



300617

15  
2ej

**UNIVERSIDAD LA SALLE**

**ESCUELA DE INGENIERIA**

INCORPORADA A LA UNAM

**ANALISIS Y SOLUCION DE UN PROBLEMA DE  
DISTORSION ARMONICA EN UNA PLANTA INDUSTRIAL**

**TESIS PROFESIONAL**  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

PRESENTA

**LEOPOLDO ALBERTO RODRIGUEZ OLIVE**

**ASESOR: ING. MARIA ENNA CARVAJAL CANTILLO**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

300617



**UNIVERSIDAD LA SALLE**

---

**ESCUELA DE INGENIERIA**

**INCORPORADA A LA UNAM**

**ANALISIS Y SOLUCION DE UN PROBLEMA DE  
DISTORSION ARMONICA EN UNA PLANTA INDUSTRIAL**

**TESIS PROFESIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**PRESENTA**

**LEOPOLDO ALBERTO RODRIGUEZ OLIVE**

**ASESOR: ING. MARIA ENNA CARVAJAL CANTILLO**



300617

**UNIVERSIDAD LA SALLE**

**ESCUELA DE INGENIERIA**

**INCORPORADA A LA UNAM**

**ANALISIS Y SOLUCION DE UN PROBLEMA DE  
DISTORSION ARMONICA EN UNA PLANTA INDUSTRIAL**

**TESIS PROFESIONAL  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE**

**INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA**

**PRESENTA**

**LEOPOLDO ALBERTO RODRIGUEZ OLIVE**

**ASESOR: ING. MARIA ENNA CARVAJAL CANTILLO**

O.A.M.G.D.  
A mis padres a quienes tanto debo  
A mi familia  
A la memoria de mi abuelita Rita  
A mis grandes amigos  
A Marcela

## INDICE

| <b>TITULO</b>   | <b>Página</b> |
|---|---------------|
| Introducción  | 1             |
| Capítulo 1: Definición de armónicas   | 4             |
| Capítulo 2: Causas y fuentes de generación de armónicas                                   | 11            |
| Capítulo 3: Consecuencias de las armónicas  | 17            |
| Capítulo 4: Medición de armónicas   | 24            |
| Capítulo 5: Técnicas de supresión de armónicas  | 31            |
| Capítulo 6: Análisis y solución de un problema real de armónicas en una Planta Industrial | 37            |
| Conclusiones  | 67            |
| Bibliografía  | 69            |
| Apéndice 1: Gráficas de comportamiento eléctrico en equipos                               | 70            |
| Apéndice 2: Norma IEEE-519-1992   | 91            |

## **Introducción:**

El presente trabajo está dedicado al análisis de los disturbios generados en los sistemas eléctricos en instalaciones de tipo industrial principalmente, debidos a la presencia de ondas de distorsión armónica.

En años recientes, la calidad de potencia en instalaciones eléctricas, especialmente en instalaciones de tipo industrial y comercial, se ha convertido en un aspecto de muy especial importancia para los responsables de las mismas, ya que del suministro eléctrico confiable depende el éxito de programas de producción y calidad de servicios.

Aun las empresas o instituciones que tienen un excepcional cuidado por su calidad, no sólo en cuanto a su producto o servicio final, sino de todos sus componentes internos e insumos, incluyendo su instalación eléctrica, se han empezado a enfrentar a problemas aparentemente inexplicables que se presentan en sus sistemas eléctricos y esto es debido a la presencia en ellos de disturbios que la gran mayoría de los equipos convencionales de medición eléctrica no registran por no estar diseñados para ese propósito.

Así, las personas responsables de las empresas, de su mantenimiento o de un proceso, se han empezado a enfrentar a problemas tales como la operación de dispositivos de protección aun cuando aparentemente no hay fallas o sobrecargas en los equipos. Igualmente se encuentran con dispositivos o componentes dañados o destruidos y otro tipo de situaciones que más adelante se tratarán a detalle.

Una de las principales causas de este tipo de fallas es la presencia en los sistemas eléctricos de las ondas de distorsión armónica en voltaje y en corriente.

Tradicionalmente se ha considerado que en los sistemas eléctricos las normas y procedimientos a seguir, han variado muy poco desde 50 años o más hasta la fecha. Sin embargo, hoy en día esta idea ya no es válida. Verdaderamente el diseño y cuidado de una instalación eléctrica se ha convertido en un proceso muy dinámico y particular para cada caso, siendo necesario un análisis y diseño específicamente aplicado al tipo de carga del sistema en cuestión.

En el pasado, los equipos se diseñaban con el criterio de una larga vida y resistencia contra toda clase de disturbios. Hoy en día, en todas las áreas de la actividad humana ha habido una evolución hacia una mayor eficiencia. La competencia entre fabricantes, ha propiciado que para ser competitivo en el mercado nacional y mundial, se deba ofrecer un producto con la mayor cantidad de atributos al menor costo posible. Esto hace necesario que la fabricación de los productos se lleve a cabo con la menor cantidad de materiales y el mínimo número de pasos de fabricación.

En consecuencia, cada parte que integra a un equipo, está diseñada para características de operación y requerimientos muy específicos. Cuando no se cumple con estos requerimientos se afecta o daña irreversiblemente a los equipos.

Los equipos diseñados con estos criterios, están pensados considerando que su operación se llevará a cabo en sistemas que consideran de manera integral esos mismos criterios.

Esto significa que un equipo se ha diseñado pensando en que el suministro eléctrico será de la más alta confiabilidad debido a que las empresas suministradoras también deben haber evolucionado y a la instalación eléctrica de la planta en cuestión, debe ser la más adecuada para el equipo.

De no cumplirse con esas condiciones, el equipo seguramente se verá afectado en su operación y en su vida útil.

Los problemas que se presentan en un sistema eléctrico pueden deberse a deficiencias en el suministro de la Compañía Suministradora. Sin embargo, esta no es la única razón posible, sino que una parte muy importante de los problemas pueden deberse a la influencia de la carga que se tiene instalada que afecta al resto del sistema o a un mal diseño de la instalación.

Los disturbios en un sistema eléctrico pueden ser también la consecuencia de los problemas que existen en el sistema eléctrico de otro u otros usuarios de la misma red eléctrica, pero para determinar con certeza el origen de los disturbios y su solución debe llevarse a cabo un estudio cuidadoso y bien planeado del sistema.

Este trabajo plantea una metodología a seguir para llevar cabo un estudio de este tipo en el caso particular de una Planta Industrial productora de autopartes. Se detalla la forma de realización del análisis, posteriormente se interpretan los resultados y se propone una solución integral al problema. Finalmente, se reportan los resultados de la implementación de las soluciones propuestas.

Con este fin, el trabajo se ha dividido en las siguientes partes con el contenido que a continuación se indica:

**Capítulo 1: Definición de armónicas** - Se explica brevemente qué son las armónicas, cuáles son los conceptos básicos y fundamentos matemáticos que se requieren para su análisis, con especial atención en las Series de Fourier. También se hacen algunas definiciones de términos como la distorsión armónica total, factor de potencia de desplazamiento, entre otros.

**Capítulo 2: Causas y fuentes de generación de armónicas** - En este capítulo se explica el origen de las armónicas, cuáles son los equipos y sistemas que las producen y cómo es que las producen.

**Capítulo 3: Consecuencias de las armónicas** - Se describen los problemas que normalmente se producen cuando existen distorsiones armónicas en los sistemas eléctricos y en diversos tipos de equipos de manera particular.

**Capítulo 4: Medición de armónicas** - Se describe el tipo de instrumentación necesario para medir armónicas y se proponen los pasos a seguir para hacer un análisis completo a través de un sistema eléctrico.

**Capítulo 5: Técnicas de supresión de armónicas** - Se describen brevemente los tipos más importantes de equipos que existen para la supresión de armónicas, detallándose lo relacionado con los filtros consistentes en un arreglo capacitor-bobina siendo que estos fueron los empleados para la solución del caso tratado.



**Capítulo 6: Análisis y solución de un problema real de armónicas en una Planta Industrial** - Se plantea la situación que se presentó en una planta industrial, la manera en que se planeó el análisis, cómo se llevó a cabo, los resultados obtenidos, las conclusiones a que se llegaron, el planteamiento de una solución integral y los resultados obtenidos después de implementada la solución.

**Conclusiones** - en base a la experiencia obtenida en el caso analizado, se proponen conclusiones aplicables a cualquier análisis y solución que se lleven a cabo en cualquier sistema eléctrico.

## Capítulo 1

### Conceptos y definiciones.

Los equipos que generan energía eléctrica entregan a las líneas de suministro una onda de voltaje de forma senoidal. Idealmente, esta onda es una senoide pura. Teóricamente, esta misma forma senoidal de voltaje es entregada a los consumidores finales.

En la realidad, los equipos y condiciones de la generación, transmisión, transformación y utilización de la energía no son las ideales y las ondas de voltaje que reciben los consumidores finales no son perfectamente senoidales.

Una onda senoidal distorsionada se puede representar como la suma de múltiples ondas senoidales.

Este estudio es posible gracias al análisis realizado mediante el uso de las series de Fourier y más adelante será tratado este tema a detalle.

El problema de la presencia de ondas armónicas en los sistemas eléctricos no es un tema nuevo, ya que desde los inicios de la utilización de la electricidad y el diseño de equipos eléctricos y de comunicaciones han generado distorsiones que llevaron a la implementación de normas de diseño para los sistemas con hornos de arco, soldadoras eléctricas, máquinas síncronas, equipos de telefonía, instalación de capacitores y otras. Se puede decir que aunque las armónicas siempre han estado presentes, no alcanzaban niveles importantes que generaran disturbios apreciables por el usuario.

Recientemente, la presencia de armónicas se ha presentado como un problema importante y creciente, ya que los equipos nuevos integran en su construcción una gran cantidad de cargas no lineales que constituyen la principal fuente de generación de armónicas, a la vez de que estos equipos son de los más sensibles a la presencia de las mismas armónicas.

Los convertidores estáticos de potencia, presentes en los controladores de velocidad variable para motores, en equipos electrónicos como computadoras, controladores, equipos de control numérico o instrumentación y en otras muchas aplicaciones, constituyen las principales cargas no lineales que generan a las armónicas.

La presencia de capacitores en los sistemas eléctricos constituyen un problema adicional, ya que éstos, en combinación con la inductancia propia del sistema de distribución, forman un circuito tipo RLC que es resonante a ciertas frecuencias, por lo que grandes corrientes y voltajes pueden desarrollarse a estas frecuencias, operando protecciones o quemando dispositivos así como accionando los fusibles de presión de los capacitores quedando estos últimos inservibles.

Muchos equipos cuentan con circuitos que requieren de un temporizador el cual está sincronizado con los cruces por cero de la forma de onda, de tal manera que si esa onda se distorsiona al grado de que en el mismo lapso de tiempo ocurren más cruces por cero de lo esperado, el resultado será un funcionamiento inapropiado de los equipos.

#### Conceptos básicos:

Las armónicas se presentan tanto en voltaje como en corriente.

La demanda de corriente de cargas no lineales genera una onda de corriente distorsionada. Esta corriente distorsionada, al pasar a través de una impedancia, bien sea la propia de los conductores o la de una carga, genera una caída de voltaje con una forma de onda distorsionada, generándose una distorsión a la onda original de voltaje.

La distorsión de una onda de voltaje afecta a todos los equipos instalados en un sistema.

Los diferentes tipos de cargas tienen como consecuencia diferentes tipos de armónicas, por lo que el análisis individual de cada una de las armónicas que genera un equipo es importante, y por lo tanto, la información que proporciona el valor de distorsión armónica total, aunque es una buena primer aproximación, no es suficiente para un análisis apropiado.

#### **- Armónica:**

Una onda armónica se puede definir como:

Una componente senoidal de onda periódica o de una cantidad que tiene una frecuencia que es un múltiplo entero de la frecuencia fundamental del sistema.

De esta manera, se puede interpretar que las armónicas son voltajes o corrientes que existen en un sistema eléctrico en frecuencias diferentes a la frecuencia de la onda fundamental.

La onda fundamental es la onda correspondiente a la frecuencia de 60Hz en voltaje o en corriente y que generalmente es la que presenta el nivel más importante en el espectro de frecuencias.

Las armónicas se presentan en frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia de la onda fundamental, de tal manera que una armónica de orden  $n$  se presentará a una frecuencia de  $n$  veces la frecuencia de 60Hz de la onda fundamental.

$$f_{\text{armónica}} = n \cdot 60\text{Hz}$$

Donde  $n$  = orden de la armónica  
 $f$  = frecuencia de la armónica

Cada armónica difiere de la fundamental en magnitud y en fase ya que presenta un desplazamiento respecto a la misma fundamental.

La forma de onda distorsionada se repite a sí misma con cierta frecuencia.

Las armónicas son un fenómeno de estado estable.

Las armónicas se entienden como cualquier distorsión de una onda senoidal pura de voltaje o de corriente a cualquier frecuencia.

Para el presente trabajo se considerará como frecuencia de referencia para una onda senoidal pura la de 60Hz por ser la que por norma debe entregar

la Compañía Suministradora de Electricidad a todos los usuarios en nuestro país.

Debe entenderse que los transitorios que se presentan en los sistemas eléctricos no son armónicas, ya que estos no se presentan en el estado estable, son intermitentes y ocasionales. Este tipo de perturbaciones, además son de tipo impulsivo u oscilatorio y su frecuencia tiende a ser de MHz.

#### **- Análisis mediante las Series de Fourier y análisis Espectral:**

El análisis de los fenómenos de distorsión armónica aplicando las Series de Fourier es de gran utilidad.

Una forma de onda distorsionada puede ser representada mediante la suma de múltiples formas de onda a diferentes frecuencias.

La forma de onda distorsionada se repite a sí misma con una frecuencia fundamental.

Cada **frecuencia múltiplo** es lo que se denomina como **armónica**.

Cada armónica difiere de la onda fundamental en magnitud y en ángulo de fase.

En el estado estable, están muy bien definidas fórmulas y relaciones que permiten modelar la respuesta de los circuitos eléctricos.

Por el principio de superposición se sabe que para el voltaje y la corriente es posible analizar en forma independiente cada una de las respuestas de la red a una fuente determinada y posteriormente sumar cada una de las respuestas individuales para obtener la respuesta integral del sistema. De esta forma, es posible analizar en forma independiente la respuesta de cada una de las armónicas presentes en una red eléctrica e integrarlas de la manera que se obtenga la respuesta total del sistema.

En potencia este tipo de análisis no es tan sencillo, ya que la potencia es el producto del voltaje por la corriente para cada caso.

Cualquier función repetitiva cuya frecuencia es conocida, puede describirse mediante una Serie de Fourier.

Partiendo de la base de que una Serie de Fourier es una serie infinita de funciones de senos y cosenos de varias magnitudes y posiciones de fase. Cada una de ellas tiene una frecuencia que es un entero múltiplo de la fundamental. Todas estas funciones son sumadas y la suma resultante equivale a la función original.

Las frecuencias que son enteros múltiplos de la fundamental se conocen como frecuencias armónicas, y a la armónica se le denomina armónica de orden "n" donde n = entero múltiplo.

Las formas de onda con simetría de media onda, contienen solamente armónicas impares, en tanto que las formas de onda asimétricas contienen armónicas pares e impares.

Una función periódica puede ser descrita matemáticamente como:

$$f(x) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \text{sen}(nx) + B_n \text{cos}(nx)$$

donde el período de repetición es  $2\pi$  y  $A_0$ ,  $A_n$  y  $B_n$  están definidos por:

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \text{sen}(nx) dx$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \text{cos}(nx) dx$$

Al hacer un análisis de una onda, los términos expresados como cosenos pueden ser convertidos a senos con un desplazamiento de  $90^\circ$ .

#### - Análisis de las ondas senoidales correspondientes a armónicas:

Las ondas pueden ser analizadas por su contenido armónico. Las magnitudes de cada frecuencia componente se obtienen frecuentemente como un porcentaje de la magnitud rms de la onda fundamental.

Las armónicas también se pueden analizar a través de un análisis espectral, así la importancia de cada armónica es graficada para cada frecuencia y es fácilmente comparable con respecto a la onda fundamental.

Una forma más de análisis, es la Distorsión Armónica Total (DAT), que es el resultado de obtener la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de cada uno de las magnitudes de las componentes armónicas en valores rms, expresándose el resultado en un porcentaje del valor rms de la onda fundamental.

La información de la DAT es una referencia para saber qué tan grave es el problema de armónicas en un sistema, pero no proporciona por sí misma un dato con respecto a cuál o cuáles son las armónicas críticas en el sistema.

Las siguientes tres definiciones se aplican tanto para el voltaje como para la corriente:

**Factor de distorsión:**

$$FD = \frac{V_n}{V_1} \times 100\%$$

**Distorsión Armónica Total:**

$$DAT = \frac{(V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2)^{1/2}}{V_1} \times 100\%$$

donde:  $V_1$  es el valor rms de la onda fundamental  
 $V_n$  es el valor de la armónica de orden "n"

**Cálculo de la Fundamental:**

$$V_1 = \frac{V_{rms}}{(1 + DAT^2)^{1/2}}$$

donde DAT es el valor expresado como decimal de la DAT.

La siguiente definición aplica exclusivamente para corriente:

**Distorsión Total de la Demanda:**

Este valor es el que se utiliza en las tablas de recomendaciones de la norma IEEE-519 a la que posteriormente se hará referencia:

$$DTD = \frac{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2)^{1/2}}{I_{m\acute{a}x}} \times 100\%$$

donde  $I_{m\acute{a}x}$  es el promedio de la corriente máxima de la carga.

## Potencia de distorsión

Cuando se analizan las ondas de voltaje y corriente se cumplen las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} V(t) &= V_1 \text{ sen } (\omega t) \\ \text{y} \quad I(t) &= I_1 \text{ sen } (\omega t + \phi) \end{aligned}$$

donde los valores de  $V$  e  $I$  son valores rms.

Cuando las ondas están libres de distorsión, entonces son válidas las siguientes expresiones:

\* Potencia Aparente:

$$S = V \times I = P^2 + Q^2$$

\* Potencia Real Activa:

$$P = V \times I \times \cos(\phi)$$

\* Potencia Reactiva:

$$Q = V \times I \times \text{sen}(\phi)$$

\* Factor de Potencia:

$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\phi)$$

Sin embargo, para ondas de voltaje o de corriente distorsionadas las expresiones anteriores no son directamente válidas, ya que están planteadas sobre el supuesto de ondas senoidales perfectas.

Debe añadirse entonces un nuevo término que es el de **potencia de distorsión** donde:

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 > 0$$

Debe notarse que al existir este nuevo término ya no se cumple la conocida relación entre el factor de potencia y el ángulo de fase entre voltaje y corriente:

El factor de potencia se sigue calculando como:

$$FP = \frac{P}{S} \text{ pero no es igual a } \cos(\phi)$$

$$FP = \frac{P}{\{P^2 + Q^2 + D^2\}^{1/2}}$$

Así se define un nuevo concepto conocido como el **factor de potencia de desplazamiento** que es el resultado de dividir la potencia activa de la onda fundamental entre la potencia aparente de la misma onda fundamental.

El factor de potencia de desplazamiento es muy útil para determinar los ajustes al factor de potencia que deben efectuarse para evitar penalizaciones por parte de las empresas de suministro eléctrico, ya que sus mediciones están basadas en el desplazamiento entre las ondas fundamentales de voltaje y de corriente.

Por lo tanto, el cálculo de los capacitores para la corrección del factor de potencia ya no es algo muy sencillo. En el caso de no existir distorsiones, se puede hacer el cálculo con el simple  $\cos(\phi)$ , de lo contrario es **indispensable** considerar los efectos de la distorsión, ya que de hecho, los efectos de **resonancia** que se pueden presentar en el sistema, y que en los próximos capítulos se tratará, pueden incrementar el valor de "D", decrecentando en realidad el factor de potencia en lugar de incrementarlo, y por lo tanto, empeorar en vez de corregir el factor de potencia.

Resumiendo, las armónicas son corrientes y voltajes que se presentan a frecuencias múltiplos enteros de la frecuencia de la corriente y voltaje fundamentales y son debidas a la presencia de cargas no lineales. Este tipo de cargas, demandan corriente en intervalos de tiempo muy cortos, de tal manera que la onda de corriente no es una onda senoidal, por lo que se considera distorsionada. La corriente distorsionada, al fluir a través de una impedancia genera una caída de voltaje que a su vez distorsiona a la onda de voltaje siendo este un problema en el estado estable.

La presencia de capacitores en un sistema eléctrico, al combinarse con la inductancia propia del sistema, tiene una frecuencia natural de resonancia, que en el caso de coincidir con la frecuencia de alguna de las armónicas, creará condiciones de resonancia con las consecuencias que más adelante se detallan, por lo tanto, en la actualidad la corrección del factor de potencia debe llevarse a cabo con un previo estudio de las condiciones de calidad de potencia del sistema eléctrico en cuestión.

En los próximos capítulos se analizan las causas y consecuencias de la presencia de ondas armónicas en los sistemas eléctricos, posteriormente se estudian métodos para la supresión o control de las mismas, y finalmente, se hace el análisis detallado de un caso real.



## Capítulo 2

### Causas y fuentes de generación de armónicas

La distorsión armónica se origina cuando en un sistema eléctrico existen cargas no lineales.

Los dispositivos no lineales producen formas de onda que no son senoidales cuando son energizados con voltajes senoidales. Esto se debe a que en las cargas no lineales, la corriente y el voltaje no están directamente relacionados, es decir, si uno es senoidal, no necesariamente el otro será también senoidal.

En la gran mayoría de los casos, un voltaje senoidal aplicado a un sistema eléctrico con cargas no lineales, trae como resultado una corriente distorsionada, por lo que el voltaje generalmente se considera libre de distorsión para fines de los estudios, ya que muchas de las referencias que se utilizan para análisis, se refieren a valores de distorsión de corriente.

Es raro un caso en que la distorsión armónica en voltaje exceda del 10%.

Los dispositivos generadores de armónicas se pueden dividir en tres categorías principales:

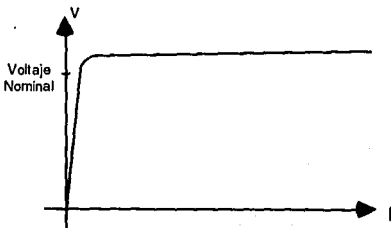
#### 1) Ferromagnéticos:

- Transformadores:

Los transformadores son los dispositivos más comunes entre los generadores de armónicas y son la causa más importante en su generación en algunos circuitos alimentadores.

Sin embargo, los dispositivos de arco o los convertidores electrónicos de potencia producen mucho más armónicas en proporción.

Todos los dispositivos ferromagnéticos producen armónicas debido a que la reactancia magnetizante no es lineal:

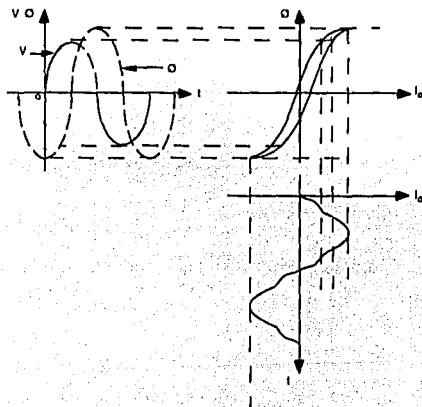


Curva característica de saturación de un transformador de potencia típico

Existen dos regiones lineales en esta curva, siendo que si el equipo se opera en cualquiera de ellas, la producción de armónicas es mínima. Sin embargo, por aspectos económicos, la operación normalmente se lleva a cabo en la región no lineal de la curva donde hay una alta generación de armónicas. Frecuentemente, el 50% de la corriente de excitación corresponde a la 3a. armónica, aunque usualmente representa menos del 1% con respecto a la corriente total de la carga. En los transformadores es común encontrar también 5a, 7a y 9a armónicas. Las armónicas 3a y 9a son responsables en muchos casos de interferencias a los sistemas de telefonía.

En la siguiente secuencia de gráficas se muestra como al aplicar un voltaje en el lado primario de un transformador se establece un flujo magnético en el núcleo ferromagnético del mismo transformador. Para que este flujo se genere, el transformador demanda una corriente conocida como de magnetización, la que demanda aun cuando no haya carga en el lado secundario.

Debido a que el núcleo ferromagnético tiende a saturarse, se necesita un fuerte aumento en la corriente de magnetización para lograr un pequeño incremento en el flujo, por lo tanto la corriente de magnetización no es de forma senoidal, generándose generalmente la 3a armónica como se puede observar en las gráficas:

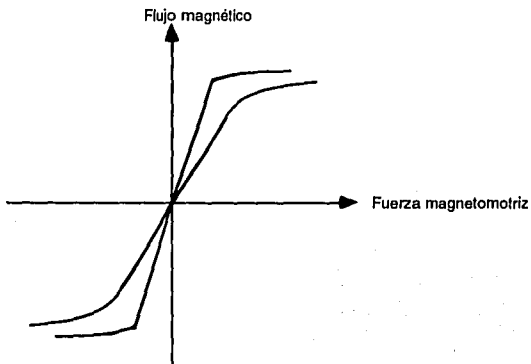


Corriente de magnetización de un transformador

#### - Máquinas rotatorias:

Estos equipos, tales como motores, también generan armónicas por efectos ferromagnéticos, sin embargo, estas son de menor intensidad en comparación con las generadas por los transformadores, debido a que existe un espacio de aire entre los componentes inductor e inducido en lugar de un núcleo de hierro como ocurre en los transformadores.

En la siguiente gráfica se compara la curva de magnetización de un motor contra la de un transformador.



Curva de magnetización de un motor de inducción comparada con la de un transformador

## 2) Dispositivos de arco:

Estos equipos son muy importantes generadores de armónicas y son abundantes en todo tipo de instalaciones.

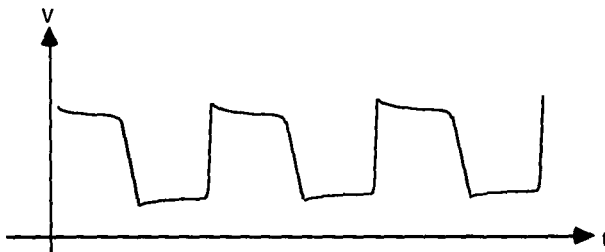
Entre los más comunes, están los siguientes:

- Hornos de arco.
- Soldadoras de arco.
- Iluminación fluorescente.
- Iluminación de Descarga de Alta Intensidad.

Todos estos dispositivos tienen el mismo comportamiento no lineal básico: se establece una diferencia de potencial entre dos electrodos a través de un espacio en el que puede haber aire o algún gas. Una vez que el gas se ioniza, se crea un arco entre los electrodos y se establece así un flujo de

corriente evitando que la diferencia de potencial se siga incrementando, una vez que se interrumpe el arco al disminuir la diferencia de potencial, se repite el ciclo.

Este comportamiento si se grafica, se puede observar como una onda cuadrada aproximadamente:



Gráfica de Voltaje a través de un tubo fluorescente

#### **a) Hornos de arco:**

Los hornos de arco son, de entre los equipos de este tipo, los de mayor tamaño y capacidad, siendo por lo tanto grandes generadores de armónicas.

Las empresas fundidoras llegan a tener en operación hornos de arco de capacidades superiores a los 50MVA.

#### **b) Soldadoras:**

Los equipos para soldar, en instalaciones donde son empleados en gran escala, tales como las plantas armadoras de automóviles, tienen comportamientos no lineales tanto en corriente como en voltaje, generando una gran cantidad de armónicas.

#### **c) Iluminación fluorescente y de Descarga en Alta Intensidad:**

Estos dispositivos generan una cantidad de armónicas un poco menor proporcionalmente a la que generan los hornos de arco típicos. Esto se debe principalmente a que eléctricamente el arco generado en ellos es menor.

#### **Electrónica:**

Los convertidores de potencia electrónicos son de los equipos más importantes en la generación de armónicas.

Los siguientes son ejemplos típicos de generación de armónicas tanto en cargas residenciales como en las industriales:

- Residenciales:

Hornos

Controladores de iluminación

Controladores de motores de menos de 1 HP de capacidad

Circuitos rectificadores en televisiones, equipos de sonido, etc.

- Industriales:

Controladores de velocidad variable para motores

Rectificadores para procesos químicos, por ejemplo

Cargas controladas por tiristores

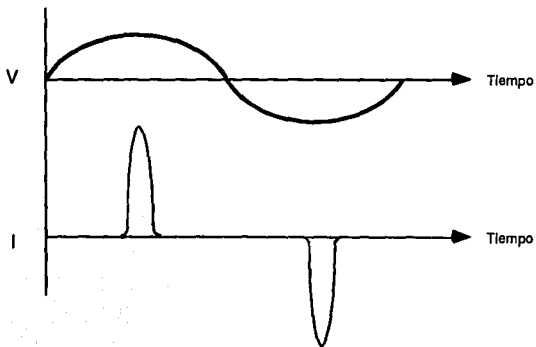
Sistemas de control de procesos

Sistemas de cómputo

Algunas de estas cargas cuando existen en pequeñas magnitudes, no tienen mayor consecuencia, sin embargo, al existir en conjuntos importantes, pueden ser graves fuentes de generación de armónicas.

**Convertidores electrónicos de potencia:**

Este tipo de equipos generan armónicas debido a que tienen la capacidad de demandar corriente por breves períodos, mientras que el resto del tiempo no conducen, es decir, permiten o no el paso de la corriente en cualquier punto en el tiempo como se muestra en la siguiente gráfica:



Estos equipos cambian la energía eléctrica de una forma a otra, es decir, de Corriente Alterna (CA) a Corriente Directa (CD), de CD a CA, o de CA a CA con diferentes frecuencias y esto se logra a través del uso de dispositivos semiconductores.

Las principales fuentes de armónicas de corriente son los rectificadores de ángulo de fase controlado, los convertidores de potencia y los inversores. Una fuente de potencia ininterrumpible (UPS por sus iniciales en inglés) puede generar armónicas hacia el lado de la carga, y hacerlo también hacia el lado del suministro de potencia.

Los convertidores se pueden dividir en tres categorías principales:

1. Fuentes de poder monofásicas pequeñas empleadas en computadoras personales, televisiones, cargadores de baterías, pequeñas unidades UPS, etc.
2. Controladores de potencia media tales como los empleados para el control de motores, trenes, etc.
3. Grandes convertidores con capacidades de MW empleados en la industria metalúrgica y en los sistemas de transmisión en Alto Voltaje de CD.

#### **Armónicas en Líneas de distribución:**

Las redes eléctricas pueden absorber en gran medida la presencia de las armónicas, sin embargo, muchos problemas se presentan cuando en los sistemas eléctricos existen capacitores cuya frecuencia de resonancia coincide con la frecuencia de las armónicas presentes en el sistema, ya que una falla en una línea de Alta Tensión implica la desenergización de amplias zonas de usuarios y su reparación o reposición es de un costo muy alto.

Hasta este punto se ha definido qué son las armónicas y qué las produce. En los capítulo siguiente se definen las condiciones de resonancia a las que ya se ha hecho referencia y se analizan las consecuencias que tienen sobre los diferentes tipos de componentes de un sistema eléctrico típico las corrientes y voltajes armónicos.

## Capítulo 3

### Consecuencias de las armónicas

Qué tan grave puede ser un problema de armónicas presentes en un sistema eléctrico, dependerá principalmente de la sensibilidad de la carga a tales armónicas. Los equipos menos sensibles son aquellos cuya principal función es la de calentar, mientras que los más sensibles son los que requieren para su operación una onda senoidal casi perfecta tales como los equipos de comunicaciones o de procesamiento de datos.

En cualquier caso, la presencia de armónicas afecta la vida útil de los equipos, ya que incrementa la carga en todos sus componentes sobre los valores nominales del diseño original.

Cuando en un sistema eléctrico se presentan problemas tales como fenómenos de resonancia, interferencia, sobrecalentamiento u operación inesperada o aparentemente "inexplicable" de dispositivos de estado sólido o de equipos de protección eléctrica, pueden ser el resultado de la presencia de la distorsión armónica.

#### Resonancia armónica:

La utilización de capacitores en los sistemas eléctricos crea condiciones de resonancia cuando en el sistema operan cargas no lineales.

Debido a las frecuencias elevadas de las armónicas con respecto a la onda fundamental de corriente, la reactancia capacitiva disminuye, en tanto que la reactancia inductiva se incrementa:

$$X_C = \frac{1}{j2\pi fC} \quad X_L = j2\pi fL$$

Como consecuencia las condiciones de resonancia que se forman en los circuitos eléctricos, generalmente se presentan en frecuencias muy cercanas a las de las armónicas características en los mismos.

El uso de capacitores, generalmente instalados para la corrección del factor de potencia, crean condiciones de resonancia tanto en serie, como en paralelo.

#### - Resonancia en serie:

En un circuito en serie, la impedancia total a la frecuencia de resonancia se reduce exclusivamente a la componente resistiva del circuito, si esta componente es pequeña, se presentarán valores muy altos de corriente a tal frecuencia, lo que produce en consecuencia un sobrecalentamiento a todos los

componentes del circuito, además de que, por lo menos en el caso de los capacitores, los obligará a operar con corrientes superiores a las nominales, causando su rápido deterioro y muy probablemente, la operación de fusibles internos o externos de protección.

#### **- Resonancia en paralelo:**

En el caso de un circuito en paralelo, la impedancia total a la frecuencia de resonancia es muy grande, ya que a través del capacitor, la corriente será muy grande debido a su baja impedancia, de tal forma, que la consecuencia será un voltaje muy alto entre las terminales de la combinación en paralelo.

Lo más grave, es que esta condición de voltaje alto se producirá aun con el caso de la excitación debida a corrientes armónicas pequeñas.

En ambos casos, algunas de las consecuencias más importantes son:

- Daño a bancos de capacitores
- Operación frecuente de fusibles de presión de bancos de capacitores o fusibles eléctricos de protección.
- Daño a los dieléctricos de cables y otros componentes de los circuitos.

#### **Sobrecalentamiento:**

La generación de calor en los componentes de un sistema eléctrico generalmente se calcula mediante la relación  $I^2R$ .

Al analizar un caso de armónicas, las pérdidas eléctricas que generan calor, deben incluir las correspondientes a cada armónica individual en su frecuencia particular, por lo que las pérdidas totales se entienden, por el principio de superposición, como la suma de las pérdidas de la onda fundamental, más las de cada armónica:

$$I^2R = I_{60\text{Hz}}^2R_{60\text{Hz}} + I_{180\text{Hz}}^2R_{180\text{Hz}} + I_{300\text{Hz}}^2R_{300\text{Hz}} + \dots$$

#### **Consecuencias de las armónicas en la operación de equipos:**

Cuando al analizar un sistema eléctrico se identifican problemas como los que a continuación se enuncian, muy probablemente se tratará de un caso de armónicas:

- Sobrecalentamiento de transformadores y equipo rotatorio.
- Sobrecarga de líneas de alimentación.
- Sobrecarga de hilos neutros que puede provocar incendios.



- Voltajes y frecuencias de neutro a tierra inaceptables.
- Distorsión del voltaje de suministro afectando a todos los equipos de una red eléctrica.
- Interferencia que afecta a equipos de comunicación y de procesamiento de datos.
- Desbalanceo de voltaje en sistemas trifásicos.
- Mala regulación de voltaje en las líneas.
- Daños a bancos de capacitores instalados para la corrección del factor de potencia.
- Disparo de interruptores y operación de fusibles en forma inapropiada e inesperada.
- Operación no confiable de equipo electrónico.
- Errores de medición.
- Fallas y errores en equipo sensible a la frecuencia.
- Fallas y errores en equipos de control, incluyendo los equipos de control de la demanda.

A continuación se especifica el tipo de problemas que pueden presentarse en algunas de las categorías de equipos y dispositivos que suelen ser los más afectados por las armónicas:

### **Motores y Generadores:**

La principal consecuencia de las armónicas en equipos de este tipo es el sobrecalentamiento debido al incremento en las pérdidas en el hierro y el cobre a las frecuencias de las armónicas, con las consecuentes pérdidas de eficiencia y de torque desarrollado.

Los equipos rotatorios tienen también una frecuencia de resonancia, si esta frecuencia existe cerca de la frecuencia de un estímulo eléctrico, en este caso, de las armónicas, se desarrollarán importantes fuerzas mecánicas que afectan al equipo. Lo anterior es debido a que se producen oscilaciones mecánicas cuando se presentan torques oscilatorios producidos a su vez por la interacción entre las corrientes armónicas y el campo magnético debido a la frecuencia de la onda fundamental, situación que causar una excitación a una frecuencia mecánica de resonancia.

### **Transformadores:**

En los transformadores, la principal consecuencia de las armónicas es el incremento en calentamientos parásitos, lo que a su vez produce mayores pérdidas en el cobre y en el núcleo de hierro.

El incremento en la corriente debido a las armónicas, también es una importante consecuencia, ya que esta situación puede saturar al transformador sin que la totalidad de su demanda sirva para un trabajo útil.

Las pérdidas en el cobre son debidas a que la resistencia de los conductores eléctricos se incrementa con la frecuencia.

### **Cables:**

Los cables sometidos a corrientes armónicas, especialmente aquellos que están involucrados en una situación de resonancia, son expuestos a condiciones extremas de voltaje y efecto corona que pueden derivar en fallas del aislamiento.

Adicionalmente, las altas frecuencias de las armónicas, incrementan el calentamiento de los conductores, incrementando a su vez la presencia del efecto "piel", en que el flujo a través del conductor tiende a concentrarse hacia la periferia del mismo, mientras que la conducción en el centro disminuye. El resultado global de este efecto, es el incremento de la resistencia del conductor, con el consecuente aumento de pérdidas y deterioro del conductor mismo y de su aislamiento.

### **Capacitores:**

Cuando se instalan capacitores en un sistema eléctrico, existen importantes probabilidades de una resonancia si en el sistema se encuentran presentes armónicas.

El efecto de la resonancia generará corrientes y voltajes considerablemente más elevados en relación a los que existirían si no ocurriera la situación de resonancia.

La reactancia de un banco de capacitores disminuye con la frecuencia, y el banco, por lo tanto, actúa como un filtro para altas corrientes armónicas.

El sobrecalentamiento y el sobrevoltaje que producen las armónicas sobre un capacitor, disminuyen su vida útil y pueden causar, inclusive, la destrucción de algunos de sus componentes.

Debe hacerse la aclaración de que en la solución de casos de armónicas muchas veces se pueden utilizar filtros constituidos por capacitores y bobinas, pero no podrá ignorarse el efecto que se presentará en el sistema integral al instalar dicho filtro, especialmente en otros capacitores que no estén protegidos contra las armónicas.

### **Equipo electrónico:**

Los equipos electrónicos son muy susceptibles a fallas y errores causador por la presencia de distorsiones armónicas. Estos equipos muy frecuentemente basan su operación en los cruces por cero de las ondas de voltaje o en otros aspectos de la forma de onda de voltaje.

La distorsión armónica es capaz de desplazar los cruces por cero de una onda de voltaje, o de alterar el punto en que un voltaje entre fase y fase es mayor que otro voltaje entre fase y fase, o bien, es capaz también de incrementar el número de cruces por cero esperado en un ciclo normal de la

frecuencia fundamental. Siendo estos aspectos críticos para la operación de gran cantidad de equipos electrónicos de control, la presencia de armónicas puede causar importantes errores.

Este tipo de fallas, son especialmente críticas en equipos que controlan tiempos, en aquellos que transmiten información, que en consecuencia se puede alterar, pero más aun, en los equipos médicos, ya que de un error de este tipo, puede depender una vida. Por esta razón, una gran cantidad de equipos médicos cuentan con dispositivos acondicionadores de las líneas de suministro.

### **Equipos de medición:**

Los equipos de medición y la instrumentación en general pueden verse afectados por la presencia de armónicas.

Por ejemplo, los equipos de medición de Kilowatt-horas, basados en un disco giratorio movido por inducción, detectan solamente la corriente de la frecuencia fundamental, sin embargo, el desbalanceo generado por la distorsión armónica, puede causar errores de operación.

Los equipos de medición convencionales, tales como ampérmetros y voltímetros en general, están diseñados para seguir ondas de voltaje y de corriente senoidales y de 60 Hz, o hasta rangos que normalmente no exceden los 100 ó 150 Hz. Por lo tanto, al aplicar mediciones con este tipo de equipos, se obtendrán lecturas que no son reales. Esto no significa que el equipo no sirva, sino que no está diseñado para detectar armónicas.

Por la razón anterior, es frecuente encontrar casos en los que se han aplicado mediciones a un sistema eléctrico y se considera que no existen en él componentes armónicas, sin embargo, todos los síntomas típicos de la presencia de armónicas existen y aparentemente no tienen explicación.

### **Tableros de Distribución y Relevadores:**

Como en otros equipos, las corrientes armónicas incrementan el calentamiento y las pérdidas en los tableros, reduciendo la capacidad conductora en estado estable y acortando la vida de elementos aislantes.

Las armónicas del sistema afectan la operación de los relevadores de una manera compleja. Aquellos que dependen para su operación de los picos de voltaje o corriente, o de los cruces por cero de la onda de voltaje, no funcionarán adecuadamente con la presencia de armónicas.

Los relevadores electromecánicos se ven afectados de la siguiente forma:

La presencia de corrientes armónicas resulta en componentes adicionales a la corriente normal de operación que alteran las características de retraso de tiempo de los relevadores. Los relevadores de tierra no pueden distinguir entre la

corriente de secuencia cero y la corriente de tercera armónica, por lo que la corriente de 3er armónica puede ocasionar la operación de relevadores de tierra.

Los relevadores en presencia de armónicas tienden a operar más lentos y/o con valores de operación mayores a los normales.

Los relevadores estáticos de baja frecuencia se vuelven susceptibles a cambios sustanciales en las características de operación.

Los relevadores de sobrecorriente y sobretensión presentan cambios en sus características normales de operación.

Los pares de operación de los relevadores se pueden invertir dependiendo del nivel de armónicas y los tiempos de operación pueden variar en función de la combinación de frecuencias.

Las armónicas pueden alterar la alta velocidad de operación de los relevadores diferenciales.

### **Interferencia Telefónica:**

La presencia de corrientes o voltajes armónicos en circuitos de conversión de potencia generan campos magnéticos y eléctricos que pueden alterar el adecuado funcionamiento de sistemas de comunicaciones que se encuentren en la cercanía.

### **Convertidores de Potencia Estáticos:**

Este tipo de equipos generalmente son grandes generadores de armónicas, sin embargo, en ocasiones estos mismos pueden verse afectados por la presencia de armónicas, bien sea por las armónicas generadas por sí mismos, o bien, por las debidas a otras fuentes de armónicas. Frecuentemente, la fuente de armónicas que afectan a dispositivos de este tipo, son convertidores similares o idénticos conectados en paralelo dentro del mismo sistema eléctrico.

Existe una gran variedad de convertidores de este tipo. Muchos no son sensibles a las armónicas. Los rectificadores hechos en base a diodos, por ejemplo, no son sensibles. Sin embargo, si existen capacitores en los rectificadores, situación común, las altas corrientes que se presentan en ellos inyectadas por las corrientes armónicas existentes en la corriente alterna, generan esfuerzos térmicos que van destruyendo al capacitor. En los casos más críticos, las armónicas pueden inclusive llegar al lado de la carga del rectificador dañando o afectando al equipo de corriente directa que depende de él.

La mayoría de los convertidores basan el control de su operación en las características de la onda de voltaje que reciben, especialmente el número de cruces por cero. Si esa onda está severamente distorsionada por armónicas, los convertidores tendrán fallas en los tiempos de disparo, o errores al momento de conmutar o generarán armónicas adicionales diferentes a las características del propio equipo.

Hasta ahora se ha revisado cuáles son los equipos y dispositivos que pueden generar a las armónicas y cuáles pueden ser sus consecuencias.

En los capítulos siguientes se analiza la forma en que se pueden detectar las armónicas en un sistema eléctrico y posteriormente se explican las opciones más comunes para la supresión de las armónicas.

## Capítulo 4

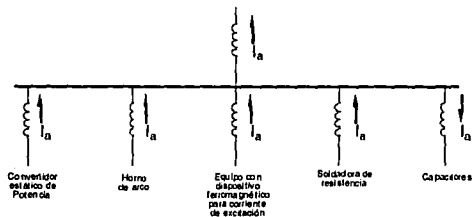
# Medición de Armónicas

### Métodos de análisis para los problemas de armónicas:

#### a) Cálculo de las corrientes armónicas:

En general, las corrientes armónicas pueden representarse como fuentes de corriente ideales para cada frecuencia de las armónicas presentes. Esta aproximación sólo es válida si el nivel de distorsión en voltaje no excede el 10%. Son raros los casos en los que la distorsión de voltaje excede ese 10%.

El siguiente diagrama es la representación de un sistema eléctrico simplificado haciendo la sustitución de fuentes de armónicas por fuentes de corriente ideales:



Para fines de esta simplificación, las características de los equipos electrónicos en cuanto a la generación de armónicas pueden determinarse analíticamente con frecuencia, pero en lo que respecta a los equipos tales como transformadores y los de arco, muchas veces es necesario utilizar características típicas debido a que no existe otro tipo de información. Siempre que se cuente con la mayor cantidad de información posible, el modelo se aproximará más a la realidad.

Una vez conocidas las armónicas características del sistema y las fuentes que las generan, la respuesta al sistema para estas armónicas debe ser determinada. Para ello es necesario conocer la siguiente información:

- Impedancia equivalente del sistema para corriente de corto circuito.
- Bancos de capacitores.
- Características de los conductores en el sistema.
- Características de la carga.

En instalaciones no complejas, los cálculos pueden llevarse a cabo fácilmente, sin embargo, en sistemas más complicados es necesario efectuar los cálculos y simulaciones en una computadora.

El análisis en computadoras y las mediciones de campo se complementan unas a otras en un gran número de problemas. En un caso, las mediciones se pueden utilizar para confirmar un análisis, mientras que en otro, pueden ser la base de datos que describen el problema, información que podrá ser procesada para determinar la solución.

Frecuentemente, el tiempo para efectuar mediciones es muy limitado y las simulaciones o modelos, pueden ser útiles para identificar las áreas más valiosas para investigación.

### **Equipo requerido:**

Un sistema típico para el análisis de armónicas debe de contar por lo menos con transductores de voltaje y corriente y un osciloscopio que permita observar la distorsión de las ondas de voltaje y corriente en al menos una fase. Las mediciones de voltaje y de corriente deben efectuarse en forma simultánea.

Sin embargo, un equipo ideal debe incluir lo siguiente:

- Transductores de voltaje y corriente.
- Sistema procesador de señales.
- Osciloscopio
- Analizador de espectro
- Sistema registrador (en papel, cinta, diskette, etc.)

El objetivo de cada uno de estos componentes es el siguiente:

#### **- Transductores:**

Se conectan directamente a los conductores en el punto de análisis cuando se trata de bajo voltaje. y transmiten un voltaje o corriente al procesador de señales.

Quando las mediciones se realizan en circuitos de media o alta tensión, tales como las líneas de distribución o transmisión, entonces será necesario algún transductor especial cuyas características de impedancias y precisión deberán ser bien conocidas y de la más alta calidad posible.

Frecuentemente es posible aprovechar los transductores que los equipos tienen permanentemente instalados para su propio control o indicadores, sin embargo, es común el que o se conozcan sus características, especialmente su respuesta en frecuencia, lo que hace poco confiable las lecturas.

En lo que a corriente respecta, normalmente lo más sencillo es utilizar transductores que cuentan con transformadores en forma de gancho que se pueden colgar directamente a los conductores, envolviéndolos y que existen con capacidades de aislamiento hasta para 25Kv

**- Procesador de señales:**

Estos equipos convierten la señal que proviene de los transductores a un cierto nivel, a los niveles apropiados para las entradas de los equipos de procesamiento de información o de monitoreo.

**- Osciloscopio:**

Permite observar la forma de onda que está siendo medida, lo que es esencial para validar la medición.

**- Analizador de espectro:**

Determina la magnitud de cada una de las armónicas según su frecuencia y permite fácilmente una comparación con respecto a la onda fundamental.

**- Registrador:**

Este permite almacenar las gráficas y valores registrados para su posterior análisis.

Debido a que normalmente se requiere hacer mediciones en puntos múltiples dentro de una instalación analizada, es necesario que el equipo sea lo más portátil posible.

La respuesta de estos instrumentos debe ser tal que sus lecturas sean precisas en fase y magnitud hasta a una frecuencia de 3,000 Hz, que es la frecuencia a la que corresponde la armónica de orden 50 con respecto a la fundamental de 60Hz.

## **PROCEDIMIENTO**

Las mediciones en el campo deben ser cuidadosamente planeadas para complementar, con la información de ellas obtenida, las herramientas de análisis disponibles.

Debe conocerse la naturaleza de las cargas que integran al sistema, de tal manera que se puedan plantear hipótesis previas a las mediciones, de tal manera que los resultados las confirmen o descarten. Un gran número de problemas de armónicas son causados por condiciones de resonancia que dependen de la configuración particular del sistema y de las fuentes de armónicas.



No es realista esperar que las condiciones en que se efectúan las mediciones son las peores si no se tiene pleno conocimiento del sistema y de su operación.

Debe procurarse el registrar la información obtenida para posteriormente llevar a cabo su interpretación.

Los objetivos de un análisis de armónicas pueden dividirse en tres categorías:

1.- Identificar, caracterizar y determinar la solución para un problema existente de armónicas.

2.- Medir con el objetivo de determinar las distorsiones generadas por la adición de nuevos equipos al sistema analizado.

3.- Conocer los niveles existentes en un sistema en general para conocer su comportamiento si varían las condiciones existentes.

#### **PLAN DE MEDICIONES:**

Posteriormente, es indispensable determinar el plan de mediciones, que dependerá de cada caso en particular:

1.- Definir las condiciones deseadas de operación, basadas en un análisis preliminar, ya que esto frecuentemente requiere conectar o desconectar equipos del sistema que en el momento de las mediciones no se encuentran en el estado deseado y el que así sea, depende de permisos especiales y personal que los opere, así mismo, se debe procurar que las posibles fuentes de armónicas se identifiquen plenamente y se incluyan en el análisis.

2.- Establecer los requerimientos de equipo de medición y de seguridad, herramienta y condiciones de instalación de los equipos de medición, así como equipos de comunicación en el caso de que las pruebas a realizar requieran la coordinación de posiciones físicas múltiples.

3.- Informar o coordinar a todo el personal involucrado o afectado de los requisitos necesarios para llevar a cabo satisfactoriamente el estudio.

4.- Fijar tiempos coordinados con condiciones del sistema.

Finalmente, deben verificarse los resultados obtenidos con los análisis previamente realizados. De ser posible, deben considerarse variaciones en las condiciones del sistema para evaluar la forma en que podrían afectar.

Estas simulaciones posteriores a la realización de mediciones y verificación de resultados tienen por objeto:

- Resolver discrepancias entre los análisis preliminares y los resultados medidos.

- Determinar verdaderamente las peores condiciones incluyendo las posibles variaciones al sistema tales como la instalación de bancos de capacitores, condiciones de carga, configuraciones, adición de nuevos equipos, etc.

- Determinar los efectos de posibles fuentes de armónicas adicionales no evaluadas en las mediciones.

- Determinar soluciones a cualquiera de los problemas de armónicas identificados.

### **INSTALACION DE LOS EQUIPOS DE MEDICION:**

Una vez habiendo definido un claro programa de trabajo, se procede a instalar los equipos en los puntos designados para ejecutar el estudio.

Debe tenerse la previa certeza de que el equipo está adecuadamente calibrado.

La colocación de los equipos debe hacerse con todo el equipo de seguridad requerido, tanto por el personal, como por el equipo mismo. En el caso del equipo, es muy importante el efectuar adecuadamente las conexiones a tierra en el caso de así requerirse.

En los casos en que los equipos a utilizar deban dejarse en el punto de medición por largos períodos, es indispensable asegurarse de que todas las conexiones sean mecánicamente firmes y eléctricamente sólidas, ya que en el caso de que alguna se desconecte, pierde validez la medición y habrá que repetirla con el consecuente desperdicio de tiempo.

Por otra parte, debe procurarse que su colocación se lleve a cabo en el lugar más seguro posible, de tal manera que se evite al máximo el que quede en pasillos u otros accesos que expongan al equipo a ser desconectado por accidente o descuido. De igual forma debe procederse con todas las conexiones y sus respectivos cables.

### **REALIZACION DEL ESTUDIO:**

Teniendo todos los equipos necesarios, se procede según lo planeado a realizar las mediciones necesarias. Se hace aquí especial hincapié en que los trabajos a realizar durante las mediciones deben estar previamente definidos, ya que hay muchos casos en los que las condiciones del sistema pueden ser muy variados y el improvisar probablemente no permita identificar los casos más significativos para el estudio.

Deben registrarse todos los datos posibles, tanto de resultados obtenidos con los equipos de medición, como la configuración y condiciones del sistema al momento de las mediciones, hora y fecha, datos de placa de el o los equipos en cuestión, observaciones especiales, etc.

Así mismo, deben considerarse todas las observaciones que vaya aportando el personal propio de mantenimiento que está familiarizado con los equipos y sistemas de la instalación para ir enriqueciendo la información y aumentar a la vez el conocimiento integral del sistema y de sus procesos.

Normalmente, al planear y ejecutar un estudio de esta naturaleza, y también, conforme se van obteniendo resultados concretos de las mediciones, el personal que ejecuta un estudio va teniendo una idea clara del problema existente, si es que éste existe, y por lo tanto de una o varias opciones para su solución.

Muchas veces las soluciones a los problemas eléctricos, y especialmente en el caso de las armónicas, requieren de la instalación de nuevos equipos. Por lo tanto, durante la realización del estudio, es muy importante y valioso el ir tomando nota de las posibles localizaciones y puntos de conexión de los equipos que podrían utilizarse para la corrección del problema.

Para lo anterior, se recomienda la realización de dibujos detallados en perspectiva que muestren toda la información necesaria, incluyendo distancias, que le permitirán al personal que diseñará el equipo de corrección, el poder determinar todos componentes para la instalación del mismo aun sin haber estado presentes en el lugar de instalación.

Si bien, lo más recomendable es contar con uno o varios equipos que registren toda la información eléctrica y la almacenen en diskette, en la memoria del equipo mismo o en papel, cuando esto no es posible, entonces debe tenerse especial cuidado en registrar la información de los parámetros eléctricos, especialmente la corriente y voltaje fundamentales en cada fase, los valores, carga del sistema, componentes armónicas de voltaje y corriente, y de ser posible, ángulos de fase de corrientes y voltajes, así como el factor de potencia.

#### **ANÁLISIS DE LA INFORMACION Y DE CASOS ADICIONALES:**

Los resultados del estudio deben usarse para ser comparados con las simulaciones o hipótesis originales.

Una vez detectada una o varias fuentes de armónicas, se debe simular o predecir su comportamiento en diferentes casos en los que se alteren las condiciones del sistema.

Lo anterior debe hacerse considerando los peores casos, es decir, incrementos en la carga, instalación de bancos de capacitores, posibilidades de que se incremente el número de equipos generadores de armónicas, etc.

## **Concluyendo:**

Para llevar a cabo la medición de armónicas, un sistema eléctrico puede simplificarse de tal forma que las fuentes de armónicas se pueden representar como fuentes de corriente ideales.

Debe procurarse obtener información del sistema y de ser posible, establecer un modelo que permita simular las condiciones de operación. Existen programas para computadora que permiten llevar a cabo estas simulaciones.

Es necesario definir, en base a la información recopilada, varias hipótesis que expliquen el problema, las cuáles deben comprobarse con mediciones en el campo.

Para llevar a cabo el proceso de mediciones, debe establecerse un plan de acción en el que se definan con toda claridad las posiciones de medición más valiosas y el tiempo que durarán dichas mediciones.

Al definir el plan de mediciones, debe tenerse especial cuidado en que al momento de efectuarlas, las condiciones de operación serán las más críticas, es decir, que sean representativas del comportamiento esperado.

El equipo ideal requerido para medir armónicas debe constar de transductores de voltaje y corriente, un procesador de señales, un osciloscopio, un analizador de espectro y algún sistema de registro.

Una vez realizado el estudio, debe interpretarse la información y compararse con respecto a las hipótesis originalmente propuestas para comprobarlas, rechazarlas o comprobarlas.

Por último, deben simularse o predecirse las condiciones de operación si existieran cambios en el sistema tales como el incremento de cargas u otras variaciones a las condiciones presentes al momento de la medición.

Hasta este punto, se ha estudiado qué son las armónicas, cuál es su causa y cuáles sus consecuencias, así como la forma de analizarlas y medirlas en el campo.

En el siguiente capítulo se plantean técnicas para la supresión y control de las armónicas en los sistemas eléctricos, especialmente las relativas a los filtros de rechazo, que son aquellos que se proponen como solución más adecuada para el caso que en el presente trabajo se estudia.

## Capítulo 5

# Técnicas de Supresión de Armónicas

### Control de las corrientes armónicas:

Cuando en un sistema eléctrico existen fuentes de armónicas, el flujo de corrientes armónicas que se produce debido a esos dispositivos, produce una distorsión en la onda de voltaje, ya que la impedancia propia de los dispositivos y conductores produce una caída de tensión al fluir la corriente a través de tales impedancias.

Aun cuando otras cargas "corriente abajo" no sean generadoras de armónicas, al existir un voltaje con contenido armónico, por bajo que este sea, producirá corrientes armónicas a través de las impedancias que representan las cargas.

Por lo tanto, las armónicas pueden afectar a todos los equipos instalados en un sistema en el que están presentes.

Debido a lo anterior, el control de las armónicas es muy importante y para tal efecto hay diversas técnicas, destacando las siguientes:

- Filtros de rechazo
- Multiplicadores de fase
- Compensación o inyección de armónicas

#### a) Filtros de rechazo:

Estos filtros constan de un capacitor y un inductor. El capacitor debe ser adecuado para soportar la suma aritmética del pico máximo del voltaje fundamental más el voltaje armónico. La corriente vista por el filtro es el voltaje aplicado al filtro dividido entre la reactancia total del filtro incluyendo al inductor y el capacitor. Como la reactancia total es menor a la sola reactancia capacitiva, debido a que la reactancia inductiva aplica en sentido contrario a la capacitiva, entonces la corriente a través del capacitor será mayor que la que fluiría a través de él sin el reactor.

El reactor debe ser capaz de soportar la corriente rms que fluye a través del filtro. Esto incluye no solo la corriente armónica para la que el filtro se ha calculado, sino cualquier otra corriente armónica que pueda estar presente en el sistema, así como la corriente fundamental.

Entre los equipos para la supresión de armónicas, estos son los más comunmente utilizados y económicos, además de que su instalación es tan sencilla como instalar un simple capacitor.

El hecho de que en su constitución incluyan un capacitor, permite corregir al mismo tiempo el factor de potencia y la distorsión armónica.

Estos equipos no son muy convenientes cuando en el sistema se presentan constantemente muy fuertes variaciones en la demanda durante intervalos muy pequeños, especialmente cuando se requiere para la corrección de bancos automáticos.

## **b) Multiplicadores de fase:**

Esta solución es muy costosa y se emplea para casos muy específicos o cuando no es recomendable utilizar filtros con capacitores que provocarían un factor de potencia capacitivo.

Esta forma de corrección sólo es recomendable para cargas pequeñas, ya que en el caso de instalaciones grandes, normalmente se requerirán filtros de rechazo adicionales de cualquier forma.

El método consiste en emplear convertidores de onda completa de seis pulsos como unidad básica. Al emplear más convertidores de este tipo en el sistema, diseñados para operar con desplazamientos de fase en relación a las otras unidades rectificadoras, se irán cancelando las armónicas a ciertas frecuencias.

Tal es el caso de una unidad de 12 pulsos, la que eliminará por cancelación las armónicas 5, 7, 17, 19, etc. Si la multiplicación de fase es mayor, la reducción de frecuencias armónicas se incrementará. Un circuito de 24 pulsos está construido con cuatro de seis, cada uno desplazado  $15^\circ$  con respecto al otro por un transformador de desplazamiento de fase o por bobinas adicionales en los devanados del lado primario conectados en zig zag o en hexágono.

Este sistema de supresión es ideal en el caso de que todos los convertidores sean de las mismas capacidades y la carga de todos ellos sea igual.

## **c) Compensación o inyección de armónicas:**

Las corrientes armónicas pueden ser eliminadas induciendo flujos armónicos en el núcleo del transformador con un defasamiento de  $180^\circ$  con respecto a los flujos de armónicas que fluyen a través del secundario del transformador.

Estos compensadores aun se encuentran en etapa experimental y deben estar monitoreando constantemente la corriente que demanda la carga para identificar la magnitud de las armónicas e inyectar entonces una corriente igual pero opuesta a las componentes de distorsión para así cancelarlas.

Debido a que el empleo de los filtros de rechazo es la solución más comunmente aplicada para resolver problemas debidos a corrientes armónicas y a que equipos de este tipo son los que se proponen para corregir los problemas de armónicas presentes en el caso que se trata en este trabajo, este capítulo se concentra en el estudio de los filtros de rechazo.

## **Función de un filtro de armónicas:**

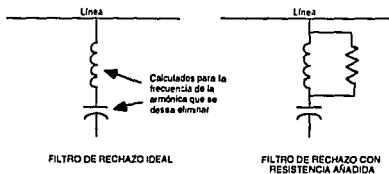
El objetivo de instalar un filtro es el de reducir el flujo de corrientes armónicas a través de la trayectoria de corriente principal.

Para fines de un análisis, se puede considerar que las armónicas tienden a fluir desde la fuente que las genera hacia las líneas de la Compañía Suministradora de Energía. La mayoría de los problemas de armónicas pueden

ser atribuidos a corrientes que fluyen a través de una trayectoria muy larga que tiene una alta impedancia. De igual forma, muchos problemas de interferencia telefónica son causados por corrientes armónicas expuestas a circuitos de teléfonos a través de largas distancias.

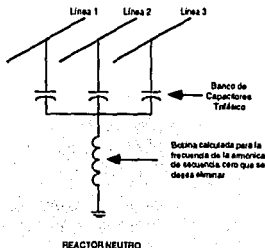
El filtrado de las armónicas puede lograrse desviándolas a través de trayectorias más cortas o bloqueando su flujo a través de trayectorias críticas.

1.- Esta desviación puede lograrse mediante algún equipo de rechazo resonante que aparezca como una baja impedancia para la frecuencia de la armónica en cuestión. Normalmente, este tipo de dispositivo consiste en un circuito R, L y C en serie que se conecta entre la línea y tierra.

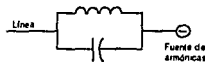


La resistencia en paralelo con el inductor que se agrega en el segundo caso, permite un rango de tolerancia en la respuesta en frecuencia del filtro, haciendo que la precisión en el cálculo del filtro sea menos crítica. Esto es especialmente importante al considerar una aplicación práctica de los equipos, ya que las variaciones ambientales, como la temperatura, la humedad, etc. y la misma carga influyen en el comportamiento de los componentes eléctricos, y las bobinas y capacitores que constituyen a los filtros de armónicas no son la excepción.

Existe una variación de este filtro de rechazo, que consiste en conectar una bobina a un capacitor trifásico en el neutro del capacitor. Esto es útil cuando lo que se pretende es el crear un corto circuito para la frecuencia de una armónica de secuencia cero que se desea eliminar:



2.- El bloqueo se logra a través de lo que se conoce como trampas de onda, que normalmente son circuitos con circuitos L y circuitos C conectados en paralelo, y este arreglo a su vez se conecta en serie en la línea:



TRAMPA DE ONDA

El objetivo de este dispositivo es que se calcula para presentar una alta impedancia en el arreglo paralelo para la frecuencia de interés, es decir, se calcula para impedir el paso de la frecuencia de la armónica que se que se desea evitar. Nuevamente, una resistencia puede añadirse para reducir la sensibilidad a la precisión de los componentes que integran al filtro.

Generalmente la primera opción es más económica.

3.- Una opción adicional para el filtrado de armónicas se puede lograr conectando un dispositivo puramente reactivo para alterar la respuesta en frecuencia del sistema, de tal forma que si la causa del problema de armónicas es la amplificación como resultado de una condición de resonancia, al variar la frecuencia de resonancia del sistema, el problema de armónicas se habrá eliminado si éstas ya no se amplifican.

## Disposición de los filtros de armónicas en un Sistema Eléctrico:

### a) Filtros para cargas individuales:

Cuando las fuentes de armónicas están claramente identificadas y su efecto no está muy disperso, una solución práctica puede consistir en filtrar de manera individual cada una de las fuentes que las generan.

Esta opción es generalmente aplicada para cargas tales como hornos de arco, controladores de velocidad de estado sólido para motores, entre otros.

Cuando se diseña un filtro individual, es muy importante determinar si la clase de filtro que se requiere es para una sola armónica o para varias. Generalmente en los circuitos de distribución solamente una o dos armónicas presentan problemas.

También se debe tener cuidado con la respuesta en frecuencia de la red integral de distribución en la que se está trabajando. Si el sistema es sensible a una armónica en particular, a ésta se le deberá prestar especial atención.

Es muy común que al aplicar capacitores a los sistemas eléctricos por el solo hecho de corregir el factor de potencia y sin considerar la posibilidad de la existencia de armónicas en el sistema, y por lo tanto la probabilidad de



establecer condiciones resonantes para las mismas, que el sistema se vuelva muy sensible a la frecuencia de 300 Hz, es decir, la 5a armónica, lo que desde luego, crea problemas y puede inclusive destruir a los capacitores y otros componentes del sistema.

Para evitar estos problemas, la técnica más sencilla es la de diseñar filtros de rechazo especificados para las frecuencias en cuestión que serán instalados cerca de las fuentes de armónicas. Estos equipos se deben diseñar por lo menos para el voltaje de operación en el sistema. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que es recomendable, cuando los factores económicos lo permiten, elegir el banco de capacitores que integra al filtro con un aislamiento que normalmente se usaría para el voltaje inmediato superior a aquel en el que va a operar el equipo.

Lo anterior significa que si el equipo va a operar en un sistema a 220V, es recomendable elegir un capacitor diseñado para 440V, si va a operar a 440V, entonces elegir uno diseñado para 600V.

Esto tiene como justificación el hecho de los aislamientos de los capacitores están diseñados para corrientes a 60Hz, sin embargo, las armónicas, como ya se ha visto, se presentan en frecuencias múltiplos de la de 60 Hz y por lo tanto, mayor a 60 Hz. Estas corrientes, producen un mayor esfuerzo y calentamiento sobre el aislamiento y lo deterioran, por lo que su vida útil se reduce. Por tal motivo, un aislamiento más robusto, permite evitar este problema.

Debe tenerse cuidado de que al seleccionar el capacitor diseñado para un voltaje superior al de operación, se considere que su voltaje de operación será inferior y por lo tanto los KVAR que proporcionará, también serán menores, sin embargo, la capacitancia se mantiene sin variaciones.

Al hacer este diseño, también debe considerarse que existen dos riesgos muy importantes al instalar los filtros en el sistema eléctrico:

- a) La posibilidad de crear condiciones de resonancia adversas al sistema.
- b) Que el filtro tienda a absorber las armónicas de otras fuentes externas a las que se pretende, y por lo tanto se sobrecargue.

El filtro debe ser diseñado para poder soportar toda la corriente armónica que se espera puede pasar a través de él.

#### **b) Filtrado en alimentadores de distribución:**

Cuando las fuentes de armónicas se encuentran muy dispersas o cuando son desconocidas, el filtrado individual se convierte en una opción poco práctica y muy costosa.

Cargas tales como iluminación o televisiones, son ejemplos de cargas dispersas muy difíciles de identificar o de separar como fuentes individuales de armónicas. Además, el filtrado individual tampoco es recomendable por tratarse de cargas con demandas muy pequeñas.

En estos casos, si los niveles de armónicas son elevados, debe igualmente adoptarse una medida correctiva.

Es posible instalar filtros de armónicas para alimentadores completos, pero su diseño debe de realizarse con gran cuidado contemplando que las condiciones de operación del alimentador pueden cambiar a futuro y que tales cambios no deberán de hacer caer al filtro en condiciones de resonancia.

En este capítulo y en los anteriores se ha planteado qué son las armónicas, sus causas y consecuencias, así como la forma en que pueden ser detectadas y controladas.

Teniendo ya un panorama completo a manera de marco teórico en lo que a las armónicas se refiere, a continuación se presenta el planteamiento, propuesta de solución e implementación de dicha solución para el caso de una planta industrial.

## Capítulo 6

# Análisis y solución de un problema real de armónicas en una Planta Industrial

### 1. Antecedentes:

El caso analizado es el de una planta industrial, la cual se dedica a la fabricación de autopartes.

En dicha planta se llevan a cabo principalmente procesos de fundición con hornos tanto eléctricos como de gas y posteriormente se efectúa el moldeo y acabados definitivos mediante tornos y taladros de control numérico.

El personal responsable de mantenimiento, preocupado por situaciones "anormales" en su sistema eléctrico solicitó la realización del presente estudio para determinar la naturaleza del problema y su posible solución.

Por otra parte, y debido a las importantes penalizaciones aplicadas en su consumo mensual por bajo factor de potencia, se solicitó también el análisis para su corrección en toda la instalación.

### 2. Descripción de las instalaciones:

El sistema eléctrico cuenta con una doble acometida en 23KV en una subestación tipo intemperie y de la que dependen dos circuitos principales.

El primero de ellos alimenta a una subestación compacta tipo intemperie en gabinete que se encuentra ubicada junto a la subestación receptora y que se denomina como TR-1.

El segundo está constituido por una línea aérea trifásica que alimenta a cuatro subestaciones compactas tipo interior que se encuentran concentradas en la Nave N° 1 de la planta industrial, denominadas TR-2 a TR-5.

Las cinco subestaciones cuentan con un transformador reductor de 23KV a 440V cada una y tienen las siguientes aplicaciones:

#### - Alimentador TR-1:

Del alimentador TR-1, que cuenta con un transformador con capacidad nominal de 750KVA, dependen todos los equipos de control numérico instalados en la planta, un laboratorio de pruebas que incluye a un equipo que cuenta con un motor controlado por un variador de velocidad, además de oficinas administrativas que incluyen computadoras. Todos estos equipos se encuentran en lo que se conoce como la Nave N° 2.

#### - Alimentador TR-2:

Este alimentador, con un transformador de capacidad nominal de 500KVA, suministra energía a un par de compresores, de los cuales normalmente opera uno solo a la vez, pero ante un incremento de la demanda en presión, pueden operar en forma simultánea.

- Alimentador TR-3:

Este alimentador, que cuenta también con un transformador de 500KVA, suministra energía a varios compresores pequeños y a las bombas del sistema conta incendios.

- Alimentador TR-4:

Con un transformador de 750KVA, energiza a un electroducto del que dependen hornos de tipo resistivo, una línea de transportadores y equipos auxiliares en el proceso de forja en la Nave Nº 1.

- Alimentador TR-5:

También de 750KVA, este alimentador suministra energía a la segunda línea de producción de la Nave Nº 1 que igualmente incluye hornos, transportadores y auxiliares en el proceso de forja.

### 3. Planteamiento:

Como primer paso, se consultó con el personal de la planta, tanto responsables de los equipos, como gerentes involucrados y algunos operadores con respecto a los problemas que han existido y se identificaron los siguientes como los más sobresalientes:

- Han ocurrido daños irreparables en tarjetas de control electrónico de los equipos de control numérico, cada una con un valor aproximado de USD\$7,000.00 dólares estadounidenses. También se han presentado daños en las fuentes de poder de los mismos equipos.

- Frecuentemente se disparan y se dañan interruptores termomagnéticos, especialmente en la zona de los equipos de control numérico. Estos interruptores están conectados a un electroducto.

- Calentamiento excesivo de los electroductos aun cuando su carga está considerablemente por debajo de su capacidad nominal.

- Existe una importante penalización por bajo factor de potencia.

De acuerdo con esta información, se plantearon las siguientes hipótesis:

1. El comportamiento de los interruptores con disparos inesperados y frecuentes fallas definitivas, así como el daño severo a tarjetas electrónicas de control, son características que indican una alta probabilidad de la existencia de importantes niveles de armónicas en el sistema.

2. El importante número de equipos con componentes electrónicos de potencia y de control, se consideró como una condición típica para la existencia de elevados niveles de armónicas.

3. De existir un problema de armónicas, se consideró al alimentador TR-1 como el más crítico por contener el mayor número de equipos con probabilidades de generación de armónicas.

El personal de la planta ha reportado el mayor número de situaciones anormales dentro del área dependiente del alimentador TR-1, especialmente en el área de equipos de control numérico y sus alimentadores individuales y de conjunto, por lo que se planteó a esta zona como la de mayor conflicto.

Sin embargo, se consideró la posibilidad de la existencia de armónicas en los cinco alimentadores, especialmente por la posibilidad de una influencia de un alimentador a otro.

4. Debido a que uno de los objetivos del proyecto fue la corrección del factor de potencia integral de la planta, se planteó la necesidad de verificar los niveles de armónicas cuidadosamente en cada uno de los alimentadores para evitar daños a los equipos requeridos para tal corrección.

5. Las condiciones existentes dentro de la planta misma, permitieron suponer que de encontrarse un problema de armónicas, este tiene su origen dentro del propio sistema eléctrico y no es debido a distorsiones en el suministro eléctrico proporcionado por la Compañía Suministradora. Esto desde luego, se planteó como una alta probabilidad sujeta a comprobación.

6. Por la naturaleza de la carga en cada uno de los alimentadores, se consideró que el bajo factor de potencia existente en el conjunto, se debe a la contribución particular y acumulada de cada uno de los alimentadores, por lo que se propuso un estudio detallado individual con el objetivo de establecer igualmente soluciones individuales para cada caso y mejorar el bajo factor de potencia en conjunto.

#### **4. Propuesta del Diagnóstico:**

Para la ejecución de este Diagnóstico, se decidió el siguiente proceso de desarrollo:

a) Para conocer el comportamiento representativo del sistema eléctrico de esta planta que opera las 24 horas, se estableció, junto con el personal responsable, que un período de 4 horas es típico del funcionamiento de cada alimentador en un día normal de operaciones, ya que no hay grandes variaciones en el proceso, y solamente por las noches se incrementa la carga con el alumbrado. Sin embargo, durante el período nocturno también existe un decremento en la carga al disminuir las actividades en las oficinas.

En el caso de determinarse la presencia de armónicas en alguno de los alimentadores, se estableció que sería necesario ampliar el período de medición para conocer su comportamiento con más detalle.

El análisis propuesto se realizó midiendo y graficando los parámetros eléctricos que a continuación se enuncian por los períodos propuestos:

- Voltaje en cada una de las fases y promedio trifásico
- Corriente en cada una de las fases y promedio trifásico
- Factores de cresta y de forma de las ondas senoidales de voltaje y de corriente
- Espectro de las ondas de voltaje y de corriente
- Forma de onda de voltaje, corriente y potencia en cada fase
- Potencia Activa en KW
- Potencia Reactiva en KVAR
- Potencia Aparente en KVA
- Factor de Potencia
- Factor de Potencia de desplazamiento
- Distorsión armónica total en voltaje
- Distorsión armónica total en corriente
- Armónicas más importantes en voltaje o en corriente en cada una de las fases y en los hilos neutros
- Voltaje y corriente de neutro
- Voltaje de neutro a tierra
- Frecuencia

b) Partiendo del supuesto de que el problema más grave existe en el alimentador TR-1, se decidió llevar a cabo el análisis de los otros cuatro alimentadores primero para evaluar si están o no afectados por las armónicas y determinar la forma más adecuada para la corrección del factor de potencia en lo individual. De no encontrarse importantes niveles de armónicas en estos alimentadores, se decidió hacer análisis por 4 horas en cada uno de ellos permitiendo dedicar un período más largo al alimentador TR-1 tanto en su transformador, como en las cargas individuales.

c) Durante las mediciones en los alimentadores, se determinó la necesidad de llevar a cabo mediciones en puntos particulares a través de cada uno de los alimentadores en busca de posibles situaciones anormales o de falla, tales como corrientes o voltajes más elevados sobre las capacidades nominales de los equipos o componentes, así como la presencia de distorsiones.

Este estudio se llevó a cabo analizando el comportamiento de las ondas de voltaje y corriente mediante vóltmetros y ampérmetros capaces de registrar distorsiones.

d) Para el alimentador TR-1 se estableció la necesidad de analizarlo por un período de 24 horas para incluir en el análisis las condiciones de arranques, paros, situaciones de aumentos y disminuciones de carga y las condiciones de operación nocturna.

e) Considerando al mismo alimentador TR-1 como aquel con las mayores posibilidades de problemas debidos a armónicas, se propuso hacer un estudio detallado a través del sistema eléctrico dependiente de él, particularmente en las máquinas más importantes como los tornos y taladros de control numérico, para los que se determinó que un tiempo de medición de entre 15 y 30 minutos sería adecuado para incluir en él arranques y paros de las máquinas así como posibles inyecciones de armónicas entre unos y otros equipos.

Estas mediciones se planearon de forma que se analizaron prácticamente todos estos equipos de manera individual.

f) El laboratorio de pruebas también se incluyó dentro de este estudio con un análisis de una hora.

## **5. Desarrollo y resultados del Diagnóstico:**

### **5.1) Alimentadores generales**

A continuación se reportan los resultados obtenidos en cada uno de los cinco alimentadores principales. Estos resultados fueron obtenidos aplicando directamente equipos de medición y graficadores en el lado secundario de cada uno de los transformadores. En los casos en que se estimó necesario, se efectuaron mediciones complementarias en puntos específicos a través del sistema eléctrico derivado.

Los resultados se presentan en forma de tabla en la que se observaciones con respecto a si el comportamiento eléctrico en cada parámetro es adecuado o si no lo es. En el caso negativo, se profundiza en cada situación particular:

### **Alimentador TR-2:**

Los resultados obtenidos en el Alimentador TR-2 se encuentran resumidos en la Tabla 1. Ver también el Apéndice 1 que contiene información gráfica.

El análisis de las ondas senoidales de voltaje y corriente en este alimentador mostró una onda libre de distorsiones, con factores de cresta de 1.41 y de forma de 1.1, valores típicos de una perfectamente senoidal a 60Hz.

Aun cuando el valor de voltaje de neutro a tierra no es elevado, debido a la naturaleza de las cargas trifásicas dependientes de este alimentador, no existe una conexión de neutro a tierra como las normas lo requieren. Esto tiene como consecuencia que el neutro no sea un drenaje totalmente eficaz en el eventual caso de una falla o de un severo desbalanceo, en donde los excesos de corriente que existan en una fase, deberán eliminarse hacia tierra a través del neutro.

Adicionalmente, el que el sistema no esté referido apropiadamente a una tierra física, ocasiona que en el caso de una falla las protecciones retarden su operación, ya que al tener una referencia flotante, los componentes de disparo de las protecciones no detecten la falla en su magnitud real.

En el alimentador TR-2 la demanda está constituida por dos compresores. Cuando se aplicó el estudio, uno de ellos, el Compresor N° 3 se encontraba

fuera de servicio y es importante considerar este aspecto, ya que siendo de la misma capacidad del otro compresor, por lo que en el posible caso de que ambos operen en forma simultánea, la carga se duplicará.

| TR-2                       | Min   | Prom. | Máx.  | Normal |                           |
|----------------------------|-------|-------|-------|--------|---------------------------|
|                            |       |       |       | Si/No  | Observaciones             |
| <b>Volaje</b>              |       |       |       |        |                           |
| Voltaje                    | 254.1 | 255.6 | 257.2 | X      |                           |
| Voltaje N-T                | 0.2   | 0.4   | 0.5   | X      |                           |
| Desbalanceo                | 0.3   | 0.3   | 0.4   | X      |                           |
| <b>Corriente</b>           |       |       |       |        |                           |
| Corriente OA               | 127.3 | 241.4 | 250.3 | X      |                           |
| Corriente OB               | 130.9 | 246.2 | 255.5 | X      |                           |
| Corriente OC               | 122.8 | 236.1 | 245.1 | X      |                           |
| Corriente total            | 381.0 | 723.7 | 750.9 | X      |                           |
| Corriente en N             | 2.1   | 4.1   | 4.4   | X      |                           |
| Desbalanceo                | 1.9   | 2.1   | 3.4   | X      |                           |
| <b>Potencia</b>            |       |       |       |        |                           |
| KVA                        | 98.0  | 185.0 | 191.4 | X      |                           |
| KW                         | 77.2  | 160.2 | 166.1 | X      |                           |
| KVAR                       | 60.8  | 93.1  | 96.0  | X      |                           |
| Factor de Potencia         | 0.79  | 0.87  | 0.87  | X      | F.P. inferior al mínimo   |
| F.P. de desplazamiento     | 0.78  | 0.86  | 0.87  | X      | F.P.D. inferior al mínimo |
| <b>Distorsión armónica</b> |       |       |       |        |                           |
| DAT voltaje                | 1.0   | 1.2   | 1.8   | X      |                           |
| DAT corriente              | 1.2   | 1.5   | 2.2   | X      |                           |

TABLA 1

La demanda de potencia aparente es de 185KVA en promedio con picos máximos de 191.4KVA que representa el 35% de la capacidad disponible del transformador.

El factor de potencia que en promedio se mantiene en 87% sin importantes variaciones está por debajo del 90% mínimo requerido por la Compañía Suministradora, por lo que la carga en este alimentador contribuye al bajo factor de potencia global de la planta.

Los niveles existentes de voltajes y corrientes armónicos son muy bajos y no representan peligro para los equipos requeridos para la corrección del factor de potencia en el alimentador TR-2.

### **Alimentador TR-3:**

Los resultados obtenidos en el Alimentador TR-3 se encuentran resumidos en la Tabla 2. Ver también el Apéndice 1 que contiene información gráfica.

Al igual que en el alimentador TR-2, las ondas senoidales de voltaje y de corriente se mantienen libres de distorsiones.

Tampoco existe aquí una conexión de neutro a tierra adecuada con las consecuencias mencionadas.



La demanda de potencia aparente es de 189.8KVA en promedio con picos máximos sostenidos de 262.5KVA. Comparada esta demanda con la capacidad nominal del transformador, que es de 500KVA, se puede observar que éste se encuentra trabajando al 50% de su capacidad y puede soportar un incremento de carga de otro 50%.

| TR-3                       |       |       |        | Normal |    | Observaciones |
|----------------------------|-------|-------|--------|--------|----|---------------|
|                            | Min   | Prom. | Máx.   | Sí     | No |               |
| <b>Voltaje</b>             |       |       |        |        |    |               |
| Voltaje                    | 257.2 | 258.8 | 260.0  | X      |    |               |
| Voltaje N-T                | 0.3   | 0.4   | 0.7    | X      |    |               |
| Desbalanceo                | 0.4   | 0.3   | 0.4    | X      |    |               |
| <b>Corriente</b>           |       |       |        |        |    |               |
| Corriente OA               | 189.9 | 234.2 | 342.5  | X      |    |               |
| Corriente OB               | 191.9 | 236.4 | 346.3  | X      |    |               |
| Corriente OC               | 174.2 | 217.5 | 324.3  | X      |    |               |
| Corriente total            | 556.0 | 688.1 | 1013.1 | X      |    |               |
| Corriente en N             | 2.7   | 4.1   | 11.1   | X      |    |               |
| Desbalanceo                | 3.6   | 5.3   | 6.6    | X      |    |               |
| <b>Potencia</b>            |       |       |        |        |    |               |
| KVA                        | 143.9 | 178.0 | 260.9  | X      |    |               |
| KW                         | 110.6 | 145.1 | 224.3  | X      |    |               |
| KVAH                       | 92.5  | 103.2 | 134.6  | X      |    |               |
| Factor de Potencia         | 0.77  | 0.81  | 0.86   | X      |    | F.P. muy bajo |
| F.P. de desplazamiento     | 0.77  | 0.81  | 0.86   | X      |    | F.P. muy bajo |
| <b>Distorsión armónica</b> |       |       |        |        |    |               |
| DAT voltaje                | 1.1   | 1.3   | 1.4    | X      |    |               |
| DAT corriente              | 1.4   | 1.9   | 2.5    | X      |    |               |

TABLA 2

Existe un bajo factor de potencia de 81% con picos mínimos de hasta 75%. Esta situación influye de manera muy importante al bajo factor de potencia global que se tiene en la planta.

Debido a que este alimentador requiere la corrección de su bajo factor de potencia, la instalación de los equipos para realizar dicha corrección no tendrá problema alguno por la presencia de ondas de distorsión armónica ya que sus niveles tanto en voltaje como en corriente son muy bajos.

### **Alimentador TR-4:**

Una parte importante de la carga dependiente de este alimentador se encuentra conectada al mismo a través de un electroducto en el que se dañan con cierta frecuencia interruptores electromagnéticos.

Analizando detalladamente la situación, se determinó que la conexión mecánica del interruptor a las barras del electroducto es muy deficiente debido al propio diseño de los equipos, tanto interruptor como electroducto. Esto produce que la superficie de contacto sea considerablemente disminuida. En realidad resulta ser mucho menor que la de diseño, existiendo fenómenos de arqueo, incremento de impedancia en la conexión con el consecuente calentamiento y

reducción del área conductiva lo que tiene como resultado el daño definitivo del interruptor en sus conexiones por erosión, o bien, el deterioro de sus elementos térmicos de protección.

Existe una importante fuga de aceite proveniente de este transformador la cual, debe atenderse no sólo para evitar su pérdida con el consecuente daño al transformador, sino que también para evitar su contaminación.

El resuen de resultados en el TR-4 se muestra en la siguiente tabla, ver también el Apéndice 1 que contiene información gráfica.

| TR-4                       |       |       |        | Normal |    | Observaciones             |
|----------------------------|-------|-------|--------|--------|----|---------------------------|
|                            | Min   | Prom. | Máx.   | SI     | No |                           |
| <b>Voltaje</b>             |       |       |        |        |    |                           |
| Voltaje                    | 257.0 | 261.7 | 263.6  | X      |    |                           |
| Voltaje N-T                | 0.0   | 0.1   | 0.3    | X      |    |                           |
| Desbalanceo                | 0.1   | 0.1   | 0.2    | X      |    |                           |
| <b>Corriente</b>           |       |       |        |        |    |                           |
| Corriente ØA               | 201.9 | 334.8 | 605.3  | X      |    |                           |
| Corriente ØB               | 174.8 | 269.4 | 497.5  | X      |    |                           |
| Corriente ØC               | 189.5 | 275.9 | 549.2  | X      |    |                           |
| Corriente total            | 566.2 | 880.1 | 1652.0 | X      |    |                           |
| Corriente en N             | 23.8  | 68.2  | 91.2   |        | X  | Desbalanceo               |
| Desbalanceo                | 6.7   | 13.9  | 20.3   |        | X  | Importante desbalanceo    |
| <b>Potencia</b>            |       |       |        |        |    |                           |
| KVA                        | 148.2 | 230.4 | 427.9  | X      |    |                           |
| KW                         | 121.2 | 205.0 | 333.6  | X      |    |                           |
| KVAR                       | 82.8  | 105.3 | 270.2  | X      |    |                           |
| Factor de Potencia         | 0.67  | 0.89  | 0.93   |        | X  | F.P. inferior al mínimo   |
| F.P. de desplazamiento     | 0.48  | 0.89  | 1.00   |        | X  | F.P.D. inferior al mínimo |
| <b>Distorsión armónica</b> |       |       |        |        |    |                           |
| DAT voltaje                | 1.0   | 1.2   | 1.4    | X      |    |                           |
| DAT corriente              | 0.6   | 5.3   | 2.6    | X      |    |                           |

**TABLA 3**

Nuevamente las ondas de voltaje y de corriente se presentan libres de distorsiones y con valores de factores de cresta y de forma apropiados.

La conexión de neutro a tierra en este caso sí es adecuada.

Se registró un importante desbalanceo en corriente del 13.9% en promedio con picos máximos de hasta 20.3%. Este desbalanceo se refleja también en la corriente que lleva el hilo neutro que en promedio es de 68.2A con picos de 91.2A. La fase A es la de mayor carga, mientras que las otras dos fases se mantienen con una demanda muy similar. El desbalanceo aquí encontrado, se debe a cargas monofásicas que, de ser posible por la naturaleza de las cargas, deben equilibrarse entre las tres fases.

La demanda en el alimentador TR-4 es de 230.4KVA en promedio, pero se presentan picos sostenidos de mayor demanda que llegan hasta 330KVA, por lo que el transformador, de 750KVA, está operando en los períodos de mayor

demanda, a menos de 50% de su capacidad nominal, por lo que sin problema alguno puede todavía duplicarse su carga.

El factor de potencia mantiene un promedio a su vez de un 89%, pero la presencia de frecuentes períodos más bajos sostenidos, dependiendo de la operación de la carga hace recomendable considerar un valor de f.p. de 86% para el diseño del equipo necesario para su corrección. En los casos más críticos, se mantienen valores de un 80% de factor de potencia, pero estos períodos son breves.

Como en los casos anteriores, los niveles de armónicas en voltaje y corriente son muy pequeños y no representan problema para la instalación de equipos de corrección para el bajo factor de potencia.

### **Alimentador TR-5:**

La siguiente tabla contiene el resumen de resultados en el Alimentador TR-5. Ver también el Apéndice 1 que contiene información gráfica.

| TR-5                       |       | Prom. | Máx.   | Normal |    | Observaciones      |
|----------------------------|-------|-------|--------|--------|----|--------------------|
|                            |       |       |        | Sí     | No |                    |
| <b>Voltaje</b>             |       |       |        |        |    |                    |
| Voltaje                    | 255.2 | 257.4 | 259.1  | X      |    |                    |
| Voltaje N-T                | 0.0   | 0.0   | 0.2    | X      |    |                    |
| Desbalanceo                | 0.1   | 0.3   | 0.4    | X      |    |                    |
| <b>Corriente</b>           |       |       |        |        |    |                    |
| Corriente OA               | 143.9 | 219.3 | 334.8  | X      |    |                    |
| Corriente OB               | 133.8 | 228.0 | 353.9  | X      |    |                    |
| Corriente OC               | 157.6 | 246.9 | 362.0  | X      |    |                    |
| Corriente total            | 435.3 | 694.2 | 1050.7 | X      |    |                    |
| Corriente en N             | 27.7  | 35.3  | 45.9   | X      |    | Desbalanceo        |
| Desbalanceo                | 3.5   | 7.0   | 19.5   |        | X  | Ligero desbalanceo |
| <b>Potencia</b>            |       |       |        |        |    |                    |
| KVA                        | 112.2 | 178.7 | 269.4  | X      |    |                    |
| KW                         | 76.0  | 143.9 | 244.4  | X      |    |                    |
| KVAR                       | 82.1  | 104.8 | 170.3  | X      |    |                    |
| Factor de Potencia         | 0.63  | 0.80  | 0.91   |        | X  | F.P. bajo          |
| F.P. de desplazamiento     | 0.63  | 0.80  | 0.91   |        | X  | F.P.D. bajo        |
| <b>Distorsión armónica</b> |       |       |        |        |    |                    |
| DAT voltaje                | 0.8   | 1.0   | 1.2    | X      |    |                    |
| DAT corriente              | 1.0   | 1.4   | 3.3    | X      |    |                    |

**TABLA 4**

Las ondas de voltaje y de corriente una vez más se muestran libres de distorsión y la conexión de neutro a tierra es sólida.

Se presenta un desbalanceo de corriente entre fases que llega a ser importante por períodos sostenidos. Las diversas cargas monofásicas producen esta situación, aunque es posible mejorar estas condiciones.

La demanda promedio en este alimentador es de 178.7KVA, con picos máximos de 269.4KVA y picos sostenidos de 215KVA. Por lo tanto, el transformador de 750KVA está trabajando al 30% de su capacidad.

Se tiene un factor de potencia de 80% en promedio con picos mínimos sostenidos de hasta 70%. Este alimentador, es por lo tanto, uno de los principales causantes del bajo factor de potencia global del sistema.

Siendo que este alimentador es el que presenta el factor de potencia más bajo de los de la subestación interior, no contiene niveles de armónicas que pudieran poner en peligro al equipo para la corrección del factor de potencia.

### **Alimentador TR-1:**

Los resultados obtenidos en los alimentadores TR-2 a TR-5 son muy interesantes, ya que descartan la hipótesis de que en todos los alimentadores de la planta existan ondas armónicas, pues los valores registrados en todos ellos son muy bajos quedando por analizar exclusivamente el alimentador TR-1 y su carga.

Por lo tanto, se propuso hacer un análisis más detallado del alimentador TR-1, siendo que de existir armónicas, sólo en él encontrarían. Para tal fin, se determinó aplicar el equipo de análisis por un período de 20 horas, incluyendo todo el turno nocturno y parte de los dos turnos diurnos.

Esta es una de las áreas de mayor conflicto en la planta debido a que se han dañado frecuentemente las tarjetas de control electrónico con que cuentan esos equipos.

En la Tabla 5 se presentan los resultados obtenidos en el lado secundario del transformador en la subestación de la que depende el alimentador TR-1. Ver también el Apéndice 1 que contiene una amplia información gráfica de este alimentador.

La demanda de potencia aparente en este alimentador es de 281.7KVA en promedio con picos máximos sostenidos de 424.4KVA. Esto indica que el transformador opera al 55% de su capacidad nominal.

La demanda de potencia reactiva existente en este alimentador es muy alta y produce el más bajo factor de potencia de entre los cinco alimentadores existentes en la planta con un promedio de 74% con picos mínimos sostenidos de 48% y máximos de 84% lo que influye seriamente en el bajo factor de potencia global de toda la planta.

Para la corrección del factor de potencia deberá de tomarse muy en cuenta la distorsión existente en las ondas de corriente que adelante se trata.

En el análisis de las ondas de voltaje se encontró que los niveles de distorsión armónica se mantienen aceptables.

| TR-1                          |       |        |        | Normal |    | Observaciones            |
|-------------------------------|-------|--------|--------|--------|----|--------------------------|
|                               | Mín.  | Prom.  | Máx.   | Sí     | No |                          |
| <b>Voltaje</b>                |       |        |        |        |    |                          |
| Voltaje                       | 257.6 | 260.9  | 263.2  | X      |    |                          |
| Voltaje N-T                   | 0.0   | 0.0    | 0.2    | X      |    |                          |
| Desbalanceo                   | 0.2   | 0.3    | 0.4    | X      |    |                          |
| <b>Corriente</b>              |       |        |        |        |    |                          |
| Corriente OA                  | 265.1 | 405.8  | 605.6  | X      |    |                          |
| Corriente OB                  | 296.3 | 443.3  | 649.9  | X      |    |                          |
| Corriente OC                  | 300.9 | 440.7  | 640.7  | X      |    |                          |
| Corriente total               | 862.3 | 1289.8 | 1896.2 | X      |    |                          |
| Corriente en N                | 20.7  | 23.4   | 26.1   | X      |    |                          |
| Desbalanceo                   | 2.9   | 4.0    | 11.0   | X      |    |                          |
| <b>Potencia</b>               |       |        |        |        |    |                          |
| KVA                           | 227.2 | 336.5  | 485.8  |        |    |                          |
| KW                            | 124.6 | 251.2  | 392.1  |        |    |                          |
| KVAR                          | 182.4 | 223.0  | 350.3  |        |    |                          |
| Factor de Potencia            | 0.47  | 0.74   | 0.84   | X      |    | F.P. promedio muy bajo   |
| F.P. de desplazamiento        | 0.48  | 0.74   | 0.84   | X      |    | F.P.D. promedio muy bajo |
| <b>Distorsión armónica</b>    |       |        |        |        |    |                          |
| DAT voltaje                   | 0.9   | 1.3    | 3.7    | X      |    |                          |
| DAT corriente                 | 2.3   | 4.7    | 24.6   | X      |    | Ver conclusiones         |
| <b>Armónicas Individuales</b> |       |        |        |        |    |                          |
| DAT corriente en el neutro    | 94.1  | 118.2  | 161.6  |        |    | Valor alto               |
| 3a armónica - corriente       | 0.8   | 1.4    | 2.6    |        |    |                          |
| 5a armónica - corriente       | 0.5   | 3.8    | 18.5   |        |    | Armónica más importante  |
| 7a armónica - corriente       | 0.1   | 1.9    | 9.3    |        |    |                          |
| 11a armónica - corriente      | 0.1   | 0.7    | 8.0    |        |    |                          |

TABLA 5

Sin embargo en corriente se observó que aun cuando el promedio de distorsión armónica es del 4.7% se presentan picos de distorsión por varios minutos por encima del 15% y frecuentemente hasta de un 20%.

Al presentarse un período de alta distorsión los valores medidos de factor de cresta en las diferentes fases fueron de 1.5% para la fase A, 2% para la fase B y 1.7% para la fase C, superiores al normal de 1.4142 y que indican una importante deformación de la forma de onda.

Si bien, estos niveles apenas exceden los niveles recomendables de distorsión armónica en la subestación, son indicadores de una posible distorsión armónica de niveles más graves en los circuitos derivados dependientes del alimentador TR-1, por lo que se planteó como necesario un estudio detallado en la carga. El análisis individual de ondas armónicas, reveló que la 5a armónica es la más importante entre las presentes en este sistema, y es la única que excede los niveles recomendables al presentarse picos máximos.

Los equipos de control numérico contienen rectificadores e inversores, así como gran cantidad de circuitos electrónicos de control incluyendo controladores de velocidad. Algunos de los equipos cuentan para su operación con motores de corriente directa que requieren rectificadores de gran tamaño. Todos estos

dispositivos y componentes son grandes contribuyentes para la alta generación de armónicas, por lo que se procedió a realizar el estudio detallado entre ellos.

Es muy importante destacar que el nivel de armónicas que existe en este alimentador, resulta peligroso para los capacitores requeridos para corregir el bajo factor de potencia en el alimentador TR-1.

### **Tornos y laboratorio de pruebas:**

El análisis particular que se aplicó a cada una de las principales máquinas dependientes del alimentador TR-1, que fueron ocho de diez tornos o taladros de control numérico y el laboratorio de pruebas de resistencia, revela lo siguiente:

#### **a) Tornos y taladros de control numérico:**

Las tablas 6, 7, 8 y 9 presentan un resumen del comportamiento eléctrico de los equipos:

| Máquina →                  |        | TMO-1  |        |        | TMO-2  |        |        | TMO-4  |        |        |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Parámetro analizado        | UNIDAD | Min    | Prom   | Máx    | Min    | Prom   | Máx    | Min    | Prom   | Máx    |
| Demanda promedio           | KW     | -      | 9.07   | 68.22  | -      | 9.66   | 69.81  | -      | 13.52  | 103.00 |
| Factor de potencia         | %      | 0.15   | 0.67   | 0.84   | 0.25   | 0.72   | 0.83   | 0.24   | 0.74   | 0.93   |
| F.P. de desplazamiento     | %      | 0.30   | 0.77   | 0.86   | 0.36   | 0.77   | 0.93   | 0.51   | 0.85   | 1.00   |
| DAT voltaje                | %      | 0.70   | 1.10   | 2.60   | 1.00   | 1.50   | 3.20   | 1.20   | 1.50   | 3.40   |
| DAT corriente              | %      | 8.50   | 32.30  | 63.60  | 8.50   | 18.00  | 49.90  | 11.00  | 32.20  | 110.30 |
| DAT corriente en neutro    | %      | 193.50 | 586.00 | 999.90 | 214.30 | 323.40 | 729.20 | 112.60 | 269.60 | 999.90 |
| 3a armónica en corriente   | %      | 0.40   | 5.90   | 10.30  | 1.00   | 5.90   | 8.30   | 1.30   | 5.70   | 11.70  |
| 5a armónica en corriente   | %      | 4.90   | 24.80  | 54.80  | 4.50   | 13.20  | 37.80  | 6.10   | 25.40  | 62.80  |
| 7a armónica en corriente   | %      | 1.30   | 15.90  | 33.60  | 1.40   | 5.80   | 28.40  | 3.60   | 15.50  | 39.60  |
| 11er armónica en corriente | %      | 0.90   | 3.30   | 11.00  | 0.90   | 2.40   | 12.10  | 1.60   | 4.90   | 32.50  |

TABLA 6

| Máquina →                  |        | TMO-5  |        |        | TMO-6  |        |        |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Parámetro analizado        | UNIDAD | Min    | Prom   | Máx    | Min    | Prom   | Máx    |
| Demanda promedio           | KW     | -      | 3.997  | 97.32  | -      | 10.66  | 100.99 |
| Factor de potencia         | %      | 0.39   | 0.65   | 0.90   | 0.43   | 0.70   | 0.93   |
| F.P. de desplazamiento     | %      | 0.48   | 0.70   | 0.92   | 0.44   | 0.79   | 0.99   |
| DAT voltaje                | %      | 0.70   | 0.90   | 3.10   | 0.90   | 1.70   | 5.80   |
| DAT corriente              | %      | 13.30  | 24.30  | 122.60 | 13.10  | 28.50  | 76.00  |
| DAT corriente en neutro    | %      | 148.00 | 254.70 | 999.90 | 138.60 | 292.90 | 999.90 |
| 3a armónica en corriente   | %      | 0.60   | 13.60  | 24.80  | 0.90   | 8.70   | 11.70  |
| 5a armónica en corriente   | %      | 7.10   | 14.20  | 60.00  | 6.70   | 21.20  | 50.80  |
| 7a armónica en corriente   | %      | 5.10   | 9.00   | 43.30  | 5.10   | 11.80  | 30.90  |
| 11er armónica en corriente | %      | 1.70   | 4.40   | 39.30  | 1.20   | 4.60   | 25.70  |

TABLA 7

| Máquina →                  |        | CMO-1  |        |        | CMO-3  |        |        |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Parámetro analizado        | UNIDAD | Min    | Prom   | Máx    | Min    | Prom   | Máx    |
| Demanda promedio           | KW     | -      | 6.28   | -      | -      | 5.28   | -      |
| Factor de potencia         | %      | -      | 0.74   | -      | -      | 0.76   | -      |
| F.P. de desplazamiento     | %      | -      | 0.77   | -      | -      | 0.79   | -      |
| DAT voltaje                | %      | 1.20   | 1.60   | 4.40   | 1.10   | 1.70   | 6.10   |
| DAT corriente              | %      | 17.30  | 21.90  | 65.10  | 10.90  | 21.40  | 38.50  |
| DAT corriente en neutro    | %      | 165.50 | 233.10 | 547.10 | 164.90 | 273.40 | 464.80 |
| 3a armónica en corriente   | %      | 1.40   | 2.90   | 13.60  | 0.60   | 2.70   | 4.90   |
| 5a armónica en corriente   | %      | 13.80  | 17.60  | 37.00  | 6.30   | 17.20  | 33.30  |
| 7a armónica en corriente   | %      | 9.10   | 11.50  | 27.20  | 3.80   | 10.70  | 17.80  |
| 11er armónica en corriente | %      | 1.90   | 3.30   | 20.20  | 1.00   | 3.70   | 8.70   |

TABLA 8

| Máquina →                  |        | CMO-4  |        |        | LAB. PRUEBAS |        |        |
|----------------------------|--------|--------|--------|--------|--------------|--------|--------|
| Parámetro analizado        | UNIDAD | Min    | Prom   | Máx    | Min          | Prom   | Máx    |
| Demanda promedio           | KW     | -      | 6.97   | -      | -            | 4.52   | -      |
| Factor de potencia         | %      | -      | 0.81   | -      | -            | 0.68   | -      |
| F.P. de desplazamiento     | %      | -      | 0.84   | -      | -            | 0.99   | -      |
| DAT voltaje                | %      | 0.90   | 1.40   | 3.70   | 1.00         | 1.70   | 5.10   |
| DAT corriente              | %      | 9.80   | 26.30  | 53.20  | 57.80        | 99.20  | 119.10 |
| DAT corriente en neutro    | %      | 152.90 | 273.90 | 610.00 | 136.20       | 565.70 | 999.90 |
| 3a armónica en corriente   | %      | 1.10   | 3.20   | 19.50  | 8.30         | 18.20  | 35.70  |
| 5a armónica en corriente   | %      | 6.70   | 21.20  | 42.00  | 39.80        | 71.50  | 78.70  |
| 7a armónica en corriente   | %      | 4.90   | 13.00  | 26.50  | 22.50        | 54.70  | 64.50  |
| 11er armónica en corriente | %      | 0.80   | 4.40   | 17.10  | 9.10         | 25.80  | 39.90  |

TABLA 9

Estas máquinas constituyen la carga más importante al alimentador TR-1.

En el Apéndice 1 se presentan gráficas del comportamiento eléctrico de la mayoría de los equipos por períodos representativos de operación normal, información que es muy importante debido a las grandes variaciones de todos los parámetros, lo que no puede apreciarse en las tablas anteriores.

El factor de potencia promedio, considerando arranques y paros de las máquinas, oscila entre un 67% y un 76%, por lo que son la razón fundamental del factor de potencia tan bajo que se registra en el alimentador TR-1.

En cuanto a distorsión armónica, en lo que a voltaje se refiere, los promedios en todas las máquinas oscilan en un rango entre 1.2% y 1.7%, que es inferior al 5% máximo recomendado.

Sin embargo, la distorsión armónica total registra valores muy graves.

Para todas las máquinas, el valor de distorsión armónica total en corriente varía entre 8% y 13%

Ya en operación, las máquinas alcanzan picos máximos superiores al 60% y picos sostenidos de entre 38% y 48%.

El problema es muy serio, ya que el estudio aplicado, permitió comprobar que aun con todas las máquinas encendidas y en espera, la distorsión armónica total excede el valor máximo recomendado.

También pudo comprobarse, que al entrar una máquina operación, genera ondas armónicas que influyen sobre el resto de las máquinas.

Si bien, en la subestación se refleja el problema de armónicas, no se presenta con una magnitud tan intensa como en esta zona. Esto permite concluir que el problema es local y debe aislarse de manera individual para evitar que una máquina interfiera con otra.

La presencia de las ondas armónicas en esta área es la razón principal de disturbios tales como calentamientos y daños a las tarjetas de circuitos electrónicos.

Las armónicas de corriente más importantes encontradas fueron la 5a, 7a y 11a, cuyos valores se comportan de la siguiente forma:

- 5a armónica: valores entre 17% y 25% en promedio con las máquinas en operación con picos máximos de hasta 62%.

- 7a armónica: valores entre 10% y 16% en promedio con picos de hasta 39% con las máquinas en operación.

- 11a armónica: valores entre 3.3% y 5% en promedio con picos sostenidos de hasta 20% para algunas máquinas y hasta 32.5% para otras.

El valor máximo recomendable para la presencia de ondas de voltaje individuales es de 12% para las armónicas de orden menor a la 11a y de 7% para la armónica 11 en adelante de acuerdo con la norma IEEE-519.

#### **b) Laboratorio de pruebas:**

La situación en este caso es muy similar a la de los tornos en cuanto a voltaje que se mantiene en 253.9V Ø-N.

El factor de potencia es de 72% con el equipo en espera pero encendido, y con el equipo en operación, debido a que su funcionamiento es constante, se mantiene sin variaciones en un promedio de 68%.

La distorsión armónica total en voltaje es de 1.7% con picos máximos sostenidos de 3% inferiores al 5% máximo recomendado.

Sin embargo, la distorsión armónica total en corriente es muy grave, alcanza picos máximos de hasta 106% sobre la fundamental y mantiene un promedio de 99.2% con la máquina en operación y 68% cuando está en espera.

Esto es lógico debido a la naturaleza de la carga que cuenta con un controlador de velocidad, además de que el laboratorio es el último punto del sistema eléctrico dependiente del alimentador TR-1.



Las armónicas de corriente más importantes encontradas fueron las siguientes:

- 3a. armónica: 18.2% en promedio sin variaciones con el equipo en operación.
- 5a. armónica: 71.5% en promedio sin variaciones con el equipo en operación.
- 7a. armónica: 20.8% en promedio sin variaciones con el equipo en operación.

## **Solución Propuesta:**

### **FACTOR DE POTENCIA:**

El bajo factor de potencia existente en esta planta es de gran trascendencia, ya que mantiene niveles promedio mensuales de un 78%, por lo que las penalizaciones por este concepto por parte de la compañía suministradora son muy altas.

Su corrección mediante la instalación de bancos de capacitores es muy sencilla y los resultados económicos pueden cuantificarse de inmediato, ya que a partir de la fecha de instalación de los mismos, en la facturación de consumo se elimina el cargo de penalización.

En todo México el valor mínimo de factor de potencia requerido por las compañías suministradoras es del 90%, al registrarse valores inferiores se aplica un cargo de penalización, sin embargo y por el contrario, al mantener valores por arriba de ese límite, se aplica una bonificación en la facturación.

Aun cuando la corrección del factor de potencia mediante bancos de capacitores es sencilla, es indispensable observar los siguientes lineamientos y recomendaciones:

Al utilizar para la corrección bancos de capacitores fijos, la potencia de estos en KVAR no debe exceder el 10% la capacidad del transformador del que dependen en KVA. Esta recomendación obedece a que los capacitores fijos normalmente están conectados todo el tiempo aun cuando la carga del sistema es muy baja. Cuando la demanda disminuye, normalmente es porque los equipos importantes, tales como motores se han apagado. Al ocurrir esto, disminuye drásticamente la demanda de potencia reactiva y por lo tanto la aportación permanente del capacitor es excesiva, pasándose de un factor de potencia inductivo a uno capacitivo afectando de manera importante a la regulación de voltaje entre fases en el sistema, pudiéndose presentar picos que dañen a los pocos equipos que se encuentren en operación.

Los bancos automáticos de capacitores no tienen restricciones en cuanto a capacidad en relación al transformador, ya que no existe el riesgo de que corrijan el factor de potencia por arriba del 100% cuando hay poca carga. Estos equipos están conformados por un número predeterminado de bancos de capacitores independientes en un arreglo a manera de "pasos" que cuentan con un sistema de control electrónico, el cual constantemente les permite medir el valor de factor de potencia instantáneo y en base a él activar exclusivamente el número de pasos necesarios para llevar el f.p. lo más cerca posible al valor predeterminado como objetivo.

Esta disposición permite, de así desearse, mantener siempre el f.p. en un valor muy alto, inclusive hasta el 100% si se cuenta con la capacidad necesaria en KVAR para ello.

El nivel de corrientes y voltajes armónicos debe cuidarse en base a los temas y parámetros tratados en los capítulos anteriores, de no hacerse así, existe el muy grave de riesgo de que al instalar los equipos de corrección se creen condiciones de resonancia en el sistema con la consecuente **destrucción** de equipos, empezando por los mismos capacitores.

En el caso de esta planta industrial, los alimentadores TR-2 a TR-5 no presentaron impedimento alguno para la corrección del factor de potencia por corrientes o voltajes armónicos, sin embargo, la capacidad en KVAR requerida sí excede el 10% de la capacidad en KVA del transformador en cada caso, por lo que se determinó la necesidad en todos los casos de bancos automáticos de capacitores.

En el caso de cada uno de estos cuatro alimentadores, tanto los transformadores como los conductores cuentan con una amplia capacidad disponible para soportar futuras expansiones de carga, por lo que se determinó que la opción más económica de corrección sería la instalación de un solo equipo para la corrección de todo el alimentador junto al tablero general, ya que la corrección tiene como objetivo principal la eliminación del cobro de la penalización y no el alivio de componentes del sistema, que de cualquier modo se logra al eliminar de los transformadores la mayor parte de su demanda de potencia reactiva actual.

El factor de potencia objetivo se fija en 97% como el global para toda la planta y el cálculo de los equipos requeridos para lograrlos se hizo contemplando expansiones futuras en la carga de cada uno de los alimentadores. Se determinó el 97% considerando los beneficios de una bonificación por alto factor de potencia.

El equipo requerido para cada alimentador se determinó restando la demanda actual de potencia reactiva en KVAR menos la demanda de potencia reactiva que existirá con el factor de potencia al 97%. El resultado es entonces la capacidad total del banco de capacitores:

$$\text{KVAR}_{\text{cap}} = \text{KW} [\tan(\text{ángcos}(fp_1)) - \tan(\text{ángcos}(fp_2))]$$

|        |                            |  |
|--------|----------------------------|--|
| donde: | $\text{KVAR}_{\text{cap}}$ | Capacidad en KVAR del capacitor          |
|        | KW                         | Demanda de potencia real del alimentador |
|        | $fp_1$                     | Factor de potencia original              |
|        | $fp_2$                     | Factor de potencia objetivo              |

Es importante considerar que la marca de los equipos recomendados para la solución de los problemas en esta planta se especifican a un voltaje nominal de operación de 480V mientras que estos operarán en realidad a 440V. Lo anterior no afecta al equipo excepto en que a un voltaje menor, su capacidad en KVAR se verá disminuida según la siguiente relación:

$$\text{KVAR}_2 = \text{KVAR}_1 \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2$$

|        |                 |   |  |
|--------|-----------------|---|--|
| donde: | $\text{KVAR}_2$ | = | Capacidad en KVAR del capacitor al voltaje 2 |
|        | $\text{KVAR}_1$ | = | Capacidad en KVAR del capacitor al voltaje 1 |
|        | $V_1$           |   | Voltaje nominal del capacitor                |
|        | $V_2$           |   | Voltaje de operación real del capacitor      |

El caso del alimentador TR-1, en donde los niveles armónicos resultaron altos, se trata de manera especial más adelante después de la propuesta de corrección en el resto de los alimentadores.

### Alimentador TR-2:

Para la determinación del banco automático de capacitores requerido en esta alimentador para la corrección del factor de potencia se consideró un promedio de demanda en potencia real de 160KW con un factor de potencia muy constante del 87%. Para llevar el f.p. al 97% se requiere un capacitor de las siguientes características:

$$\begin{aligned} \text{KVAR}_{\text{cap}} &= (160) [\tan(\text{ángcos}(0.87)) - \tan(\text{ángcos}(0.97))] \\ \text{KVAR}_{\text{cap}} &= 50.57 \text{ KVAR} \end{aligned}$$

$$\text{KVAR}_{480V} = 50.57 \left( \frac{480V}{440V} \right)^2 = 60.18 \text{ KVAR}$$

Por lo tanto se requiere un banco de capacitores de 60KVAR @ 480V. Debido a que la carga es muy constante en el circuito, se consideró adecuado estructurar el banco automático con tres pasos de 20KVAR cada uno.

Finalmente, se recomienda aterrizar sólidamente el hilo neutro de este transformador a una tierra física apropiada para que éste cumpla con toda efectividad su función de ser un drenaje ante una sobrecorriente generada por una falla o un severo desbalanceo.

### Alimentador TR-3:

La demanda promedio para este alimentador es de 145KW con un factor de potencia que en promedio es de 81% pero con picos mínimos sostenidos del 79%, por lo tanto, se recomendó la instalación del siguiente banco automático de capacitores:

$$\begin{aligned} \text{KVAR}_{\text{cap}} &= (145) [\tan(\text{ángcos}(0.79)) - \tan(\text{ángcos}(0.97))] \\ \text{KVAR}_{\text{cap}} &= 76.19 \text{ KVAR} \end{aligned}$$

$$\text{KVAR}_{480\text{V}} = 76.19 \frac{(480\text{V})^2}{(440\text{V})^2} = 90.67 \text{ KVAR}$$

Por lo tanto se requiere un banco de capacitores de 90KVAR @ 480V. Debido a que la carga es variable en el circuito, se consideró adecuado estructurar el banco automático con cuatro pasos de 20KVAR cada uno y uno de 10KVAR que permite diferentes combinaciones para lograr ajustes finos en la corrección del factor de potencia.

### Alimentador TR-4:

La demanda promedio para este alimentador es de 205KW, sin embargo, mantiene largos periodos con una demanda de 250KW con un factor de potencia que en promedio es de 89% pero con picos mínimos sostenidos del 86%, por lo tanto, se recomendó la instalación del siguiente banco automático de capacitores:

$$\begin{aligned} \text{KVAR}_{\text{cap}} &= (250) [\tan(\text{ángcos}(0.86)) - \tan(\text{ángcos}(0.97))] \\ \text{KVAR}_{\text{cap}} &= 85.69 \text{ KVAR} \end{aligned}$$

$$\text{KVAR}_{480\text{V}} = 85.69 \frac{(480\text{V})^2}{(440\text{V})^2} = 101.98 \text{ KVAR}$$

Por lo tanto se requiere un banco de capacitores de 100KVAR @ 480V. Debido a la naturaleza variable de la carga en el sistema dependiente de este alimentador, se consideró adecuado estructurar el banco automático con cinco pasos de 20KVAR cada uno que permite diferentes combinaciones para lograr ajustes finos en la corrección del factor de potencia.

### Alimentador TR-5:

La demanda promedio para este alimentador es de 143KW, con un factor de potencia que en promedio es de 80% pero con picos mínimos sostenidos del 76%, por lo tanto, se recomendó la instalación del siguiente banco automático de capacitores:

$$\text{KVAR}_{\text{cap}} = (143) [\tan(\text{ángcos}(0.76)) - \tan(\text{ángcos}(0.97))]$$
$$\text{KVAR}_{\text{cap}} = 86.99 \text{ KVAR}$$

$$\text{KVAR}_{480\text{V}} = 86.99 \frac{(480\text{V})^2}{(440\text{V})^2} = 103.52\text{KVAR}$$

Por lo tanto se requiere un banco de capacitores de 100KVAR @ 480V. Debido a la naturaleza variable de la carga en el sistema dependiente de este alimentador, se consideró adecuado estructurar el banco automático con cinco pasos de 20KVAR cada uno que permite diferentes combinaciones para lograr ajustes finos en la corrección del factor de potencia.

### **Alimentador TR-1:**

En este alimentador se detectaron severos problemas por bajo factor de potencia y por la presencia de corrientes armónicas, además de calentamientos y fallas en el electroducto que suministra energía a la nave 1.

Siendo que la principal causa de ambas situaciones se encuentran en los tornos de control numérico y en el área de laboratorio de pruebas de esfuerzo, se recomienda lo siguiente:

- Corrección del bajo factor de potencia empleando bancos de capacitores fijos de la capacidad requerida para algunas de las máquinas principales, y un banco automático de capacitores complementario que permita corregir el factor de potencia faltante.

- Los niveles de corrientes armónicas tan altos detectados en estas máquinas ponen en grave riesgo la operación y vida útil de los equipos de control electrónico y producen importantes calentamientos en líneas y electroductos. Además, ponen también en peligro a los capacitores, ya que de entrar en resonancia con la frecuencia de las armónicas, se pueden destruir.

- La presencia de estas corrientes armónicas se puede controlar mediante un filtro específicamente diseñado para cada caso. Debido a que el filtro requiere para su construcción de un capacitor, los capacitores requeridos para la corrección del factor de potencia son aprovechables para los filtros lográndose así no solo la corrección del factor de potencia, sino que también el problema de armónicas con un mismo equipo.

- Con este arreglo, se eliminará también una gran parte de los calentamientos que se presentan en el electroducto y que son generados por causa de las armónicas.

- Las mismas recomendaciones que se hacen para los tornos, deben aplicarse al equipo de laboratorio de pruebas de esfuerzo.

- El importante contenido armónico existente en este alimentador, hace necesario observar cuidadosamente los factores de potencia real y de desplazamiento, aunque para fines de facturación, el primero es el que debe corregirse procurando que el segundo no cambie hacia el lado capacitivo.

Analizando los resultados del diagnóstico se determinó que la capacidad total requerida en KVAR por el alimentador TR-1 para llegar al factor de potencia de 97% es de:

$$\begin{aligned} \text{KVAR}_{\text{cap}} &= (350) [\tan(\text{ángcos}(0.70)) - \tan(\text{ángcos}(0.97))] \\ \text{KVAR}_{\text{cap}} &= 269.35\text{KVAR} \end{aligned}$$

Las armónicas en voltaje no presentaron niveles importantes, sin embargo, en corriente la 5a armónica aparece como la más crítica aunque se detectaron importantes niveles de 3a y 7a.

Pudo apreciarse que las máquinas más afectadas por las armónicas son las denominadas CMO que tienen una demanda inferior a las TMO, y es precisamente en las CMO donde se identificó a la 5a armónica como muy crítica.

Se concluyó que el problema de armónicas es de tipo local, es decir, influye entre una máquina y otra en la zona de equipos de control numérico que físicamente se encuentran concentrados en una misma área, pero no afectan al resto de la planta e inclusive, los niveles armónicos en la subestación misma no son muy elevados.

Por esta razón, se decidió erradicar el problema desde su raíz mediante la instalación de los equipos de supresión de armónicas en los alimentadores directos de cada máquina identificada como importante generador de armónicas. En el diseño, resultó indispensable el considerar que la 5a armónica es la más crítica en el sistema y por ello se decidió filtrarla, sin embargo, las otras armónicas existentes, aun cuando no presentan niveles tan críticos, existen en el sistema y aumentan la carga de todos los componentes del sistema eléctrico. Es por esto que se requirió una consideración adicional. Un capacitor diseñado para operar a un voltaje nominal superior que el requerido realmente, es capaz de soportar flujos de corriente más altos que los de un capacitor equivalente con voltaje nominal igual al voltaje requerido. Es decir, un capacitor diseñado para un voltaje nominal de 600V operando en 440V disminuirá su capacidad en KVAR de acuerdo con la relación que se ha manejado en los casos anteriores, pero operando en 440V podrá soportar corrientes y demandas en KVAR superiores.

Analizando los resultados del comportamiento de la demanda de energía en cada una de las máquinas, se puede observar que los valores numéricos que contienen datos de demanda mínima, máxima y promedio no son de gran utilidad pues esa demanda es mucho muy variable y esto se explica porque cada máquina debe ingresar la pieza que va a moldear, posteriormente ejecuta el programa de moldeo, que es cuando ocurre la demanda máxima, sigue un proceso de limpieza del producto y finalmente lo retira para proseguir con otra

pieza. Para el correcto análisis son mucho más apropiadas las gráficas de comportamiento que se obtuvieron en cada caso.

En las gráficas se aprecia claramente que las máquinas TMO, que son tornos de control numérico, demandan mayor potencia que las CMO que son taladros también de control numérico.

Entre las máquinas TMO, las TMO-1 y TMO-2 cuentan con motores de corriente directa, por lo que los rectificadores requeridos son mayores que los del resto de las máquinas.

Esta distinción especial se hace porque los equipos TMO-1 y 2 son los que manifiestan una mayor demanda de potencia reactiva. El análisis cuidadoso de las gráficas indica que la demanda en KVAR de cada uno de esos equipos en picos sostenidos es de poco más de 40KVAR, por lo que se decidió corregir el factor de potencia en esos puntos a casi el 100% instalando bancos de capacitores fijos que proporcionarían 40KVAR a 440V y que formarían parte de un filtro de armónicas:

$$\text{KVAR}_{600\text{V}} = 40 \frac{(600\text{V})^2}{(440\text{V})^2} = 74.38\text{KVAR}$$

por lo que se requiere un equipo de 75KVAR @ 600V debido a las consideraciones anteriormente citadas.

Con los mismos criterios, se consideró que el resto de las máquinas TMO mantienen una demanda de potencia reactiva de aproximadamente 20KVAR en los períodos de máxima demanda, por lo que se determinó conveniente la instalación de bancos fijos de capacitores de 20KVAR @ 440V. Debido a que las condiciones de armónicas son iguales a las de los equipos anteriores, también se especificaron equipos a 600V, por lo que las siguientes son las características nominales de los capacitores correspondientes:

$$\text{KVAR}_{600\text{V}} = 20 \frac{(600\text{V})^2}{(440\text{V})^2} = 37.19\text{KVAR}$$

por lo que se recomendó la instalación de bancos de 40KVAR @ 600V.

La demanda de potencia reactiva en los equipos CMO es menor, además de que la distorsión causada por los TMO afecta notablemente a los CMO.

Considerando que con los equipos hasta ahora determinados se corrige en gran medida el bajo factor de potencia existente en el alimentador, y que con estos mismos equipos se suprimen las causas más importantes de la distorsión armónica, el instalar filtros individuales en las máquinas CMO no se consideró necesario.

Siendo que los seis capacitores hasta aquí calculados proporcionan una capacidad total de 166.7 KVAR y la capacidad total requerida para llegar a un

factor de potencia de 97% es de 269KVAR, existe una diferencia de 102.3KVAR que debe ser compensada con un banco automático de capacitores.

Para tal fin, se diseñó un equipo de:

$$\text{KVAR}_{480V} = 102.3 \frac{(480V)^2}{(440V)^2} = 121.73\text{KVAR}$$

siendo uno de 125KVAR @ 480V el más apropiado de los existentes comercialmente por parte del fabricante seleccionado. El equipo se especificó para contar con protección contra ondas armónicas mediante bancos de bobinas para cada banco de capacitores que constituye un paso, ya que aun cuando una cantidad importante de bobinas se suprime con los seis filtros previamente tratados, existe aun un importante flujo armónico debido al resto de los equipos. El banco automático consta de 5 pasos de 25KVAR c/u @ 480V nominales.

### **DISTORSION ARMONICA:**

Para integrar los filtros de armónicas con los capacitores propuestos, deben seguirse los siguientes criterios:

- Para filtrar la corriente a una frecuencia armónica determinada, las impedancias inductiva y capacitiva deben ser de igual magnitud de tal manera que la impedancia resultante a esa frecuencia sea cero representando así un corto circuito para la armónica que se desea eliminar:

$$X_{C_h} = \frac{1}{2\pi fhC} = X_{L_h} = 2\pi fhL$$

donde:  $X_{C_h}$  impedancia del capacitor a la armónica que se desea filtrar.  
 $X_{L_h}$  impedancia del inductor a la armónica que se desea filtrar.  
 $f$  frecuencia de la onda fundamental.  
 $h$  orden de la armónica que se desea filtrar.  
 $C$  capacitancia del capacitor.  
 $L$  inductancia de la bobina.

- Los valores de capacitancia e inductancia son constantes, por lo que despejando su valor de la fórmula anterior y sustituyéndolos para el cálculo de impedancias a la frecuencia fundamental se obtiene:

$$X_C = hX_{C_h} \quad \text{y} \quad X_L = \frac{X_{L_h}}{h}$$

- Siendo que  $X_{C_h} = X_{L_h}$ :

$$X_C = h^2 X_L$$



- Los capacitores por construcción cuentan con las siguientes tolerancias que no deben excederse:

|                |                |
|----------------|----------------|
| Voltaje pico:  | 120% = 1.20 pu |
| Voltaje RMS:   | 110% = 1.10 pu |
| Corriente RMS: | 180% = 1.80 pu |
| KVAR:          | 135% = 1.35 pu |

Para convertir los capacitores previamente especificados en filtros de 5a armónica, deben utilizarse los inductores que a continuación se calculan:

**a) Capacitores de 40KVAR @ 600V:**

$V_{NC}$  = Voltaje nominal del capacitor = 600V

$KVAR_{440V}$  = 21.5KVAR

$V_S$  = Voltaje nominal de operación del sistema = 440V

Armónica a eliminar: 5a armónica (300Hz)

Se calcula la corriente nominal del capacitor:

$$I_{NC} = \frac{40KVAR}{600V (3)^{1/2}} = 38.49A$$

Impedancia del capacitor:

$$X_C = \frac{V^2}{VAR} = \frac{(600)^2}{40000} = 9\Omega$$

Impedancia del inductor:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} = \frac{9}{(5)^2} = 0.36\Omega$$

Por lo que:

$$L = \frac{0.36}{2\pi f} = \frac{0.36}{2\pi 60} = 954.93 \mu H$$

Corriente a frecuencia fundamental:

$$I_1 = \frac{V_N}{X_C - X_L} = 29.40A$$

De acuerdo a lo anteriormente especificado, estos equipos corresponden a los tornos TMO-3 a TMO-6, uno para cada equipo.

Las condiciones normales más críticas que se presentan en estos cuatro equipos, son de una demanda de 80KVA y una distorsión armónica del 40% para la 5a armónica.

Lo anterior significa que la corriente fundamental es de 104A @ 440V y la corriente de 5a armónica de 41.99A @ 40% de distorsión armónica.

Esto representa una distorsión en el capacitor por la 5a armónica del:

$$DAI_{cap} = \frac{I_{5a \text{ arm.}}}{I_1} = \frac{41.99}{29.40} = 1.42$$

La corriente RMS en el capacitor será de:

$$I_{rms} = I_1 (1 + (DAI_{cap})^2)^{1/2} = 29.40 (1 + (1.42)^2)^{1/2} = 51.06A$$

Este corriente es superior en un 32.66% a la corriente nominal del capacitor, pero inferior al 80% máximo permitido.

Voltaje a la frecuencia fundamental:

$$V_1 = I_1 X_C = (29.40)(9)(3)^{1/2} = 458.30V$$

Voltaje a la frecuencia de la 5a armónica (300Hz):

$$V_{arm} = I_{5a \text{ arm.}} \frac{X_C}{h} = 75.58V$$

La distorsión armónica de voltaje en el capacitor es de:

$$DAV_{cap} = \frac{V_{5a \text{ arm.}}}{V_{fund}} = \frac{75.58}{458.3} = 0.1649$$

El voltaje RMS en el capacitor es entonces:

$$V_{rms} = V_{fund} (1 + (DAV_{cap})^2)^{1/2} = 458.30 (1 + (0.16)^2)^{1/2} = 464.49V$$

Este valor es inferior a los 600V nominales del capacitor.

El pico máximo de voltaje será de 458.30V + 75.80 = 533.88V, valor que también es inferior a los 600V nominales.

Los KVAR del capacitor serán:

$$KVAR = (51.06A)(464.49V)(3)^{1/2} = 41.08KVAR$$

Si el capacitor se hubiera especificado, según los valores comerciales, a 480V, para lograr los 21.5KVAR @ 440V, se hubiera requerido de un capacitor de 25.6KVAR @ 480V cuya capacidad sería excedida en 1.60 pu, mientras que utilizando el capacitor seleccionado de 40KVAR @ 600V, la capacidad nominal

en KVAR del capacitor apenas se excede en 1.027 pu, valor inferior al 1.35 pu permisible.

**b) Capacitores de 75KVAR @ 600V:**

$V_{NC}$  = Voltaje nominal del capacitor = 600V

$KVAR_{440V}$  = 40.33KVAR

$V_S$  = Voltaje nominal de operación del sistema = 440V

Armónica a eliminar: 5a armónica (300Hz)

Se calcula la corriente nominal del capacitor:

$$I_{NC} = \frac{75KVAR}{600V (3)^{1/2}} = 72.17A$$

Impedancia del capacitor:

$$X_C = \frac{V^2}{VAR} = \frac{(600)^2}{75000} = 4.8\Omega$$

Impedancia del inductor:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} = \frac{4.8}{(5)^2} = 0.19\Omega$$

Por lo que:

$$L = \frac{0.19}{2\pi f} = \frac{0.19}{2\pi 60} = 503.99 \mu H$$

Corriente a frecuencia fundamental:

$$I_1 = \frac{V_{Neut}}{X_C - X_L} = 55.10A$$

De acuerdo a lo anteriormente especificado, estos equipos corresponden a los tornos TMO-1 y TMO-2, uno para cada equipo.

Las condiciones normales más críticas que se presentan en estos dos equipos, son de una demanda de 100KVA y una distorsión armónica del 40% para la 5a armónica.

Lo anterior significa que la corriente fundamental es de 131A @ 440V y la corriente de 5a armónica de 52.40A @ 40% de distorsión armónica.

Esto representa una distorsión en el capacitor por la 5a armónica del:

$$DAI_{cap} = \frac{I_{5a \text{ arm.}}}{I_1} = \frac{52.40}{55.10} = 0.95$$

La corriente RMS en el capacitor será de:

$$I_{rms} = I_1(1 + (DAI_{cap})^2)^{1/2} = 55.10 (1 + (0.95)^2)^{1/2} = 76.00A$$

Este corriente es superior en un 5.3% a la corriente nominal del capacitor, pero inferior al 80% máximo permitido.

Voltaje a la frecuencia fundamental:

$$V_1 = I_1 X_C = (55.10)(4.8)(3)^{1/2} = 458.09V$$

Voltaje a la frecuencia de la 5a armónica (300Hz):

$$V_{5arm} = I_{5a arm.} \frac{X_C}{n} = 50.30V$$

La distorsión armónica de voltaje en el capacitor es de:

$$DAV_{cap} = \frac{V_{5a arm.}}{V_{fund}} = \frac{50.30}{458.09} = 0.1098$$

El voltaje RMS en el capacitor es entonces:

$$V_{rms} = V_{fund} (1 + (DAV_{cap})^2)^{1/2} = 458.09 (1 + (0.11)^2)^{1/2} = 460.85V$$

Este valor es inferior a los 600V nominales del capacitor.

El pico máximo de voltaje será de  $458.09V + 50.30 = 508.39V$ , valor que también es inferior a los 600V nominales.

Los KVAR del capacitor serán:

$$KVAR = (76.00A)(460.85V)(3)^{1/2} = 60.66KVAR$$

Si el capacitor se hubiera especificado, según los valores comerciales, a 480V, para lograr los 40.33KVAR @ 440V, se hubiera requerido de un capacitor de 48.00KVAR @ 480V cuya capacidad sería excedida en 1.26 pu, valor inferior al 1.35 pu permisible. Utilizando el capacitor seleccionado de 75KVAR @ 600V, la demanda de 60.66KVAR es inferior a la nominal de 75KVAR, permitiendo al capacitor soportar sin problema alguno los niveles de armónicas existentes a otras frecuencias.

**c) Banco automático de 125KVAR con 5 pasos de 25KVAR @ 480V:**

Por cada paso de 25KVAR:

$V_{NC}$  = Voltaje nominal del capacitor = 480V

$KVAR_{440V}$  = 21KVAR

$V_S$  = Voltaje nominal de operación del sistema = 440V

Armónica a eliminar: 5a armónica (300Hz)

Se calcula la corriente nominal del capacitor:

$$I_{NC} = \frac{25KVAR}{480V (3)^{1/2}} = 30.07A$$

Impedancia del capacitor:

$$X_C = \frac{V^2}{VAR} = \frac{(480)^2}{25000} = 9.22\Omega$$

Impedancia del inductor:

$$X_L = \frac{X_C}{h^2} = \frac{9.22}{(5)^2} = 0.37\Omega$$

Por lo que:

$$L = \frac{0.37}{2\pi f} = \frac{0.37}{2\pi 60} = 981.46 \mu H$$

Corriente a frecuencia fundamental:

$$I_1 = \frac{V_N}{X_C - X_L} = 28.70A$$

Para todos los equipos TMO ya se ha propuesto el filtro adecuado, sin embargo, los equipos CMO, las computadoras instaladas en el sistema y el Laboratorio de Pruebas son generadores de armónicas aunque en menor escala.

Las condiciones normales más críticas que se presentan en el lado secundario del transformador, son de una demanda de 430KVA y una distorsión armónica del 20% para la 5a armónica.

Lo anterior significa que la corriente fundamental es de 564A @ 440V y la corriente de 5a armónica de 112.80A @ 20% de distorsión armónica. Esto significa que cada paso deberá absorber un máximo de 22.56A por cada 112.8A de demanda total.

Esto representa una distorsión en el capacitor por la 5a armónica del:

$$DAI_{cap} = \frac{I_{5a \text{ arm.}}}{I_1} = \frac{22.56}{28.70} = 0.79$$

La corriente RMS en el capacitor será de:

$$I_{rms} = I_1 (1 + (DAI_{cap})^2)^{1/2} = 28.70 (1 + (0.79)^2)^{1/2} = 36.58A$$

Este corriente es superior en un 21.65% a la corriente nominal del capacitor, pero inferior al 80% máximo permitido.

Voltaje a la frecuencia fundamental:

$$V_f = I_1 X_C = (28.70)(9.22)(3)^{1/2} = 458.32V$$

Voltaje a la frecuencia de la 5a armónica (300Hz):

$$V_{5arm} = I_{5a \text{ arm.}} \frac{X_C}{h} = 41.60V$$

La distorsión armónica de voltaje en el capacitor es de:

$$DAV_{cap} = \frac{V_{5a \text{ arm.}}}{V_{fund}} = \frac{41.6}{458.32} = 0.09$$

El voltaje RMS en el capacitor es entonces:

$$V_{rms} = V_{fund} (1 + (DAV_{cap})^2)^{1/2} = 458.32 (1 + (0.09)^2)^{1/2} = 460.17V$$

Este valor es inferior a los 480V nominales del capacitor.

El pico máximo de voltaje será de  $458.32V + 41.60 = 499.92V$ , valor que es superior en 4.15% sobre el nominal de 480V, pero inferior al 20% máximo permisible.

Los KVAR del banco de capacitores para cada paso de 25KVAR serán:

$$KVAR = (36.58A)(460.17V)(3)^{1/2} = 29.15KVAR$$

Utilizando los bancos de 25KVAR @ 480V, la demanda de 29.15KVAR es superior en 1.17 pu a la capacidad nominal del banco, pero este valor es inferior al 35% máximo permisible..

### **Resultados de la implementación de la solución:**

Una vez presentado el resultado y las conclusiones del estudio aplicado, se procedió a implementar la solución adquiriendo los equipos diseñados al fabricante.

Los equipos se instalaron de acuerdo al proyecto, obteniéndose los siguientes resultados:

**- Alimentador TR-1:**

En operación normal, el factor de potencia registró valores entre el 98% y el 100% en promedio.

La distorsión armónica total medida en el transformador fue de 0.5% en voltaje y de 5.3% en corriente con valores de 5a armónica del 5%.

Se hicieron pruebas y mediciones con los equipos de control numérico ya con todos los filtros en operación, y se encontró que cuando el equipo analizado está en reposo, pero con el resto funcionando normalmente la distorsión armónica es casi nula con una onda senoidal prácticamente perfecta, por lo que se concluye que la influencia de unos equipos contra otros se ha eliminado.

Por otra parte, al entrar en operación el equipo analizado, genera altos valores de 5a armónica que claramente son absorbidos por el filtro, por lo que la línea desde el filtro y eléctricamente hacia atrás, se mantiene prácticamente libre de distorsiones.

**- Alimentador TR-2:**

Al instalar el banco automático de capacitores para este alimentador, se observó que la carga ha sido incrementada en casi un 100% desde que se hizo el estudio. Aun así, con todos los pasos del banco activados, se logra un factor de potencia que oscila entre el 89% y el 91% en promedio.

Esto no representa problema alguno debido a que el factor de potencia global de la planta se mantendrá muy alto debido a los elevados valores de factor de potencia obtenidos en el resto de los alimentadores.

De cualquier forma, en un futuro podría expandirse la capacidad de los pasos del banco existente, o se podría instalar también un banco fijo de capacitores de hasta 50KVAR @ 440V que elevaría considerablemente el factor de potencia.

**- Alimentador TR-3:**

El valor de factor de potencia obtenido en este alimentador al instalar el banco automático de capacitores fue del 97 a 98% en promedio.

**- Alimentador TR-4:**

El valor de factor de potencia obtenido en este alimentador al instalar el banco automático de capacitores fue del 100% en promedio.

**- Alimentador TR-5:**

El valor de factor de potencia obtenido en este alimentador al instalar el banco automático de capacitores fue del 100% en promedio.

Los resultados indican que se cumplió plenamente los objetivos originales para la corrección del factor de potencia y supresión de ondas armónicas en las instalaciones de esta planta industrial.

En el siguiente capítulo se plantean conclusiones generales relacionadas con el análisis e implementación de soluciones en los sistemas eléctricos con énfasis especial en las precauciones y enfoques de deben observarse.



## Conclusiones

La solución aplicada al caso analizado en el presente trabajo implicó un análisis integral del sistema eléctrico, es decir, no se procedió a corregir el factor de potencia, por ejemplo, instalando simplemente capacitores para la capacidad requerida, ni se solucionó el problema de armónicas en forma aislada.

Para determinar las medidas correctivas, se realizó un estudio integral del sistema eléctrico de toda la planta con un enfoque que inicia desde los alimentadores hacia la carga para conocer con mayor precisión el comportamiento y los puntos de mayor impacto en la generación de disturbios.

Por otra parte, los criterios de diseño y mantenimiento de las instalaciones eléctricas en los últimos años han cambiado y se deberán seguir adecuando constantemente a las necesidades de los nuevos equipos que constituyen la carga de un sistema eléctrico.

Los proyectos para nuevas instalaciones eléctricas, al igual que el análisis aplicado en instalaciones ya existentes con el fin de solucionar problemas o el de llevar a cabo modificaciones o expansiones, deben considerar ahora no sólo la calidad de los materiales y equipos que se utilizarán, sino también la calidad de potencia en el sistema.

Algo que normalmente se consideraba muy sencillo, como es la corrección del factor de potencia, ya no puede hacerse tomando un recibo de consumo y calculando el tamaño del capacitor necesario para elevar ese factor al valor deseado en base a la demanda.

Deben considerarse las condiciones de estabilidad del sistema, los niveles existentes de distorsiones y otra clase de disturbios tales como transitorios, frecuencia de interrupciones en el suministro, regulación de voltaje, etc.

Al atacar un problema de armónicas, es indispensable también el hacer un estudio medido y graficado del comportamiento en el sistema eléctrico y no puede suponerse cosa alguna, ya que un error o la inadvertencia de algún parámetro, puede hacer que en el sistema caiga en condiciones de resonancia, por ejemplo, con consecuencias aun más graves que las existentes antes de corregir el problema inicial.

La distorsión armónica en los sistemas eléctricos se ha convertido en una situación frecuente en plantas industriales, oficinas con grandes cantidades de equipos electrónicos como computadoras y es aun un tema poco conocido entre los responsables de mantenimiento, proveedores de equipo y diseñadores de instalaciones.

Es indispensable que gradualmente este tipo de personas se capaciten en estos temas debido a que deben ser los primeros en identificar la posibilidad de la existencia de un problema de esta naturaleza y poder recurrir así a los medios necesarios para su corrección.

Por otra parte, se ha abierto un mercado muy interesante para las empresas dedicadas al análisis de sistemas eléctricos debido a que la solución integral de las deficiencias de calidad de potencia en una instalación requiere de un alto grado de especialización que permite que empresas con personal suficientemente capacitado puedan llevar a cabo los estudios necesarios para así poder determinar las soluciones requeridas.

Es muy importante no perder de vista que el tipo de cargas que generan armónicas, según lo que se ha estudiado en el presente trabajo, muchas veces son a la vez y de forma paradójica, muy sensibles a las mismas armónicas.

En la solución de los problemas derivados de las distorsiones armónicas no existen reglas establecidas excepto por los parámetros y recomendaciones existentes que sirven como referencia. Sin embargo, la solución que se determina en cada caso, especialmente si ésta requiere de la instalación de equipo, debe diseñarse "a la medida" de la aplicación y requerimientos particulares del caso analizado.

## **BIBLIOGRAFIA:**

Hubert, Charles I. Circuitos Eléctricos CA/CC. Ed. McGraw Hill. México 1985.

Chapman, Stephen J. Máquinas Eléctricas. Editorial McGraw Hill. México 1987.

Harmonic Considerations for Electrical Distribution Feeders, Oak Ridge National Laboratory (MARTIN MARRIETA). ORNL/Sub/81-95011/4. Marzo 1988.

IEEE Guide for Harmonic control and Reactive Compensation of Static Power Converters. IEEE Standard 519-1991. Publicación del IEEE. Estados Unidos 1991.

IEEE Green Book: IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems. IEEE Standard 142-1991. Publicación del IEEE. Estados Unidos 1992.

IEEE Emerald Book: IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Sensitive Electronic Equipment. IEEE Standard 1100-1992. Estados Unidos 1992.

Basic Measuring Instruments Course 190: End-Use Power Line Harmonics. Apuntes de curso publicados por The BMI Education Center. Estados Unidos 1993.

Basic Measuring Instruments Course 170: Power Quality for the Industry Professional. Apuntes de curso publicados por The BMI Education Center. Estados Unidos 1993.

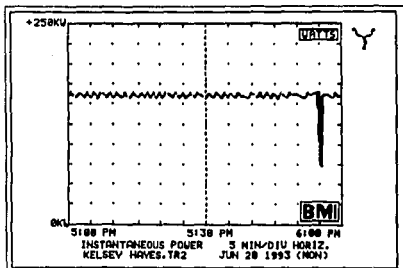
Memorias técnicas de la "National Conference on Harmonics & Power Quality". Noviembre 10 y 11 de 1994. Estados Unidos

EC&M Practical Guide to Quality Powe for Sensitive Electronic Equipment. Publicaciones EC&M - Intertec Electrical Group. Estados Unidos 1994.

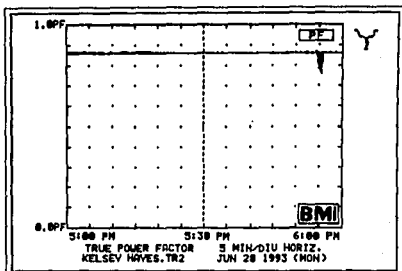
## **Apéndice 1**

### **Gráficas de Comportamiento Eléctrico en Equipos**

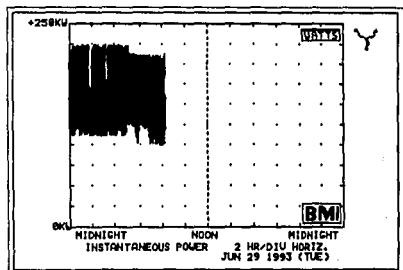
## Gráficas de demanda en los alimentadores TR-2, TR-3 y TR-4



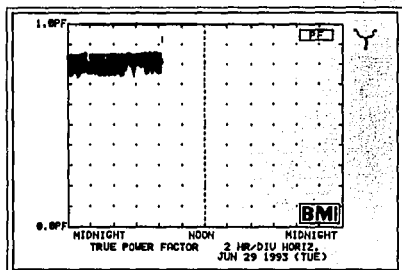
Gráfica de demanda en KW en el alimentador TR-2



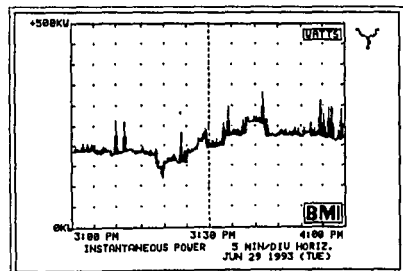
Gráfica del factor de potencia en el alimentador TR-2



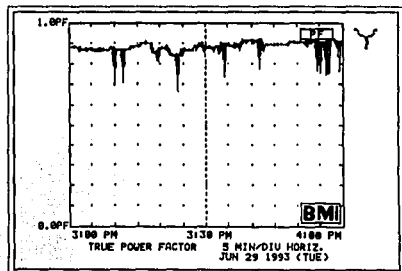
Gráfica de demanda en KW en el alimentador TR-3



Gráfica del factor de potencia en el alimentador TR-3

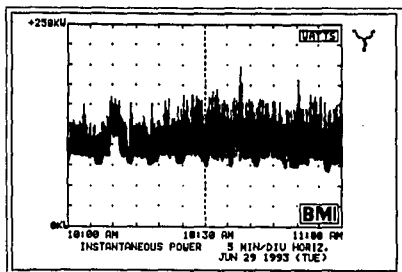


Gráfica de demanda en KW en el alimentador TR-4

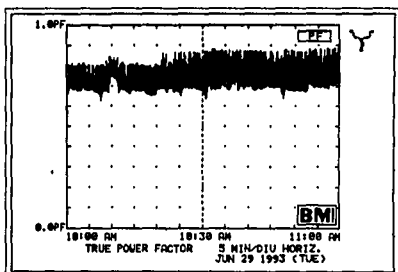


Gráfica del factor de potencia en el alimentador TR-4

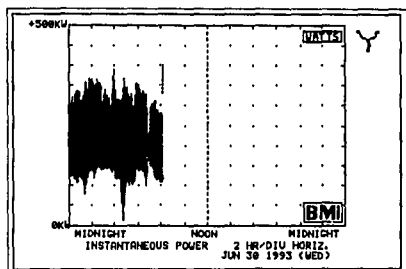
## Gráficas de demanda en los alimentadores TR-5 y TR-1



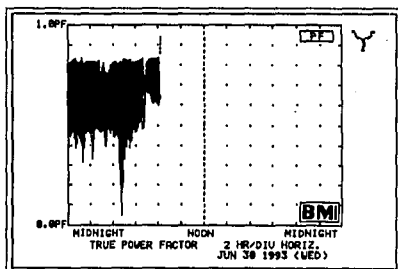
Gráfica de demanda en KW en el alimentador TR-5



Gráfica del factor de potencia en el alimentador TR-5

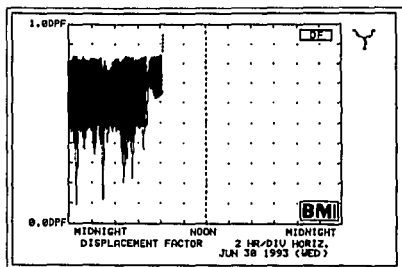


Gráfica de demanda en KW en el alimentador TR-1

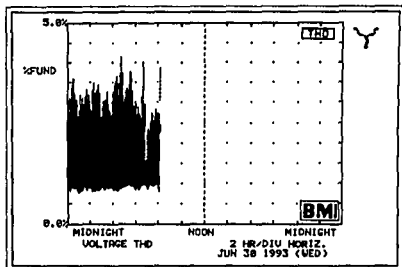


Gráfica del factor de potencia en el alimentador TR-1

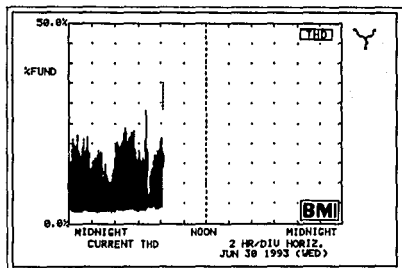
## Gráficas del comportamiento eléctrico en el Alimentador TR-1



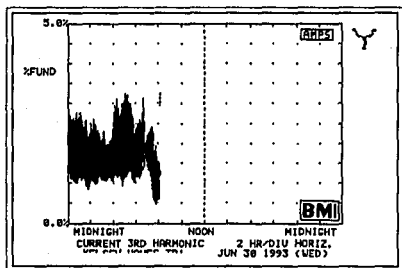
Gráfica del factor de potencia de desplazamiento en el alimentador TR-1



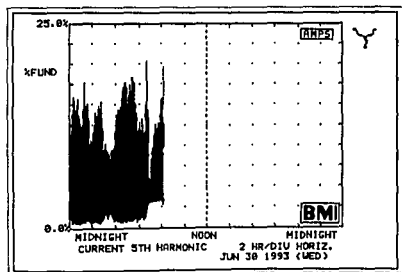
Gráfica de la distorsión armónica total en voltaje en el alimentador TR-1



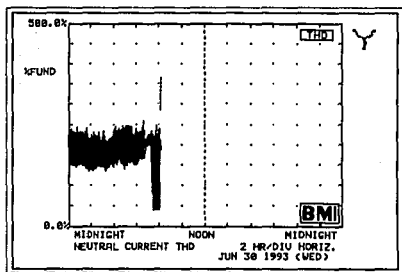
Gráfica de la distorsión armónica total en corriente en el alimentador TR-1



Gráfica de la 3er armónica en corriente presente el alimentador TR-1

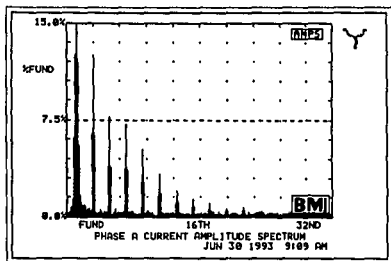


Gráfica de la 5a armónica en corriente presente el alimentador TR-1

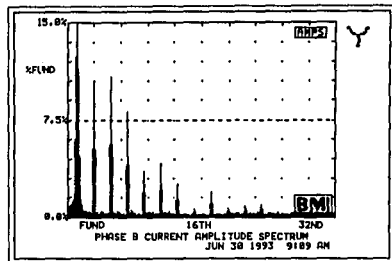


Gráfica de la distorsión armónica en corriente presente en el hilo neutro del alimentador TR-1

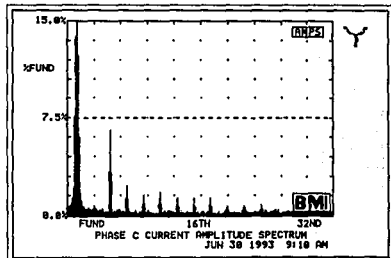
## Gráficas de espectro de corriente por cada fase en el alimentador TR-1



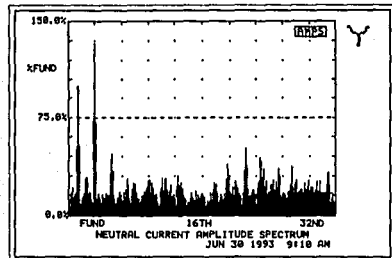
Espectro de la onda de corriente de la fase A del alimentador TR-1



Espectro de la onda de corriente de la fase B del alimentador TR-1



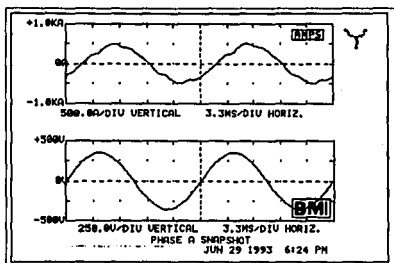
Espectro de la onda de corriente de la fase C del alimentador TR-1



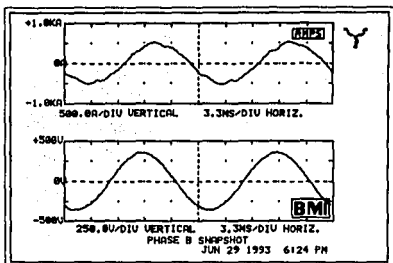
Espectro de la onda de corriente del hilo neutro del alimentador TR-1



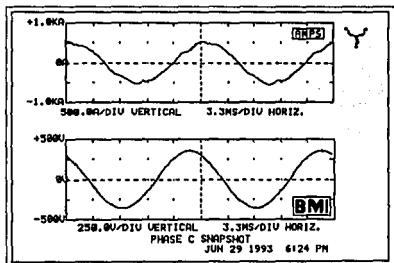
## Gráficas del comportamiento eléctrico en el Alimentador TR-1



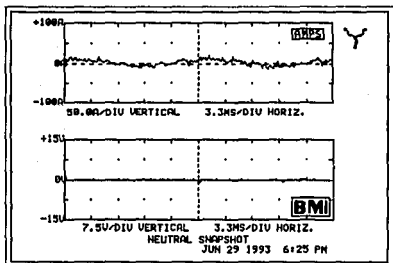
Formas de onda de corriente y de voltaje en la fase A del alimentador TR-1 cuando ocurren períodos de mínima distorsión armónica.



Formas de onda de corriente y de voltaje en la fase B del alimentador TR-1 cuando ocurren períodos de mínima distorsión armónica.

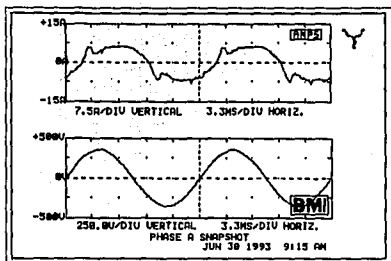


Formas de onda de corriente y de voltaje en la fase C del alimentador TR-1 cuando ocurren períodos de mínima distorsión armónica.

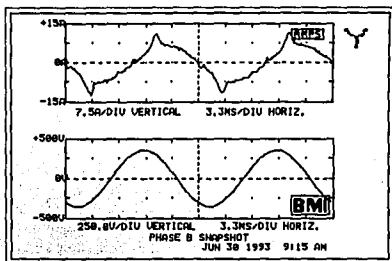


Formas de onda de corriente y de voltaje en el hilo neutro del alimentador TR-1 cuando ocurren períodos de mínima distorsión armónica.

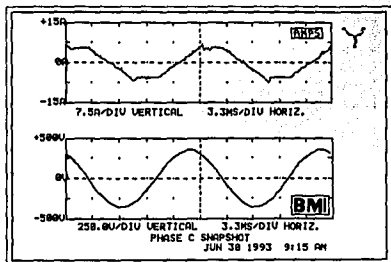
## Gráficas del comportamiento eléctrico en el Alimentador TR-1



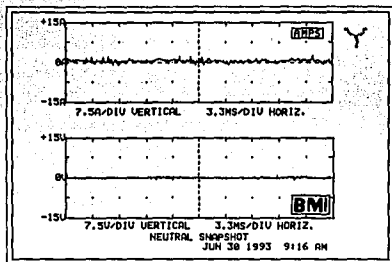
Formas de onda de corriente y de voltaje en la fase A del alimentador TR-1 durante un periodo de alta distorsión armónica.



Formas de onda de corriente y de voltaje en la fase B del alimentador TR-1 durante un periodo de alta distorsión armónica.

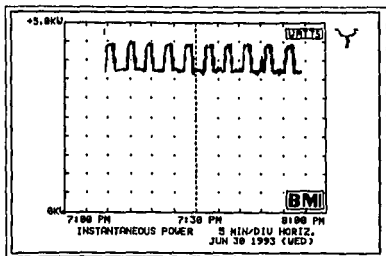


Formas de onda de corriente y de voltaje en la fase C del alimentador TR-1 durante un periodo de alta distorsión armónica.

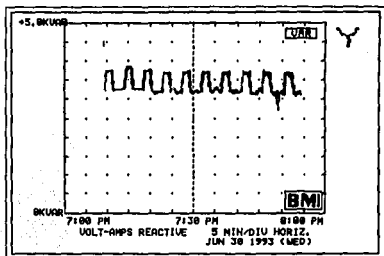


Formas de onda de corriente y de voltaje en el hilo neutro del alimentador TR-1 durante un periodo de alta distorsión armónica.

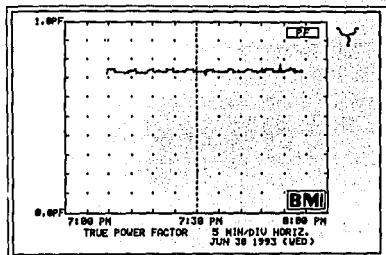
## Gráficas de comportamiento eléctrico en el equipo CMO-1



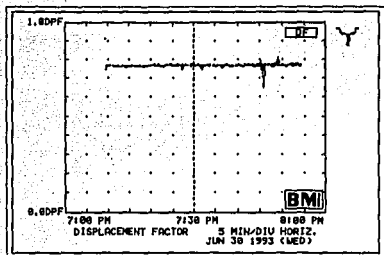
Gráfica de demanda en KW en el equipo CMO-1



Gráfica de demanda en KVAR en el equipo CMO-1

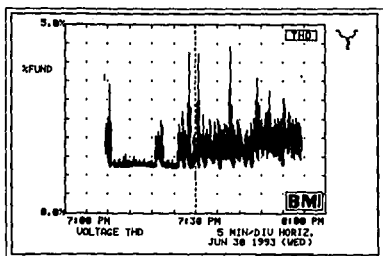


Gráfica del factor de potencia en el equipo CMO-1

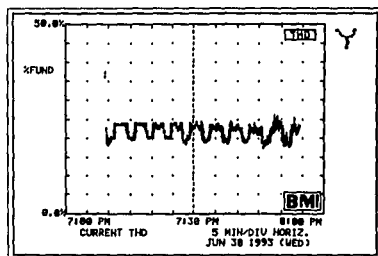


Gráfica del factor de potencia de desplazamiento en el equipo CMO-1

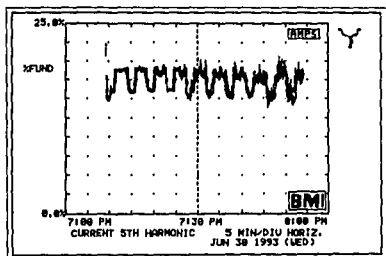
## Gráficas del comportamiento eléctrico en el equipo CMO-1



Gráfica de distorsión armónica total en voltaje en el equipo CMO-1

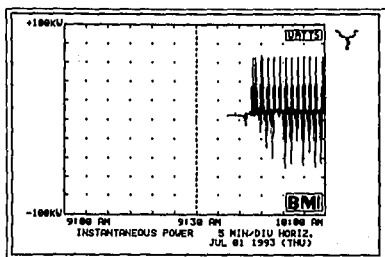


Gráfica de distorsión armónica total en corriente en el equipo CMO-1

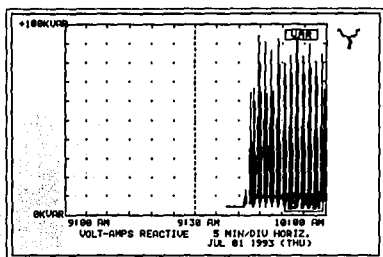


Gráfica de la 5a armónica en corriente presente en el equipo CMO-1

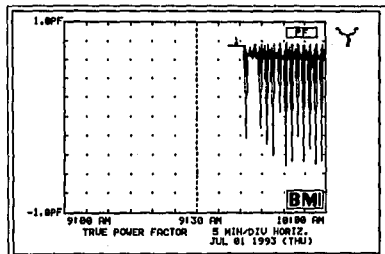
## Gráficas del comportamiento eléctrico en el equipo TMO-1



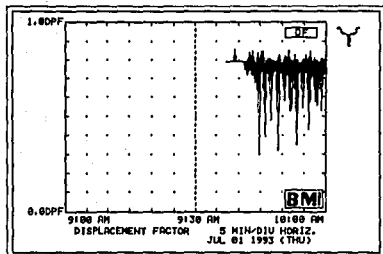
Gráfica de demanda en KW en el equipo TMO-1



Gráfica de demanda en KVAR en el equipo TMO-1



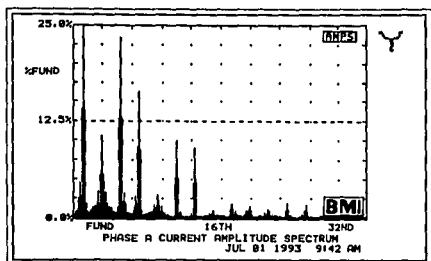
Gráfica del factor de potencia en el equipo TMO-1



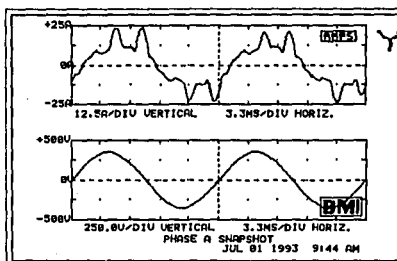
Gráfica del factor de potencia de desplazamiento en el equipo TMO-1

ESTA TESIS NO DEBE  
SMIR DE LA BIBLIOTECA

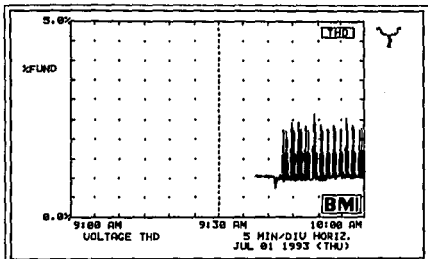
## Gráficas del comportamiento eléctrico en el equipo TMO-1



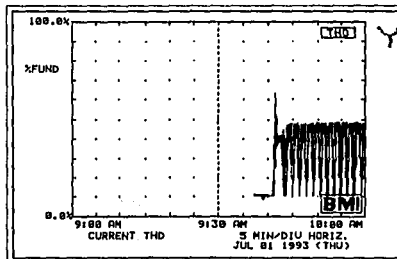
Espectro de la onda de corriente de la fase A en el equipo TMO-1. El espectro es igual para las tres fases.



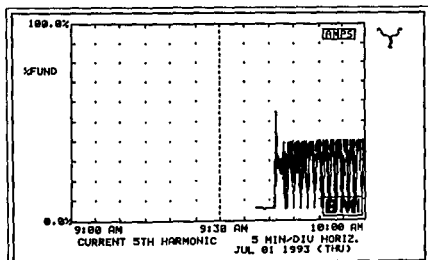
Formas de onda de corriente y de voltaje en la fase A en el equipo TMO-1. Las formas de onda de las otras dos fases son similares.



Gráfica de distorsión armónica total en voltaje en el equipo TMO-1

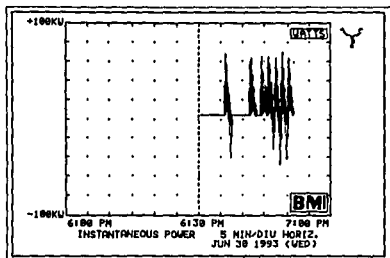


Gráfica de distorsión armónica total en corriente en el equipo TMO-1

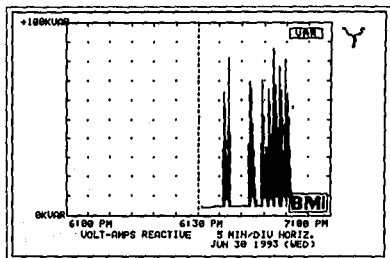


Gráfica de la 5ª armónica en corriente presente en el equipo TMO-1

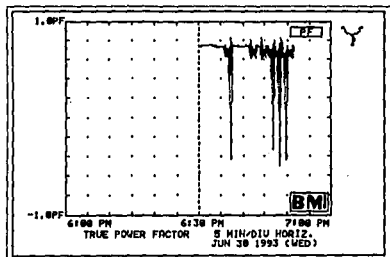
## Gráficas del comportamiento eléctrico en el equipo TMO-2



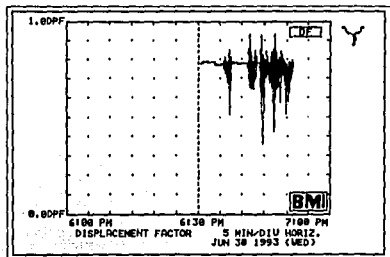
Gráfica de demanda en KW en el equipo TMO-2



Gráfica de demanda en KVAR en el equipo TMO-2

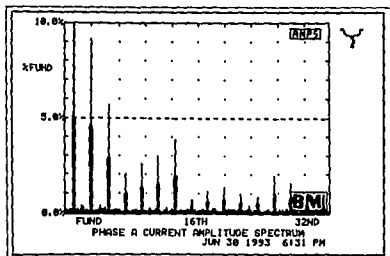


Gráfica del factor de potencia en el equipo TMO-2

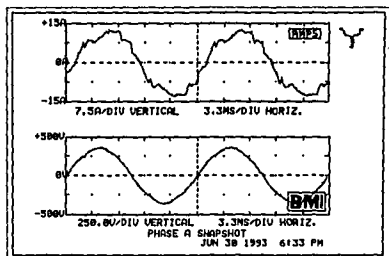


Gráfica del factor de potencia de desplazamiento en el equipo TMO-2

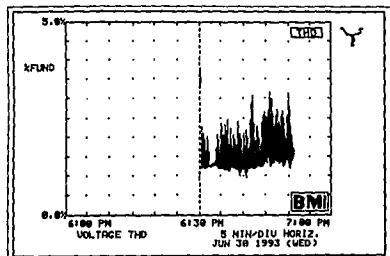
## Gráficas del comportamiento eléctrico en el equipo TMO-2



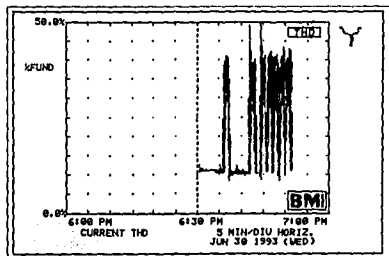
Espectro de la onda de corriente de la fase A en el equipo TMO-2. El espectro es igual para las tres fases.



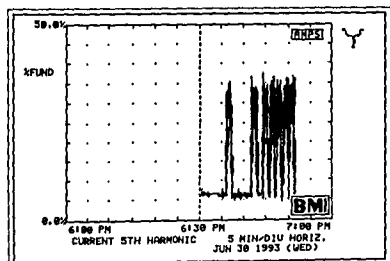
Formas de onda de corriente y de voltaje en la fase A en el equipo TMO-2. Las formas de onda de las otras dos fases son similares.



Gráfica de distorsión armónica total en voltaje en el equipo TMO-2



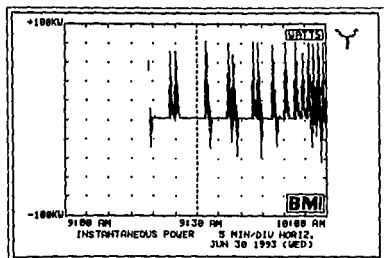
Gráfica de distorsión armónica total en corriente en el equipo TMO-2



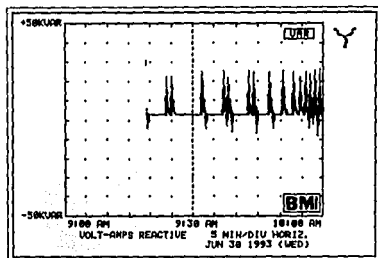
Gráfica de la 5ª armónica en corriente presente en el equipo TMO-2



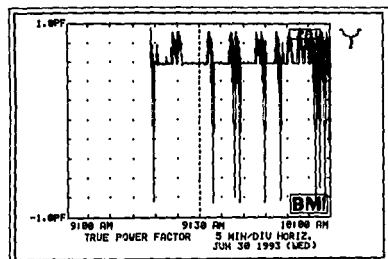
## Gráficas del comportamiento eléctrico en el equipo TMO-3



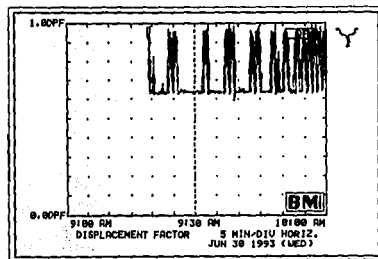
Gráfica de demanda en KW del equipo TMO-3



Gráfica de demanda en KVAR del equipo TMO-3

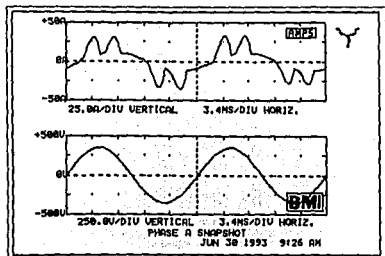


Gráfica del factor de potencia en el equipo TMO-3

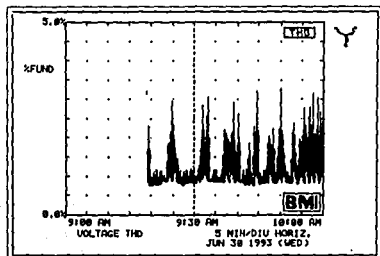


Gráfica del factor de potencia de desplazamiento en el equipo TMO-3

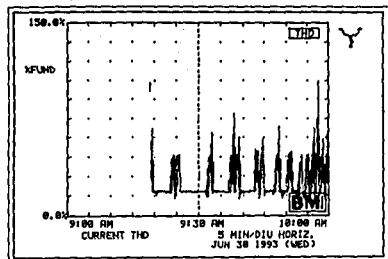
## Gráficas del comportamiento eléctrico en el equipo TMO-3



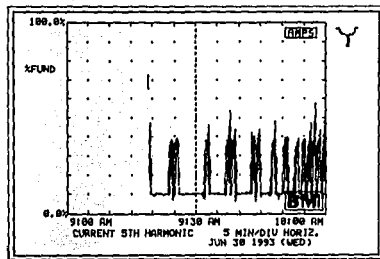
Formas de onda de corriente y voltaje en la fase A en el equipo TMO-3. Las formas de onda de las otras dos fases son similares.



Gráfica de distorsión armónica total en voltaje en el equipo TMO-3

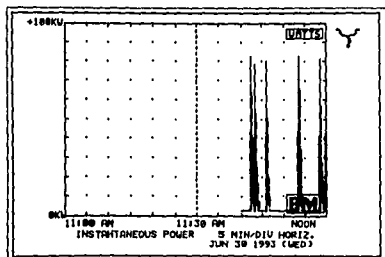


Gráfica de distorsión armónica total en corriente en el equipo TMO-3

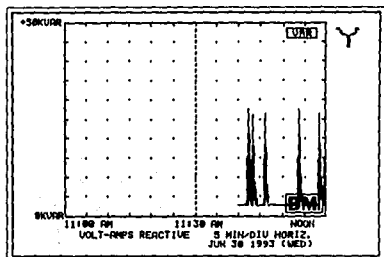


Gráfica de la 5ª armónica en corriente presente en el equipo TMO-3

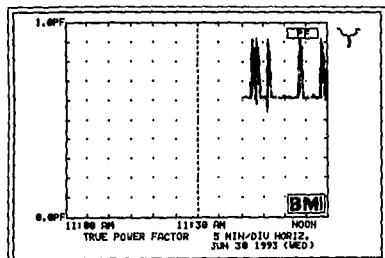
## Gráficas del comportamiento eléctrico en el equipo TMO-5



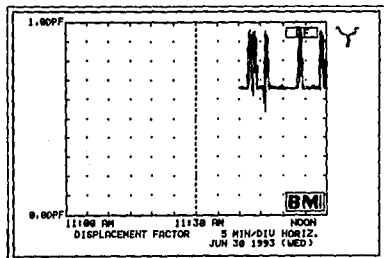
Gráfica de demanda en KW del equipo TMO-5



Gráfica de demanda en KVAR del equipo TMO-5

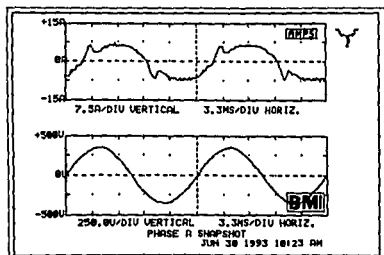


Gráfica del factor de potencia en el equipo TMO-5

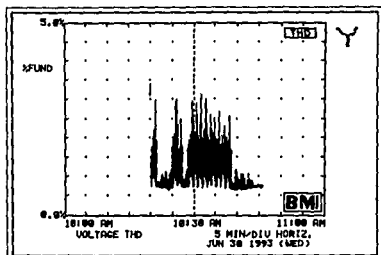


Gráfica del factor de potencia de desplazamiento en el equipo TMO-5

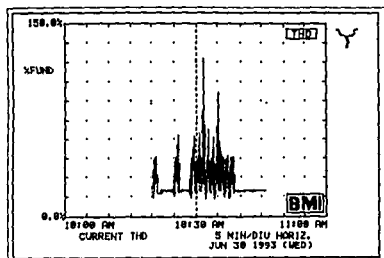
## Gráficas del comportamiento eléctrico en el equipo TMO-5



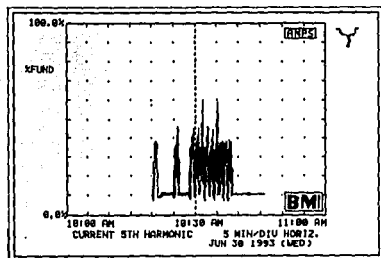
Formas de onda de corriente y voltaje en la fase A en el equipo TMO-5. Las formas de onda de las otras dos fases son similares.



Gráfica de distorsión armónica total en voltaje en el equipo TMO-5

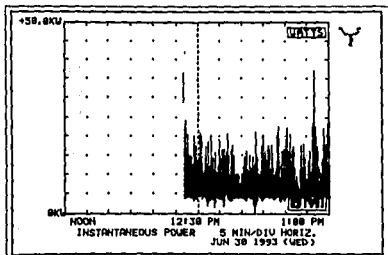


Gráfica de distorsión armónica total en corriente en el equipo TMO-5

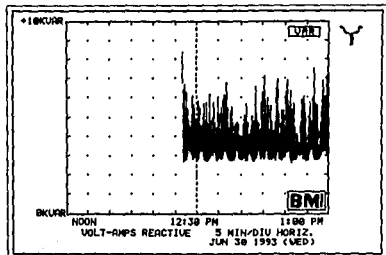


Gráfica de la 5a armónica en corriente presente en el equipo TMO-5

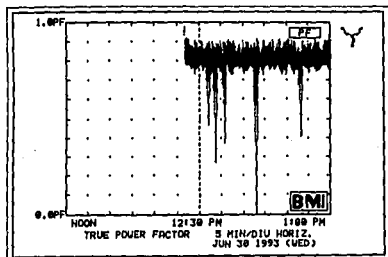
## Gráficas del comportamiento eléctrico en el equipo CMO-4



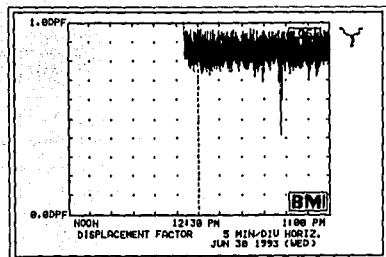
Gráfica de demanda en KW en el equipo CMO-4



Gráfica de demanda en KVAR en el equipo CMO-4

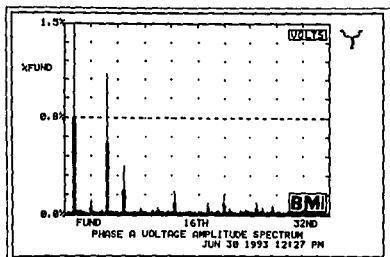


Gráfica del factor de potencia en el equipo CMO-4

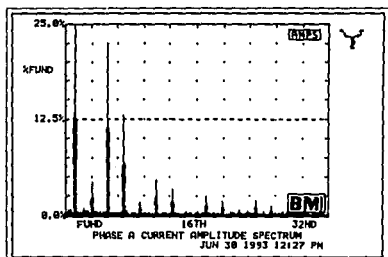


Gráfica del factor de potencia de desplazamiento en el equipo CMO-4

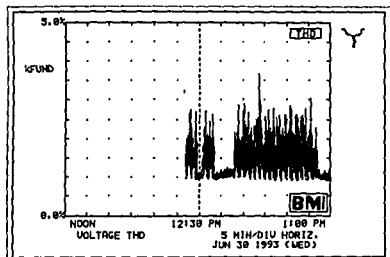
## Gráficas del comportamiento eléctrico en el equipo CMO-4



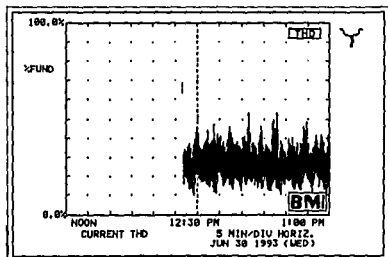
Espectro de la onda de voltaje de la fase A en el equipo CMO-4. El espectro es igual para las tres fases.



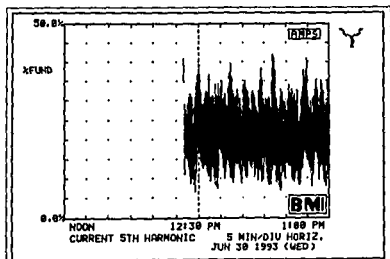
Espectro de la onda de corriente de la fase A en el equipo CMO-4. El espectro es igual para las tres fases.



Gráfica de distorsión armónica total en voltaje en el equipo CMO-4

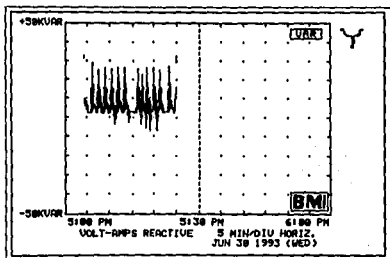


Gráfica de distorsión armónica total en corriente en el equipo CMO-4

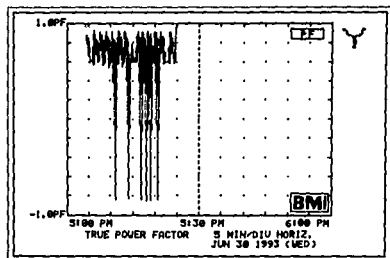


Gráfica de la 5ª armónica en corriente presente en el equipo CMO-4

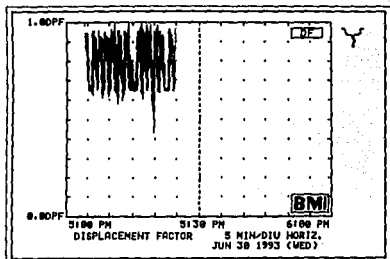
## Gráficas del comportamiento eléctrico en el equipo TMO-6



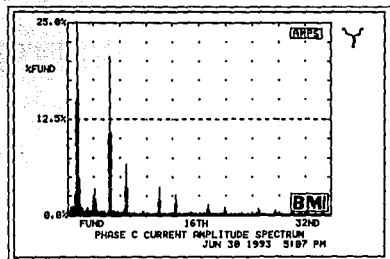
Gráfica de demanda en KVAR en el equipo TMO-6



Gráfica del factor de potencia en el equipo TMO-6

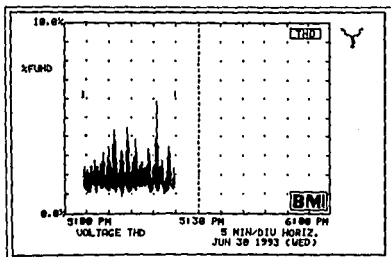


Gráfica del factor de potencia de desplazamiento en el equipo TMO-6

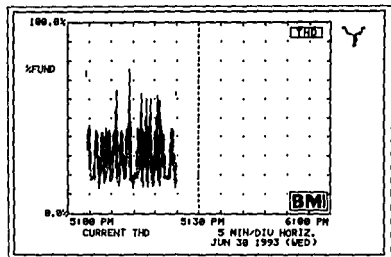


Espectro de la onda de corriente de la fase C en el equipo TMO-6. El espectro es igual para las tres fases.

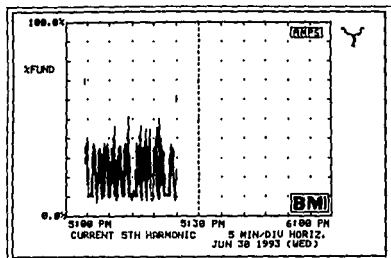
## Gráficas del comportamiento eléctrico en el equipo TMO-6



Gráfica de distorsión armónica total en voltaje en el equipo TMO-6



Gráfica de distorsión armónica total en corriente en el equipo TMO-6



Gráfica de la 5ª armónica en corriente presente en el equipo TMO-6



## **Apéndice 2**

**Norma IEEE-519-1992**

### **Tablas de límites de Distorsión Armónica**

**Límites de Distorsión en Corriente para Sistemas Generales de  
Distribución  
(120 V a 69 000 V)**

Máxima Distorsión Armónica en Corriente  
en Porcentaje de  $I_L$

Orden Armónico Individual (Armónicas Impares)

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

Las armónicas pares están limitadas al 25% de los límites para las armónicas impares superiores inmediatas.

\* La distorsión en corriente en todos los equipos generadores está limitada a estos valores sin importar la relación  $I_{sc}/I_L$  en  $I_L$ .

donde

$I_{sc}$  = Máxima corriente de corto circuito en el Punto de Acoplamiento Común (PAC)

$I_L$  = Máxima demanda de corriente debida a la carga (componente a la frecuencia fundamental) en el PAC.

DDT = Distorsión de la demanda total.

**Límites de distorsión de Voltaje**  
(para voltajes de 69 KV o inferiores en el PAC)

- Distorsión de armónicas individuales en Voltaje: **3.0%**
- Distorsión Armónica Total de voltaje: **5.0%**