	0
		1740	21.476	0
		1860	18.408	0
		2100	16.874	0
2220	15.34	0		

Tabla N° B.2 Resultados de corrientes armónicas individuales y THD_I (continuación)

Nombre Elemento	Tipo	f (Hz)	I _l (A)	I _l áng (deg)
Motor C	Máquina Asíncrona	300	43.891	0
		420	30.175	0
		660	16.688	0
		780	13.03	0
		1020	8.001	0
		1140	6.172	0
		1380	4.572	0
		1500	3.658	0
		1740	3.2	0
		1860	2.743	0
		2100	2.515	0
		2220	2.286	0
PAC - SEIN	Equivalente de red	300	6.244	-4.33
		420	6.062	-7.95
		660	9.385	215.84
		780	2.21	192.13
		1020	0.4733	185.74
		1140	0.2604	184.72
		1380	0.1139	183.66
		1500	0.0733	183.36
		1740	0.0439	182.98
		1860	0.0318	182.87
		2100	0.0213	182.75
		2220	0.0168	182.73
TR-DIST RP1-1	Transformador 2 dev	300	0.0385	21.17
		420	0.0397	11.19
		660	0.0641	228.43
		780	0.0152	202.87
		1020	0.0033	194.01
		1140	0.0018	192.14
		1380	0.0008	189.8
		1500	0.0005	189.02
		1740	0.0003	187.87
		1860	0.0002	187.45
		2100	0.0001	186.81
		2220	0.0001	186.57
TR-DIST RP1-2	Transformador 2 dev	300	0.0388	20.96
		420	0.04	11.11
		660	0.064	228.52
		780	0.0151	203.02
		1020	0.0032	194.3
		1140	0.0018	192.49
		1380	0.0008	190.3
		1500	0.0005	189.6
		1740	0.0003	188.65
		1860	0.0002	188.34
		2100	0.0001	187.99
		2220	0.0001	187.93
TR-DIST RP1-3	Transformador 2 dev	300	0.0388	20.96
		420	0.0399	11.11
		660	0.064	228.52
		780	0.0151	203.02
		1020	0.0032	194.29
		1140	0.0018	192.48
		1380	0.0008	190.29
		1500	0.0005	189.59
		1740	0.0003	188.64
		1860	0.0002	188.33
		2100	0.0001	187.97
		2220	0.0001	187.92

Tabla N° B.2 Resultados de corrientes armónicas individuales y THD_I (continuación)

Nombre Elemento	Tipo	f (Hz)	I _I (A)	I _I áng (deg)
TR-DIST RP1-4	Transformador 2 dev	300	0.0465	16.77
		420	0.0479	7.98
		660	0.0777	226.29
		780	0.0185	201
		1020	0.004	192.47
		1140	0.0022	190.7
		1380	0.001	188.49
		1500	0.0006	187.74
		1740	0.0004	186.62
		1860	0.0003	186.19
		2100	0.0002	185.51
2220	0.0002	185.24		
TR-DIST RP1-5	Transformador 2 dev	300	0.7283	180
		420	0.5007	180
		660	0.2769	180
		780	0.2162	180
		1020	0.1328	180
		1140	0.1024	180
		1380	0.0759	180
		1500	0.0607	180
		1740	0.0531	180
		1860	0.0455	180
		2100	0.0417	180
2220	0.0379	180		
TR-DIST RP2-1	Transformador 2 dev	300	0.0308	24.21
		420	0.0318	13.35
		660	0.0515	229.8
		780	0.0122	204.02
		1020	0.0026	194.88
		1140	0.0015	192.91
		1380	0.0006	190.43
		1500	0.0004	189.59
		1740	0.0002	188.36
		1860	0.0002	187.9
		2100	0.0001	187.2
2220	0.0001	186.94		
TR-DIST RP2-2	Transformador 2 dev	300	0.0308	24.21
		420	0.0318	13.35
		660	0.0514	229.8
		780	0.0122	204.02
		1020	0.0026	194.88
		1140	0.0015	192.91
		1380	0.0006	190.43
		1500	0.0004	189.58
		1740	0.0002	188.35
		1860	0.0002	187.89
		2100	0.0001	187.19
2220	0.0001	186.92		
TR-POT 23-1	Transformador 2 dev	300	5.966	179.66
		420	4.085	179.73
		660	2.313	180.8
		780	1.788	180.01
		1020	1.093	179.93
		1140	0.8427	179.93
		1380	0.6237	179.93
		1500	0.4989	179.94
		1740	0.4364	179.94
		1860	0.374	179.95
		2100	0.3428	179.95
2220	0.3116	179.95		

Tabla N° B.2 Resultados de corrientes armónicas individuales y THD_I (continuación)

Nombre Elemento	Tipo	f (Hz)	I ₁ (A)	I ₁ áng (deg)
TR-POT 23-2	Transformador 2 dev	300	5.966	179.66
		420	4.086	179.73
		660	2.313	180.79
		780	1.788	180.01
		1020	1.093	179.93
		1140	0.8427	179.93
		1380	0.6237	179.93
		1500	0.4989	179.94
		1740	0.4364	179.94
		1860	0.374	179.95
		2100	0.3428	179.95
2220	0.3116	179.95		
TR-POT 60-1	Transformador 2 dev	300	6.244	175.67
		420	6.062	172.05
		660	9.385	35.84
		780	2.21	12.13
		1020	0.4733	5.74
		1140	0.2604	4.72
		1380	0.1139	3.66
		1500	0.0733	3.36
		1740	0.0439	2.98
		1860	0.0318	2.87
		2100	0.0213	2.75
2220	0.0168	2.73		

BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE Report, "The Effects of Power System Harmonics on Power System Equipment and Loads", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-104, No. 9, pp. 2555-2563, Sep. 1985.
- [2] E. J. Currence, J. E. Plizga and H. N. Nelson, "Harmonic Resonance at a Medium-Sized Industrial Plant", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, NO. 4, pp. 682-690, July/Aug., 1995.
- [3] J. K. Phipps, J. P. Nelson and P. K. Sen, "Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, No. 2, pp. 476-484, Mar./Apr. 1994..
- [4] J. Arrillaga, D. A. Bradley and P. S. Bodger, *Power System Harmonics*. Chichester UK: John Wiley & Sons, 1985.
- [5] IEEE Standard 519-1992 (recognized as an American National Standard (ANSI)), "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", New York, 1993.
- [6] J. K. Phipps, J. P. Nelson, Pankaj K. Sen, "Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, No. 2, pp. 476, March/April 1994.
- [7] D. Andrews, M. T. Bishop, J. F. Witte, "Harmonic Measurements, Analysis, and Power Factor Correction in a Modern Steel Manufacturing Facility," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, NO. 3, pp. 617-624, May/June, 1996.
- [8] IEEE Standard C57.110-1998, "Recommended Practices for Establishing Transformer Capability when Supplying Nonsinusoidal Load Current", New York: IEEE Press, 1998.
- [9] IEEE Standard 399-1997, "IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Análisis", New York: IEEE Press, 1997.
- [10] W. Xu, Harmonic modeling and simulation task force reference documents. Disponible en internet:
<http://www.ee.ualberta.ca/pwrsys/IEEE/download.html>

- [11] D. Xia, and G.T. Heydt, "Harmonic power flow studies part I – Formulation and solution", *IEEE Transactions on power apparatus and systems*. Vol PAS 101 N°6, Jun 1982.
- [12] L. W. Pierce, "Transformer Design and Application Consideration for Nonsinusoidal Load Currents," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, NO. 3, pp. 633-645, May/June, 1996.
- [13] J F Ravot and J Kreuzer, "Losses in rectifier transformers: Factory test losses in comparison with actual operating losses," in Proc. CIGRE, Paper 12-06, 1988.
- [14] G. W. Massey, "Power Distribution Systems Design for Operation Under Nonsinusoidal Load Conditions," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 31, NO. 3, pp. 513-519, May/June, 1995.
- [15] D.A. Dini, "Testing and rating of transformers for use with non-linear loads", Underwriters Laboratories Inc., Northbrook.
- [16] M. Waller, Harmonics. Indianapolis: PROMPT Publications, Inc., 1994.
- [17] INDECO, Catálogo de Cables de Energía, Lima-Perú.
Disponible en internet: <http://www.indeco.com.pe/>
- [18] Ministerio de Energía y Minas del Perú, D.S N° 020-97-EM, Norma Técnica de Calidad de los Servicios Eléctricos, Lima - Perú, 1997.