

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**  
**JOSE LUIS TABOADA ROJAS**

PROMOCIÓN  
1995-I  
LIMA-PERÚ  
2003

Gracias

a Dios por mantener viva la fe y la esperanza dentro de mi corazón.

A mis padres por su apoyo siempre incondicional,

por saber transmitirme

los valores más simples e importantes en la vida

**ANÁLISIS DE ARMÓNICOS EN EL DOMINIO DE LA  
FRECUENCIA**

## SUMARIO

El presente trabajo busca recoger información publicada en diferentes medios: Papers, Internet, etc. por especialistas relacionados con el tema de Análisis de Armónicos en el Dominio de la Frecuencia, con la finalidad de presentarla de una manera ordenada y sistematizada, permitiendo comprender mejor estos conceptos.

Para llegar a este objetivo plantearemos la metodología empleada para este tipo de análisis. Entonces tendremos que revisar los modelos asumidos para simular el comportamiento de los elementos eléctricos y se propondrá métodos de trabajo alternativos, dependiendo de las características propias del circuito que vayamos a analizar.

Finalmente para poder comprender mejor estos procedimientos revisaremos la solución planteada y los resultados obtenidos en circuitos de simulación tipo. Descubriremos entonces que este tipo de análisis es muy sensible al tipo de modelamiento que se adopte para resolver el problema.

## INDICE

|   |           |
|---|-----------|
| <b>PROLOGO</b>  | <b>8</b>  |
| <b>CAPITULO I</b>                                       |           |
| <b>MODELAMIENTO DE LA RED</b>                           | <b>10</b> |
| 1.1 Modelamiento de los componentes de la red eléctrica | 10        |
| 1.1.1 Modelamiento de carga                             | 10        |
| 1.1.2 Modelamiento de líneas y cables                   | 15        |
| 1.1.3 Modelo de Transformadores                         | 15        |
| 1.1.4 Modelo de Motor de inducción                      | 16        |
| 1.1.5 Modelo equivalente de una red externa.            | 17        |
| 1.2 Modelamiento de la red                              | 18        |
| 1.2.1 Modelos de una fase                               | 18        |
| 1.2.2 Modelos multifásicos                              | 20        |
| 1.2.3 Modelos generalizados                             | 22        |
| <b>CAPITULO II</b>                                      |           |
| <b>TECNICA DE ANALISIS DE ARMONICOS</b>                 | <b>27</b> |
| 2.1 Frecuencia Scan o exploración de Frecuencia         | 27        |
| 2.1.1 Inyección de Corriente                            | 28        |
| 2.1.2 Función de transferencia de voltaje               | 29        |
| 2.2 Penetración armónica o fuente de corriente          | 31        |

|   |   |           |
|---|---|-----------|
| 2.3   | Flujo de Potencia armónica o método Iterativo | 39        |
| 2.3.1   | 1era Variación                                | 39        |
| 2.3.2   | 2da Variación                                 | 40        |
| <b>CAPITULO III</b>                                 |   |           |
| <b>CASOS ANALIZADOS</b>                             |   | <b>42</b> |
| 3.1   | Sistema A: Estudio de un sistema Equilibrado  | 42        |
| 3.1.1   | Consideraciones de modelado                   | 43        |
| 3.1.2   | Estudio de Exploración de Frecuencia          | 44        |
| 3.1.3   | Estudio de Flujo de potencia armónica.        | 46        |
| 3.2   | Sistema B: Estudio de un sistema Equilibrado  | 48        |
| 3.2.1   | Consideraciones de modelado                   | 49        |
| 3.2.2   | Estudio de Exploración de Frecuencia          | 50        |
| 3.2.3   | Estudio de Flujo de potencia armónica.        | 51        |
| 3.3   | Sistema C: Sistema de Distribución            | 54        |
| 3.3.1   | Consideraciones de modelado                   | 55        |
| 3.3.2   | Discusión de resultados                       | 56        |
| <b>CONCLUSIONES</b>                                 |   | <b>62</b> |
| <b>ANEXO A</b>                                      |   |           |
| <b>DETALLES DEL SISTEMA “A”</b>                     |   |           |
| <b>MODIFICACION DEL MODELO IEEE-14 – BUS SYSTEM</b> |   | <b>66</b> |
| <b>ANEXO B</b>                                      |   |           |
| <b>DETALLES DEL SISTEMA “B”</b>                     |   |           |
| <b>MODIFICACION DEL MODELO IEEE-13 –</b>            |   |           |
| <b>BUS DISTRIBUTION SYSTEM</b>                      |   | <b>70</b> |

**ANEXO C****DETALLES DEL SISTEMA “C”****SISTEMA DE DISTRIBUCION TIPICO EN 11 KV 73****ANEXO D****COMENTARIOS DE LA NORMA IEEE-519 75****BIBLIOGRAFIA 97**

## **PROLOGO**

El objetivo del presente trabajo es revisar los conceptos fundamentales en el análisis de armónicos en el dominio de la frecuencia.

Los alcances del presente trabajo son presentar una síntesis acerca del modelamiento de la red eléctrica en el dominio de la frecuencia y el desarrollo de los métodos más utilizados en el análisis de armónicos en el dominio de la frecuencia.

El estudio de las variables eléctricas en un sistema de potencia está generalmente referido a sistemas que operan a condiciones de régimen permanente, es decir a una sola frecuencia llamada fundamental y condiciones equilibradas de generación y de toma de cargas. Pero cuando las armónicas están presentes en un sistema, es necesario replantear las definiciones de las variables eléctricas para poder estudiar estos sistemas en condiciones periódicas no sinusoidales.

Los armónicos son los subproductos de la electrónica moderna. Se manifiestan especialmente donde hay un gran número de ordenadores personales, motores de velocidad regulable y otros equipos que absorben corriente en forma de impulsos cortos.

Planteada esta necesidad de estudiar el efecto de los armónicos, es necesario simplificar el estudio, para lo cual tendremos que asumir un

modelo de red adecuado para el caso específico y también es necesario emplear técnicas de análisis para armónicos.

En el capítulo 1 veremos los aspectos más significativos en lo que se refiere al Modelamiento de la Red, se analizarán los casos: de modelamiento por fase, casos polifásicos y modelos generalizados.

Luego en el capítulo 2 se discutirán las técnicas más conocidas para análisis de armónicos en el dominio de la frecuencia. Estas son frecuencia scan, penetración armónica, y flujo de potencia armónica.

Se presentará la aplicación de los métodos descritos a través del análisis de los resultados de dos estudios: un sistema equilibrado y un sistema desequilibrado. En los cuales podremos ver cual es el modelado de red y cual sistema de exploración de frecuencia es más conveniente. Esto lo trataremos en el capítulo 3.

Finalmente aportaremos algunas consideraciones a tomar en cuenta en el análisis y estudio de armónicos en sistemas de potencia particulares a manera de conclusión.

## **CAPITULO I**

### **MODELAMIENTO DE LA RED**

Un aspecto muy importante en el análisis de armónicos es determinar el modelo de red más conveniente, que está basada en la teoría de red multipuesto, el cual es presentado de una manera adecuada por Mark Halpin y Paulo Ribeiro ver referencia [1]. Previo a esto será adecuado mostrar el estudio de cada componente del cual estará compuesto esta red, Para esto nos basaremos en las propuestas de Paulo Ribeiro en “Distribution System and other Elements Modeling”, ver referencia [8].

#### **1.1 Modelamiento de Componentes de la red eléctrica**

Previo al desarrollo de los modelos de red es necesario primero estudiar los modelos de cada componente significativo de la red en forma individual.

En esta oportunidad se ofrecen los modelos planteados para un sistema de distribución por su simplificación en el análisis de los mismos.

##### **1.1.1. Modelamiento de cargas :**

Establecer el modelo de carga adecuado es un factor muy importante en las características de la red frente a los armónicos, pues son el elemento fundamental de componente de amortiguamiento como en las condiciones de resonancia.

En general una carga se puede expresar por su equivalente en P (potencia activa) y Q (potencia reactiva), con los cuales se puede calcular su impedancia a frecuencia fundamental.

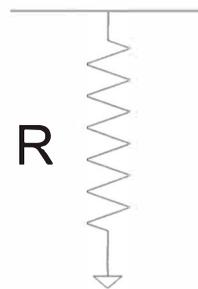
Para establecer su verdadero valor a frecuencia armónica es necesario información adicional.

De acuerdo a la necesidad del caso que analicemos tomaremos alguno de los modelos que se proponen.

### **Modelo “A”:**

- Este modelo será aplicable cuando la potencia reactiva estimada sea despreciable.
- El equivalente de R será:

$$R = \frac{V^2}{P}$$



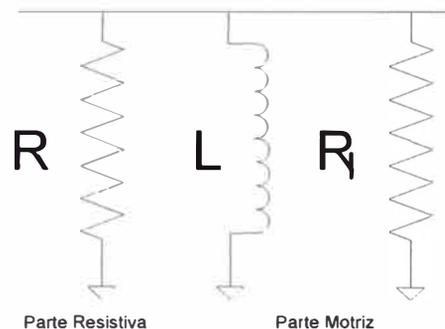
**Figura 1: Modelo con Q despreciable**

Donde:

$V$  : Tensión nominal a frecuencia nominal.

$P$  : Potencia activa.

- Se emplea para representar motores pequeños para uso doméstico y comercio menor.

**Modelo "B":****Figura 2 : Modelo de carga motriz**

- Este modelo será estimado con una inductancia en paralelo y una resistencia adicional que representa el amortiguamiento del motor .
- Los valores de R y L (inductancia equivalente en secuencia negativa) dependerá de una serie de factores que representan las condiciones de operación en un tiempo determinado.
- Las ecuaciones que describen este modelo son:

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

$$L = \frac{V^2}{1.2 (k + k_E) k_1 P \omega}$$

Donde:

$P$  : Demanda total en MW.

$k$  : Fracción del número de motores disponible del total de MW.

$k_E$  : Parte de la carga controlada electrónicamente del total de MW

$k_1$  : Factor de severidad de la condición de arranque.

$\omega$  : Frecuencia angular

1.2 :Factor que considera la potencia instalada.

- Para “k”,  $K_E$  y  $K_1$  se tendrá los siguientes valores  
 $K = 0.8$ , para cargas industriales y  $K = 0.15$ , para cargas comerciales y domésticas.  
 $K_1$  entre 4 y 7 y  $K_E$  entre 0.1 y 0.4
- La resistencia adicional  $R_f$  que representa el amortiguamiento del motor será:

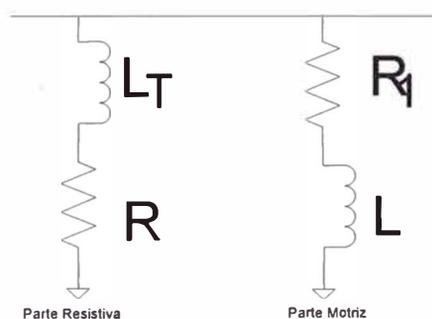
$$R_f = \frac{X_L}{k_2}$$

Donde:

$K_2$  : *Fracción de la inductancia de secuencia negativa (a rotor bloqueado). Se asume un valor de 0,2*

- Este modelo se emplea cuando se tiene conectados en una barra varios motores de inducción.

### Modelo “C”:



**Figura 3 : Modelo de motor con nivel de tensión intermedio**

- Este modelo implica para la parte motriz una resistencia en serie con una inductancia y para la parte resistiva se considera una inductancia en serie  $L_T$ , que se usa para representar la reactancia de dispersión equivalente de los transformadores conectados en la barra de menor nivel de tensión.
- Se emplea cuando un motor grande o un grupo de motores se conectan directamente a niveles de tensión intermedio, lo cual se da en el caso de fuentes industriales.
- Las ecuaciones que describen este sistema son:

$$R_1 = \frac{\omega L}{k_3} \qquad \omega L_T = 0.1 R$$

Donde:

R y L se calculan de acuerdo al modelo B

$\omega$  : frecuencia fundamental en radianes

$k_3$  : Q efectivo del circuito del motor

### Modelo "D"

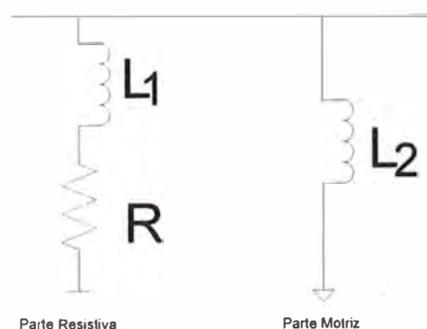


Figura 4 : Modelo experimental empírico

- Este modelo está compuesto por una inductancia en serie con una resistencia y que se conecta con otra inductancia en paralelo. Es un modelo experimental y empírico.
- Las ecuaciones que describen este modelo son:

$$R = \frac{V^2}{P} \qquad L_1 = \frac{0.073 R}{\omega}$$

$$L_2 = \frac{R \omega}{[6.7 \operatorname{Tg}\phi - 0.74]} \qquad \operatorname{Tg}\phi = \frac{Q}{P}$$

### 1.1.2. Modelamiento de Líneas y Cables:

En distribución se puede emplear las siguientes formulaciones:

$$R_{LINEAS} = R_B (0.187 + 0.532 h^{1/2})$$

$$R_{CABLES} = R_B \left( 1 + \frac{0.646 h^2}{192 + 0.518 h^2} \right)$$

Donde  $R_B$  resistencia del conductor de acuerdo a tabla.

### 1.1.3. Modelo de Transformadores:

La representación completa de un transformador incluyendo capacitancias, no es muy práctica ni se justifica para frecuencias armónicas menores a los 15 KHz., que es nuestro caso. Por lo tanto la impedancia de los transformadores, bajo ésta consideración, es proporcional a la reactancia de dispersión y varía en forma lineal con la frecuencia. El modelo más representativo es:

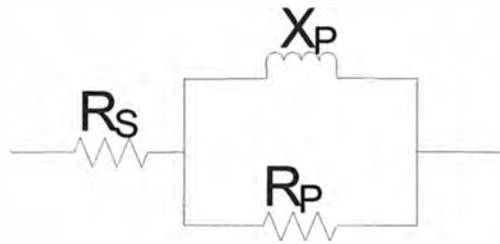


Figura 5 : Modelo de un Transformador

Donde:

$$R_S = R_T, \quad X_P = h X_T, \quad R_P = 80 X_T, \quad X_P = \omega L_P$$

$R_P + j X_P$  : reactancia de dispersión

$Z_T = R_P + j X_T$  : impedancia de cortocircuito a frecuencia fundamental.

La formulación final será:

$$R_{(\omega)} = R_S + \frac{h^2 X_T^2 R_P}{R_P^2 + h^2 X_T^2} = R_S + \frac{R_P [\omega L_P]^2}{R_P^2 + [\omega L_P]^2}$$

$$X_{(\omega)} = \frac{h X_T R_P^2}{R_P^2 + h^2 X_T^2} = \frac{[\omega L_P]^2 R_P^2}{R_P^2 + [\omega L_P]^2}$$

#### 1.1.4. Modelo de un motor de Inducción:

La representación para estudios armónicos es la siguiente:

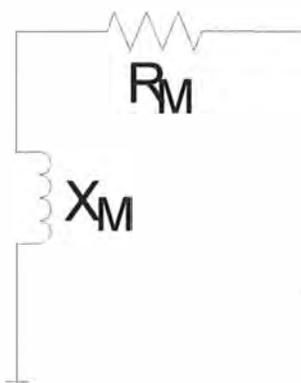


Figura 6 : Modelo de motor de inducción

Donde:

$R_M$  = Resistencia de amortiguamiento.

$X_M$  = Reactancia del motor a rotor bloqueado.

Donde:

$$X_m = \frac{V^2}{k_1 S_m} \quad v : \text{Tensión de Línea del motor}$$

$$S_m : \text{Potencia aparente del motor.}$$

$$K_1 = \frac{I_{ARRANQUE}}{I_{NOMINAL}}$$

$$R_m = \frac{X_m}{kq} \quad Kq : \text{Factor de calidad.}$$

$$Z_{m(\omega)} = R_m + j h X_m$$

### 1.1.5. Modelo equivalente de una red externa:

Un sistema externo es una red compuesta por unidades que son externas al sistema de estudio (generadores, sistemas de transmisión, etc.) generalmente se localiza aguas arriba del punto de suministro. Se representará por un circuito equivalente que considera la variación de la impedancia equivalente en el punto de conexión con la frecuencia.

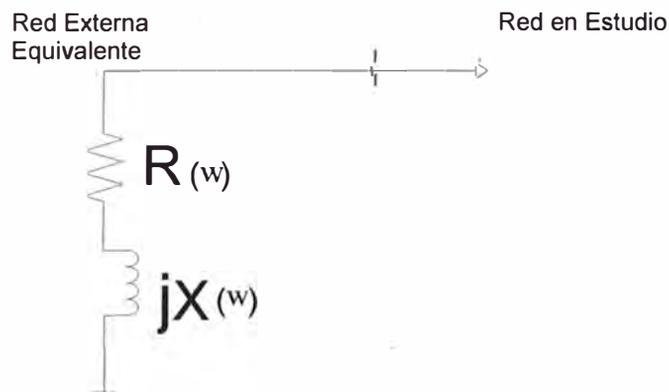


Figura 7 : Modelo equivalente de red externa

Donde:

$$R_{(\omega)} = R_{CC} \sqrt{h} = R_{CC} \sqrt{\frac{\omega}{\omega_0}} \quad \omega = 2\pi f$$

$$X_{(\omega)} = X_{CC} h = X_{CC} \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right) \quad m = \left[ \frac{X_{CC}}{R_{CC}} \right]^{-1}$$

$$Z_{(\omega)} = X_{CC} \left[ m \sqrt{\frac{\omega}{\omega_0}} + j \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right) \right] = \frac{V^2}{S_{CC} \sqrt{m^2 + 1}} \left[ m \sqrt{\frac{\omega}{\omega_0}} + j \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right) \right]$$

$V_m$  : Tensión nominal de línea (kV)

$S_{CC}$  : Potencia de cortocircuito de la barra (MVA)

$M$  : Relación X/R en frecuencia fundamental.

Es decir la impedancia de cortocircuito en el punto de suministro del sistema en estudio representa la impedancia equivalente aguas arriba a frecuencia fundamental.

En este modelo no se considera las tensiones armónicas en el punto de suministro originadas en la red externa, ya que asume que la red externa no suministra armónicas apreciables.

## 1.2 Modelamiento de Red:

### 1.2.1. Modelos de una fase:

Este tipo de modelo será utilizado en los casos básicos de simulación. Es decir para estudiar la contribución de armónicos de elementos

específicos a un sistema de potencia, siempre que el estudio pueda admitir una simplificación monofásica equivalente.

En general cuando existan excitaciones armónicas equilibradas ya sean monofásicas o trifásicas, será posible emplear un modelo de estudio de una fase en secuencia positiva. Recurriendo a la representación en componentes simétricas.

Para el caso de sistemas desequilibrados la técnica es crear tres subsistemas equilibrados: secuencia positiva, secuencia negativa y secuencia cero y conectarlos de acuerdo a la naturaleza de su desequilibrio.

La desventaja principal es que para severas condiciones de desequilibrio esta técnica puede introducir más problemas que los que pretende resolver, ya que el flujo de corriente en una secuencia originará tensiones en las otras secuencias, es decir la representación de los circuitos en las distintas secuencias se encuentran mutuamente acoplados.

La representación típica de un sistema de este tipo será la siguiente:



**Figura 8 : Modelo de una fase**

Las tensiones de excitación serán  $V_1$  y  $V_2$  y las corrientes producidas son  $I_1$  y  $I_2$ .

Aplicando las reglas del análisis nodal tendremos la siguiente representación matricial:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (1.2.1.1)$$

$$\tilde{I} = [Y] \tilde{V}$$

$$\tilde{I}(h) = [Y(h)] \tilde{V}(h) \quad (1.2.1.2)$$

Donde los términos de la forma  $y_{ij}$  representan los componentes de la matriz de admitancia del sistema que se construye de acuerdo a las dos siguientes reglas básicas:

$$\begin{array}{l} 1era \quad : \quad y_{i,j} = - \sum (\text{sumatoria de todas las admitancias conectadas entre los nodos } i \text{ y } j) \\ 2da \quad : \quad y_{i,i} = \sum (\text{sumatoria de todas las admitancias conectadas al nodo } i) \end{array} \quad (1.2.1.3)$$

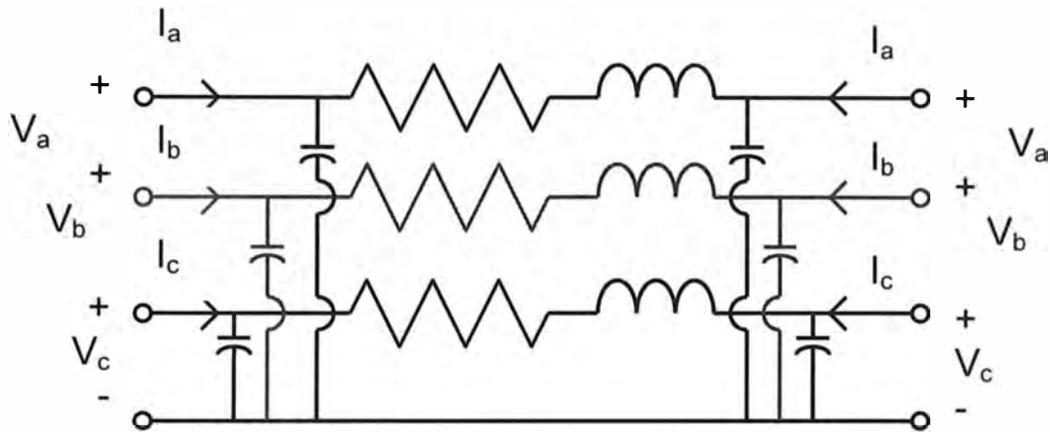
La ecuación (1.2.1.2) describe la estrecha relación de esta formulación con respecto a la frecuencia.

### 1.2.2. Modelos Multifásicos:

Se emplearán para sistemas con un número arbitrario de fases y para la mayoría de redes desequilibradas.

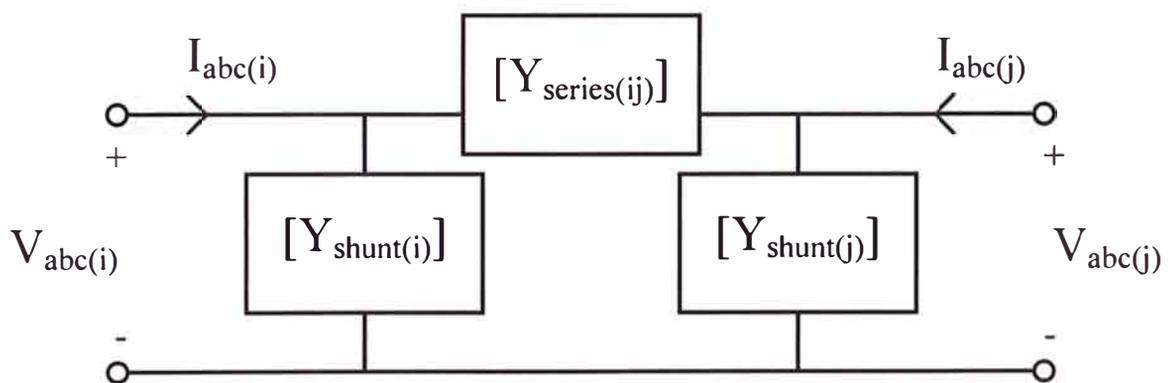
Este tipo de análisis permite mantener la identidad de las fases de los componentes del sistema, pues es posible establecer diversas configuraciones de la red y se puede incluir componentes polifásicos como transformadores y/o líneas de transmisión.

La representación para un sistema de este tipo será:



**Figura 9 : Modelo Multifásico**

Con una red de este tipo se aplicará las mismas reglas 1 y 2, para la construcción de la matriz de admitancia. Esto puede hacerse engorroso por lo que será conveniente hacer una simplificación de la siguiente manera:



**Figura 10 : Modelo simplificado multifásico**

Las admitancias  $Y_{shunt}$  y  $Y_{series}$  se forman respetando las reglas generales para  $y_{ii}$  and  $y_{ij}$

$$Y_{bus^i, bus^j} = -\sum(\text{suma de matrices de admitancia entre los nodos "i" y "j"})$$

$$Y_{bus^i, bus^i} = \sum(\text{suma de matrices de admitancia conectada en nodo "i"})$$

(Estas matrices de admitancia serán del orden 3x3 para este caso)

Para este método de multifase las reglas 1 y 2 deben ser consideradas para aplicar a las matrices de admitancia de 3x3. El subíndice i y j deberán ser extendidos para representar: i+0, i+1, i+2 y j+0, j+1, j+2, respectivamente.

### 1.2.3. Modelos Generalizados:

Es la generalización del caso polifásico y al igual que este servirá para representar un número arbitrario de fases y servirá para representar más exactamente cualquier tipo de red.

Además se está considerado el acoplamiento mutuo que era un problema y los otros casos de asimetría en la red producto de las características mismas y de sus condiciones de operación.

A partir de la representación arbitraria de la figura siguiente:



Figura 11 : Red de N Puertos

Es posible incluir la dependencia entre ciertas fuentes de suministro a través de la dependencia proyectada por la relación de admitancia.

La ecuación matricial de impedancias que describe la red general es:

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ \dots \\ V_i \\ V_j \\ \dots \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{11} & & z_{1i} & z_{1j} & & z_{1N} \\ & & & & & \\ z_{i1} & & z_{ii} & z_{ij} & & z_{iN} \\ z_{j1} & & z_{ji} & z_{jj} & & z_{jN} \\ & & & & & \\ z_{N1} & & z_{Ni} & z_{Nj} & & z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \dots \\ I_i \\ I_j \\ \dots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (1.2.3.1)$$

La siguiente formulación describe la dependencia con respecto a la frecuencia

$$\tilde{V}(h) = [Y(h)]^{-1} \tilde{I}(h) = [Z(h)] \tilde{I}(h) \quad (1.2.3.2)$$

Del mismo modo que se formuló la relación con respecto a las impedancias ahora lo haremos con respecto a las admitancias del sistema:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ \dots \\ I_i \\ I_j \\ \dots \\ I_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{1i} & y_{1j} & y_{1N} \\ y_{i1} & y_{ii} & y_{ij} & y_{iN} \\ y_{j1} & y_{ji} & y_{jj} & y_{jN} \\ y_{N1} & y_{Ni} & y_{Nj} & y_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ \dots \\ V_i \\ V_j \\ \dots \\ V_N \end{bmatrix} \quad (1.2.3.3)$$

Toda entrada en esta ecuación matricial de vectores puede expresarse de la siguiente manera:

$$\tilde{I}(h) = [Y(h)]\tilde{V}(h) \quad (1.2.3.4)$$

Donde  $h$  es usado para denotar la frecuencia armónica (sea esta en SS, Rad./s o pu). Es entonces una formulación dependiente de la frecuencia.

Asimismo se puede deducir una relación para las impedancias complejas, (basadas en una frecuencia conocida) desde la definición de los parámetros de admitancia como se muestra:

$$\bar{Y}_{ij} = \left. \frac{\bar{I}_i}{\bar{V}_j} \right|_{\bar{I}_{k=0}, k=1..N, k \neq i} \quad (1.2.3.5)$$

Para los casos donde un punto de referencia de voltaje de nodo común pueda ser establecido, como en el caso de la figura 11, se puede lograr una simplificación ventajosa sobre la ecuación (1.2.3.5). Y las reglas 1 y 2

(ecuación 1.2.1.3) pueden emplearse para definir cualquier admitancia compleja  $Y_{ij}$  en la ecuación (1.2.3.3).

Estos procedimientos reconocidos forman la estructura principal en la formulación de la mayoría de algoritmos de matriz de admitancia porque pueden ser aplicados directamente a un sistema completo. No requiriéndose la formación de los modelos de admitancia a nivel de componente.

El procedimiento basado en las reglas 1 y 2 es apropiado, como ya se mencionó, cuando el punto de referencia de voltaje de nodo común está presente. Esto será verdadero para sistemas radiales o equilibrados.

Sistemas no radiales no equilibrados deberán incorporar técnicas de modelamiento de matriz de admitancias más generalizadas que son motivo de otros estudios y análisis.

En algunas configuraciones de matrices será necesario representar conectividad en la red, lo que se logrará a través de una matriz de incidencia  $[Q]$ . Para lograr esta aproximación se emplea el triple producto de matriz descrito en la ecuación (1.2.3.6). Donde la matriz de admitancia primitiva ( $[Y_{prim}]$ ) es la matriz que consiste en los modelos de matriz a nivel de componente obtenidos de acuerdo a la ecuación (1.2.3.5) o a las reglas 1 y 2 de simplificación.

$$[\bar{Y}_{sys}] = [Q][\bar{Y}_{prim}][Q]^T \quad (1.2.3.6)$$

Si la aproximación en (1.2.3.5) es empleada, la  $[Y_{prim}]$  consistirá en bloques de  $6 \times 6$  estipulando que dos o más componentes no están mutuamente acoplados. Por lo tanto la matriz  $[Q]$  deberá ser corregida en conformidad.

## **CAPITULO II**

### **TECNICA DE ANALISIS DE ARMONICOS**

En el presente capítulo presentaremos los modelos más usados para analizar armónicos, desde el modelo de exploración de frecuencia, el cual nos da una primera información de la naturaleza de armónicos presente hasta el modelo iterativo de flujo armónico, el cual se presta para análisis más generalizados con un grado de complejidad elevado. Estos procedimientos han sido tratados por Mark Halpin y Paulo Ribeiro, ver referencia [1] y también en otros documentos que recopilan estos conceptos como el editado por la IEEE “Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks. Part II: Sample Systems and Examples”, ver referencia [3].

#### **2.1 Frecuencia “Scan” o de Exploración de Frecuencia:**

Los análisis de exploración de frecuencia se utilizan para representar la respuesta de un sistema de entrega de energía en términos de la frecuencia.

Es muy útil porque ofrece una indicación rápida de los problemas potenciales de los armónicos.

Consiste básicamente en la variación sistemática de algún valor inicial  $f_0$  a algún valor final  $f_f$ . El análisis es conducido a través de soluciones repetidas de la formulación planteada en (1.2.3.3) con la matriz de

admitancia formada para cada frecuencia de estudio. La estrecha relación de dependencia de la frecuencia se pudo apreciar en la formulación (1.2.3.4)

En esta técnica destacan claramente dos tipos:

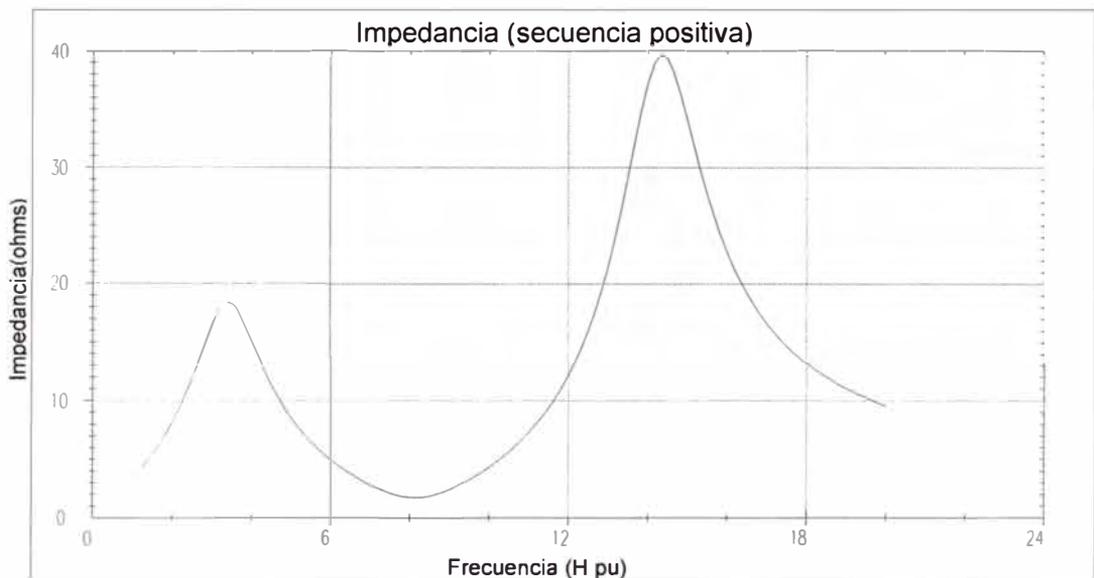
### **2.1.1 Inyección de Corriente:**

Que como su nombre lo indica está basado en una inyección de corriente única dentro del modelo  $Y_{bus}$  del sistema de entrega de energía lo cual vendrá seguido por una solución de la ecuación (1.2.3.3). Asumiendo que esta inyección de corriente ocurre en el nodo "i" entonces puede ser resuelto para determinar la tensión en cada nodo del sistema.

Ahora si la inyección de corriente va acompañada de su componente de fase (como se hace en el estudio de circuitos eléctricos convencionales) de la forma  $1\angle 0^\circ$  (A o p.u.), los valores de las tensiones determinados representan las impedancias en el punto de excitación y de transferencia como lo visto en el nodo i. Debido a que la concepción del modelo  $Y_{bus}$  es de tipo lineal esta propiedad se aplica para escalar a cualquier resultado, en función de los resultados obtenidos para el vector  $1\angle 0^\circ$  (A o pu). Del mismo modo se hace con las tensiones armónicas que serán producto de la inserción de una carga que infiere corriente no sinusoidal en el nodo de inyección de corriente.

El uso de esta técnica es recomendado para evaluar los impactos potenciales de los nuevos ASD (Control ajustable de velocidad) y/o otras cargas que producen armónicas. Permite rápidamente identificar resonancias en paralelo o en serie.

La variación de la frecuencia empleada para solucionar la ecuación (1.2.3.3) produce una serie de magnitudes de impedancias y ángulos que van en el rango de frecuencia escogido  $f_0 - f_r$ . Si graficamos esta relación de Impedancia versus la frecuencia obtendremos una indicación visual excelente para apreciar las condiciones de resonancia.



**Figura 12 : Impedancia vs Frecuencia**

La resonancia paralela aparece a manera de picos en la figura 12. Estas están asociadas con impedancias altas para flujos de corriente.

La resonancia serie aparecen al contrario, como profundidades. Estas están asociadas con impedancias bajas a flujos de corriente armónica.

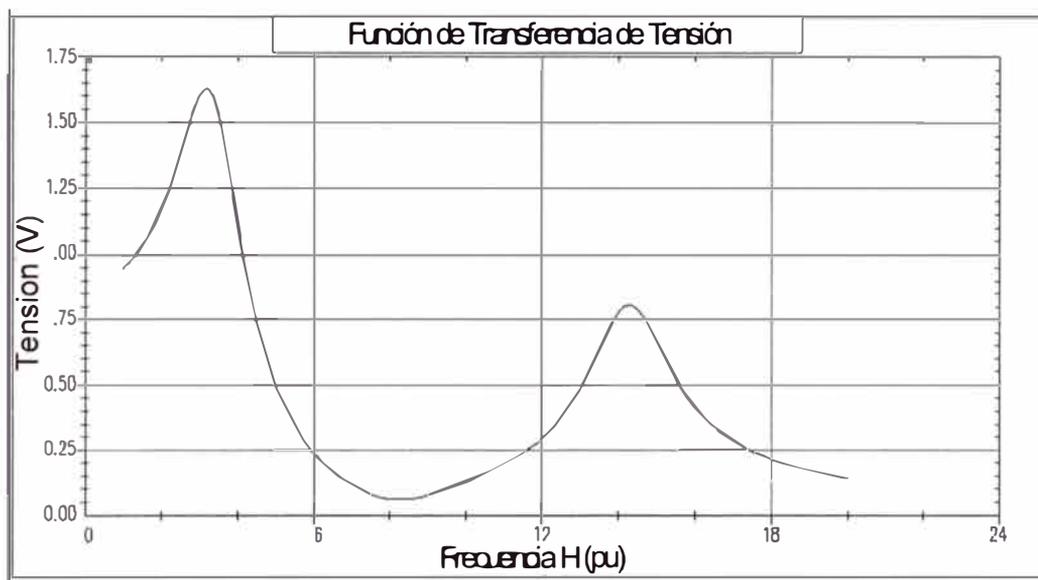
### 2.1.2 Función de Transferencia de Voltaje:

Este segundo tipo de exploración es conducido de manera idéntica que el anterior con la excepción que en vez de

una corriente inyectada tendremos una tensión del tipo  $1\angle 0^\circ$  (V o p.u.) conectado a un nodo de la red. Las tensiones resultantes de resolver la ecuación (1.2.3.3) representan las funciones de transferencia de voltaje a todos los otros nodos en el modelo del sistema.

Este tipo de análisis resulta útil para analizar los efectos de las armónicas bases, que no son sino la distorsión de voltaje armónico que pueda estar presente en los terminales de cualquier red equivalente.

La gráfica de la función de transferencia de voltaje en función de la frecuencia puede ser usada para revelar problemas potenciales con armónicos:



**Figura 13 : Frecuencia vs Voltaje**

Los “picos” en la figura 13 indican las frecuencias donde las tensiones serán amplificadas.

Las profundidades indicarán las frecuencias donde las tensiones serán atenuadas.

En resumen esta técnica consiste en inyectar una corriente en un nodo o Barra. Se empleará una corriente simple para analizar casos de una sola fase y para los casos de análisis de múltiples fases se empleará una corriente del mismo tipo.

Con la inyección de esta corriente y resolviendo la ecuación (1.2.3.3) obtendremos la solución de las tensiones para cada nodo en el caso de análisis de una fase y de cada barra (grupo de nodos) para los casos de múltiples fases.

Para evaluar el problema potencial que tenemos, examinaremos la relación  $V_i / V_j$  para todas las frecuencias barridas. Para los casos donde:

$i = j$  Lo que obtenemos es la impedancia del punto de excitación

$i \neq j$  Lo que obtenemos es la impedancia de transferencia

La aplicación de esta técnica lleva a la conclusión de que es necesario métodos y datos adicionales para poder estudiar las corrientes armónicas producidas por cargas y las tensiones armónicas producidos o presentados naturalmente. Se necesita mejorar los algoritmos de análisis.

## **2.2 Penetración Armónica o Fuente de Corriente:**

Este método es la forma más popular de análisis de armónicos.

Esta técnica al igual que las anteriores puede hacer uso del modelo de admitancia propuesto en la ecuación (1.2.3.3).

El procedimiento de análisis es similar al descrito en el método de exploración de frecuencia.

Se asume que las cargas no lineales o de tipo armónica son representadas usando una suma de corrientes donde cada sumando

corresponde al término de la frecuencia conocida en el espectro de Fourier de la corriente de carga. Esta puede tomar solo la magnitud si el análisis requerido es para la industria y considerará magnitud y fase si el estudio requerido es para medida.

La aproximación del análisis contempla los siguientes pasos:

Paso 1: Estudiar los datos de los armónicos de corriente, ver que frecuencias están presentes.

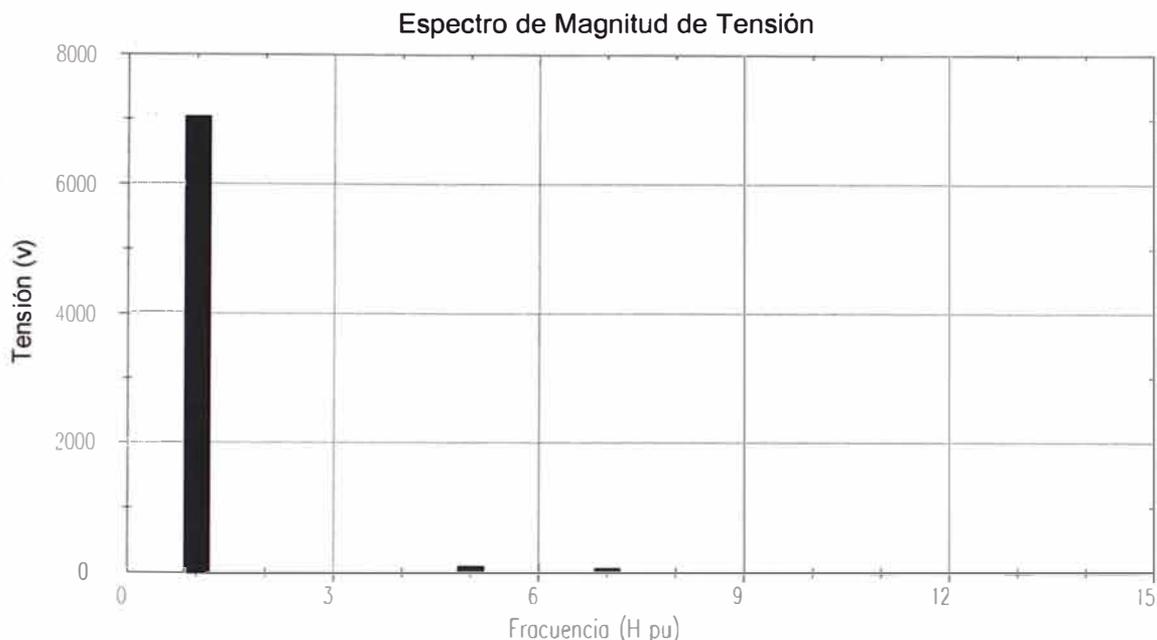
Paso 2: Para esto habrá que formular el modelo de matriz de admitancia del sistema de entrega de energía, incluyendo la contribución de todas las fuentes y cargas lineales. La frecuencia deberá estar vinculada con uno de los vectores de corriente de la serie de Fourier para las cargas no lineales.

Habrà que tomar en cuenta que las impedancias tendrán que expresarse en los términos ya por nosotros conocidos:  $R(\omega)$ ,  $L(\omega)$  y  $C(\omega)$  (parámetros en función de la frecuencia). Se empleará la representación  $Z = R + j \omega L$ ; para las impedancias inductivas) y  $Z = 1 / j \omega C$ ; para las impedancias capacitivas.

Paso 3: Construir el vector de inyección de corriente armónica de (1.2.3.3) para cada una de las frecuencias, debiendo esta concordar con la frecuencia usada en la construcción del modelo de matriz de admitancia.

Paso 4: Resolver la ecuación (1.2.3.3) para encontrar las tensiones para cada frecuencia. Gracias a la propiedad de superposición podemos encontrar la serie de Fourier de las tensiones. La frecuencia asociada con estos fasores de voltaje guarda relación con el usado en la construcción del modelo de matriz de admitancia.

Todos estos pasos descritos comenzarán desde la frecuencia más baja que esté representada en cualquiera de los vectores armónicos de corriente de carga y se repetirá para cada frecuencia en todos los modelos de carga no lineales. Por su puesto que se descuenta que no todos los nodos tendrán inyecciones de corriente de carga armónica en todas las frecuencias. Algunos tendrán cargas del orden  $5^\circ$ ,  $7^\circ$ ,  $11^\circ$ ,  $13^\circ$ , etc. y otros inyectarán  $3^\circ$ ,  $5^\circ$ ,  $7^\circ$ ,  $9^\circ$ , etc. El caso es que cuando una carga de este tipo no inyecte corriente en una frecuencia en particular, habiendo otra que si lo hace, entonces se forzará la inyección de un valor cero para esta frecuencia en particular.



**Figura 14 : Voltaje vs Frecuencia**

Los resultados en este tipo de técnica consisten en una colección de tensiones armónicas (a menudo son referidos en conjunto como un vector) para cada frecuencia considerada en el sistema.

Debido a la naturaleza lineal del sistema, pues las cargas no lineales del sistema han sido representadas como inyecciones de corriente, es posible aplicar la superposición de componentes. Entonces tenemos que cada vector de voltaje corresponde al coeficiente de Fourier de voltaje en el dominio del tiempo, solo en magnitud, pues la fase no se conoce, ver la Figura 14.

Ahora discutiremos los efectos del ángulo de fase de la corriente armónica en diversos estudios.

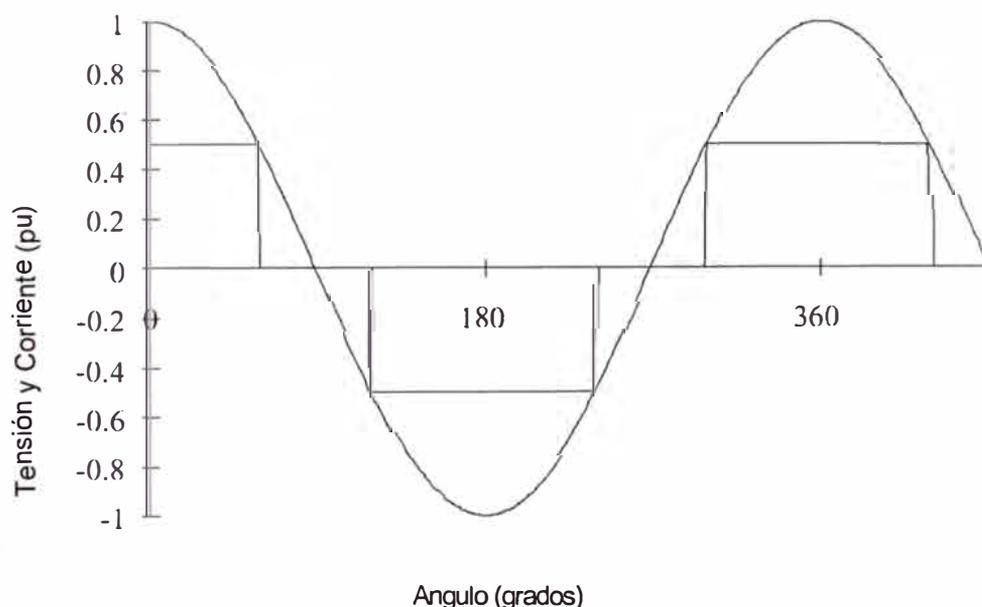
No suele ser muy importante cuando se investiga fuentes únicas de armónicos o en sistemas robustos, estrechamente acoplados, donde una predomina sobre las otras.

Pero sin embargo si suele ser importante en estudio con múltiples fuentes armónicas en sistemas débiles, pues un modelo equivocado llevaría a resultados imprecisos, a pesar de la naturaleza aditiva o sustractiva de las corrientes.

Otro aspecto por el cual es importante el ángulo de fase de la corriente armónica es porque permite determinar en forma precisa la forma de onda de la tensión:

$$v_{an}(t) = \sqrt{2} V_{rms} \cos(\omega t) \quad (2.2.1)$$

$$i_a(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cos(\omega t) - \frac{2\sqrt{3}}{5\pi} \cos(5\omega t) + \frac{2\sqrt{3}}{7\pi} \cos(7\omega t) \dots \quad (2.2.2)$$



**Figura 15: Forma de Onda de Voltaje y Corrientes**

En las ecuaciones (2.2.1) y (2.2.2) se representan la tensión y la corriente de carga respectivamente que no es sino los efectos de la tensión terminal a frecuencia fundamental en las corrientes armónicas generadas por una carga no lineal.

Sin embargo puede haber diferencias sustanciales en los ángulos de fase de las tensiones de Barra a frecuencia fundamental en los sistemas actuales.

Para incluir un ángulo de fase arbitrario “ $\delta$ ” es necesario replantear las ecuaciones de voltaje y corriente de la siguiente manera:

$$v_{an}(t) = \sqrt{2} V_{rms} \cos(\omega t + \delta) \quad (2.2.3)$$

$$i_a(t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} \cos(\omega t + \delta) - \frac{2\sqrt{3}}{5\pi} \cos(5\omega t + 5\delta) + \frac{2\sqrt{3}}{7\pi} \cos(7\omega t + 7\delta) \dots \quad (2.2.4)$$

Donde se puede apreciar que el factor de corrección es de la forma “ $n\delta$ ” y cuyos efectos más significativos los encontramos en las frecuencias más altas, pues permite la cancelación de términos armónicos. De aquí parte la base para el uso de mandos por encima de las 12 pulsaciones.

Un aspecto limitante en esta técnica lo constituye que tanta validez pueda tener la representación del vector de corriente armónica de las cargas no lineales. Los resultados experimentales revelan que esta representación puede ser aceptable hasta niveles donde no se exceda una distorsión de 10% por encima del voltaje terminal de carga, presentándose especial distorsión en ciertos armónicos producidos por los ASD.

Otro factor en contra es que este método está circunscrito a escenarios instantáneos donde los vectores de fuente de corriente armónica representan patrones de carga muy específicos. Es decir no reflejan la realidad donde determinados dispositivos de cargas no lineales producen corrientes armónicas marcadamente diferentes dependiendo del nivel de carga que tomen.

A continuación se presenta un ejemplo, tomado de la referencia [1], de este tipo de cargas. Se trata de un mando DC de 250 HP bajo dos condiciones de operación: primero a carga ligera (figura 16) y luego a plena carga (figura 17).

El capturar el alcance de los armónicos para estas dos condiciones de operación es difícil, más aún sería para las demás condiciones de operación entre ellos. Y si a ello le agregamos el problema por la variación del ángulo de fase de la tensión terminal producto de los cambios en las condiciones de carga, las simulaciones que tendríamos que realizar sería muy grande y el método no nos asegura exactitud para estos casos.

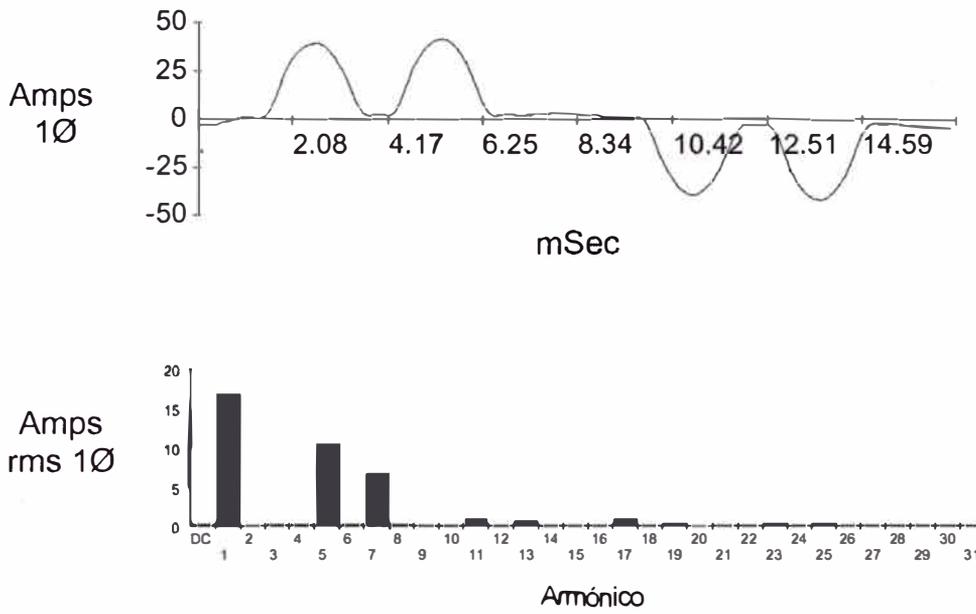


Figura 16: Corriente de Línea a Carga Liviana (Iluminación)

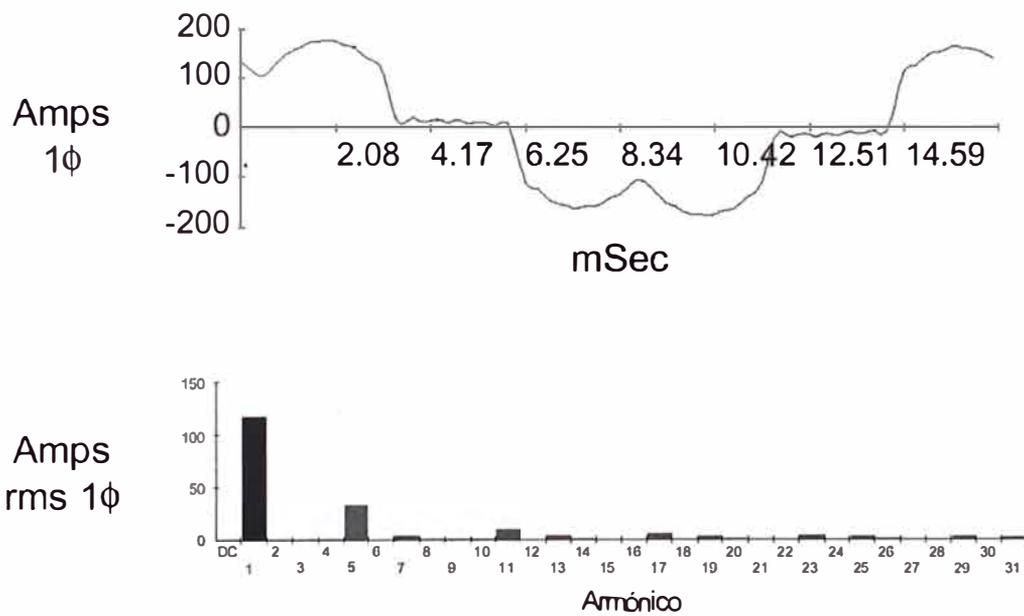


Figura 17 : Corriente de Línea a Plena Carga

## **2.3 Flujo de Potencia Armónica o Métodos Iterativos:**

Las deficiencias en el método anterior de fuente de corriente pueden ser superadas usando el método de flujo de potencia armónica que se le conoce comúnmente por las siglas HPF (Harmonic Power Flow).

Básicamente como su nombre lo indica este método se basa principalmente en dos tipos de algoritmos: uno de ellos es realizar flujos de potencia y el otro un análisis iterativo de los armónicos tanto en corriente como en tensión.

El flujo de potencia permitirá: determinar las tensiones en magnitud y fase, calcular el espectro de la carga armónica en función de las tensiones en Barra y el espectro normalizado de la carga.

Esta técnica presenta dos marcadas variaciones:

### **2.3.1 Primera Variación:**

Se realiza un flujo de potencia (de carga) a frecuencia fundamental bajo un modelo lineal para todo equipo que entrega energía y para las cargas, las tensiones finales de carga a esta frecuencia son utilizados para ajustar los vectores de corriente armónica de carga no lineal (ver ecuación 2.2.4 ). Como se podrá apreciar se requiere aún conocer el vector de corriente armónica como era el caso del método anterior.

Esta variación como se ve es una ampliación del método de fuente de corriente con la mejora en la corrección automática para la tensión terminal de frecuencia fundamental.

### 2.3.2 Segunda Variación:

Este procedimiento se basa en que la representación más exacta de los espectros de corriente armónica no lineal para un estudio más exacto se puede representar por:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(\bar{V}_1, \dots, \bar{V}_N, C_1, \dots, C_M) \\ f_N(\bar{V}_1, \dots, \bar{V}_N, C_1, \dots, C_M) \end{bmatrix} \quad (2.3.2.1)$$

Lo que quiere decir que cada miembro del vector corriente se podrá expresar por una parte en función de las tensiones de armónicos en los terminales de carga:  $V_1, \dots, V_N$  y por otro lado con  $C_1, \dots, C_M$ , que no son sino variables de control que permiten definir varios parámetros de las cargas involucradas como por ejemplo velocidad de giro en el control de un motor.

El modelo matemático que describe nuestro sistema estará compuesto por: la ecuación 2.3.2.1 (modelo para el vector de corriente en función de lo armónicos de tensión y variables de control), la ecuación 1.2.3.3 (ecuación

de sistema, puede existir otro más completo) y complementada por la ecuación 2.2.4 que provee los nuevos valores de corriente.

Si existen cargas lineales se representarán por su forma polar  $P + jQ$ .

Todo este conjunto de ecuaciones se resuelve iterativamente por algún método conocido como el de Gauss-Sidel o el de Newton.

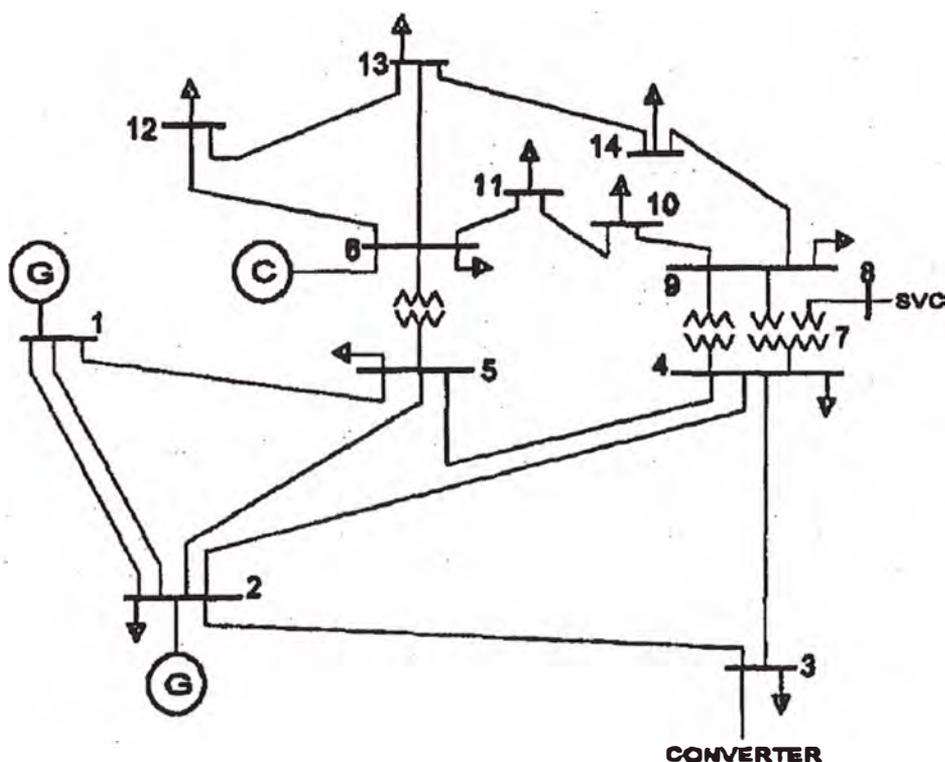
Esta 2da variante se puede tornar extremadamente compleja en función del caso que se analice. Sin embargo constituye una herramienta poderosa pues permite modelar las cargas de una manera arbitrariamente compleja y cuando es posible obtener una solución de forma cerrada, será posible trabajar solamente en dominio de la frecuencia de acuerdo a 2.3.2.1. Si esto no se puede conseguir (caso más probable) será necesario alternar una solución combinada entre el dominio del tiempo y de la frecuencia.

Esta técnica pues se constituye en un modelo híbrido pues utiliza un modelo de Sistema en el dominio de la frecuencia (ecuación 1.2.3.3 ), pero representa las cargas no lineales con ecuaciones diferenciales en el dominio del tiempo. Partiendo de condiciones iniciales adecuadas se obtiene un vector de corriente armónico nuevo, cuando el estado estacionario es alcanzado. Este vector corriente es usado para obtener una tensión terminal actualizado (de acuerdo como lo describe el método de fuente de corriente). Luego continuamos hasta que el modelo de red en el dominio de la frecuencia converge con todos los modelos de carga no lineal en estado estacionario.

### CAPITULO III CASOS ANALIZADOS

Para complementar los aspectos teóricos planteados en el capítulo anterior expondremos a continuación dos sistemas de pruebas Standard de la IEEE-519, las cuales han sido adaptadas para su uso en análisis de armónicos. Estos modelos son Standard IEEE que se encuentran contenidos, en una recopilación de prácticas recomendadas, en la referencia [7] y son expuestos ampliamente por los autores como A. Bonner, T. Grebe, E. Gunther, Ribeiro, entre otros. Ver la referencia [3].

#### 3.1 Sistema A : Estudio de un sistema equilibrado



**Figura 18** : Modificación del Standard IEEE 14-BUS SYSTEM ("IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems" - Standard IEEE -519)

El gráfico de la Figura N° 11 es la representación de un sistema trifásico equilibrado.

El sistema considerado es una modificación del Standard IEEE 14-BUS SYSTEM. Se ha reemplazado la carga en la barra 3 de 91 MW por otra de 100 MW DC terminal y se ha reemplazado el condensador de la barra 8 por un SVC (Static Voltage Converter) .

Las especificaciones del conexionado y rango de operación de los elementos no lineales como: Convertidor, filtros ; se encuentran detallados en el Anexo A.

### **3.1.1 Consideraciones de modelado:**

Bajo condiciones de equilibrio sólo es necesario modelar el sistema para frecuencias armónicas características.

Debido a la presencia del SVC será necesario modelar todas las armónicas impares menos los "triples" (orden 3, 9, 15, etc.)

Se modelará las redes de secuencia positiva y negativa debido a la presencia de un número de máquinas sincrónicas.

Asimismo se modelará las redes de secuencia cero a frecuencias triples, porque si la saturación del transformador es modelada, armónicas de este orden aparecerán.

Se considerará el desplazamiento de fase en los transformadores debido a la presencia de dos fuentes armónicas.

Se empleará modelos de fuente de corriente ajustado para los ángulos de fase del conductor colectivo. El modelo detallado se podrá encontrar en la referencia [2].

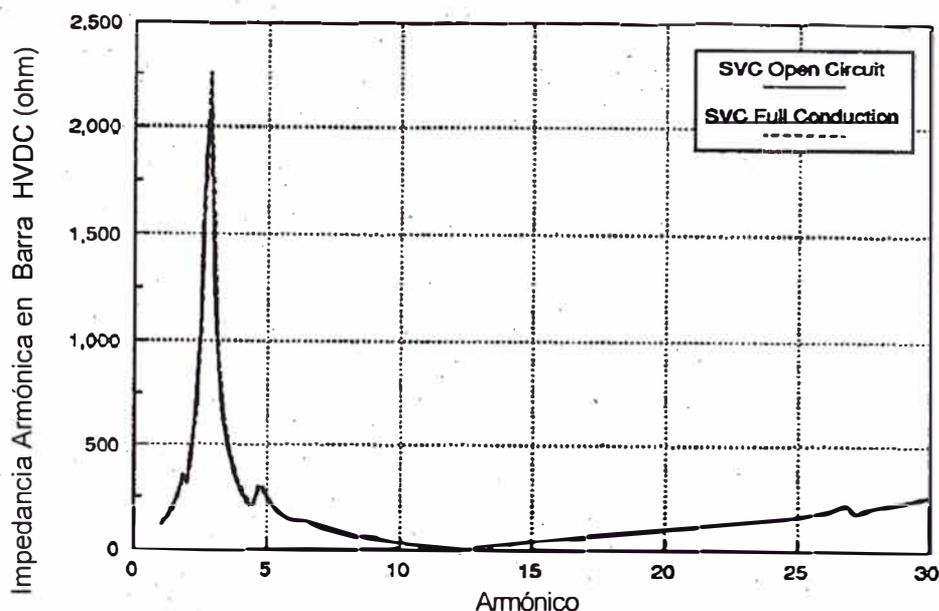
Se considera que el nivel de distorsión THD es alto (entre 5-10%) por lo que será necesario un modelo detallado para el convertidor en la barra HVDC y para el SVC. Estos modelos los podemos consultar en la referencia [4].

Los generadores y condensadores sincrónicos fueron modelados según el modelo de carga Tipo B de la referencia [2]

### **3.1.2 Estudio de Exploración de Frecuencia:**

Este es el primer paso a realizar dentro del estudio de armónicas. Pues como ya se mencionó se refiere a la representación gráfica de la impedancia (magnitud y fase) del punto de mando en una barra de interés versus la frecuencia.

Los resultados de esta exploración de frecuencia se muestran en la Figura 19.



**Figura 19 : Exploración de Frecuencia en la Barra 3 (HVDC)**

La exploración se realizó en barra del HVDC para los escenarios donde el SVC está en circuito abierto y en conducción completa.

Se ha empleado una red de secuencia positiva y todos los filtros han sido modelados.

La exploración muestra una condición resonante alrededor de la 3ra armónica y otra resonancia menor alrededor de la 5ta armónica. Debido a la acción de los filtros la impedancia cae.

Como regla general los filtros son eficientes en frecuencias por debajo de su frecuencia sintonizada y de este modo la impedancia en frecuencias más bajas aumenta.

### 3.1.3 Estudio de Flujo de Potencia Armónica:

La figura 20 resume los THDs de tensión para las tres combinaciones entre el HVDC y el SVC: HVDC solo, SVC solo y el HVDC y SVC operacionales a la vez.

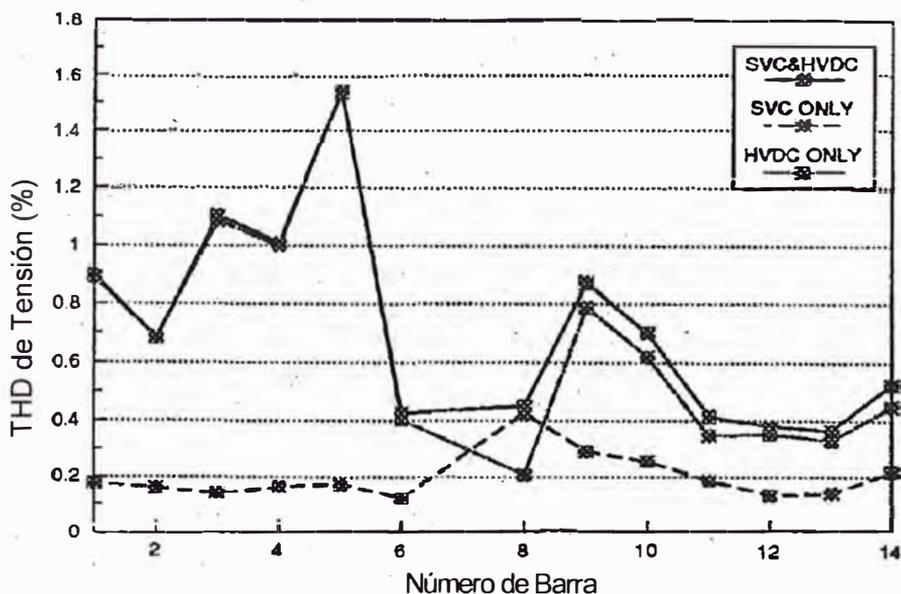


Figura 20 : THDs de Tensión para el Sistema A en estudio

Se puede apreciar que el SVC tiene poco impacto en la distorsión de tensión armónica, mientras que el HVDC contribuye significativamente a la distorsión.

Ahora analicemos las condiciones operativas del convertidor en términos del ángulo de disparo del convertidor HVDC.

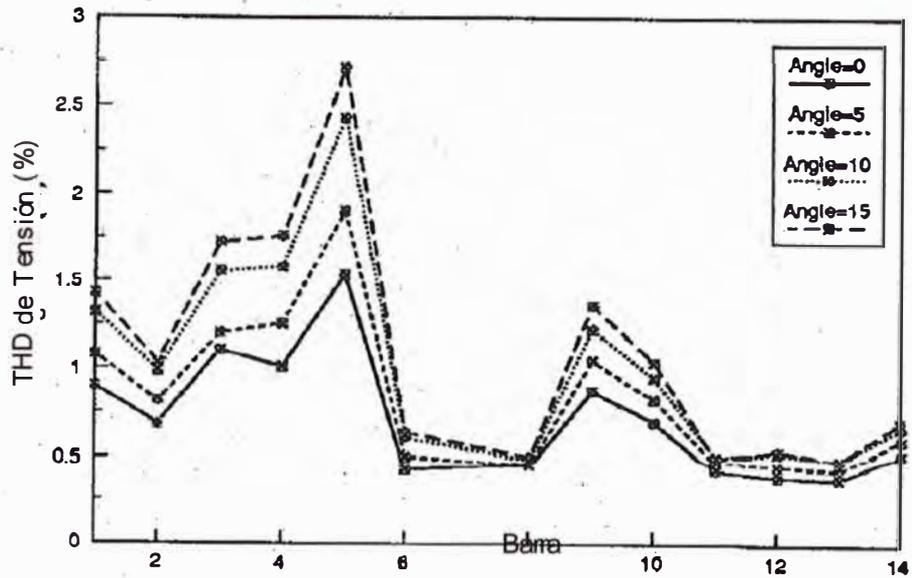


Figura 21 : Efectos del ángulo de disparo en la distorsión de Tensión THD

La corriente DC se mantuvo constante. Se ve que la medida que se incrementa el ángulo de disparo la distorsión aumenta lo que puede llevar a superar los límites recomendados por la IEEE-519.

Ahora veamos el efecto de los filtros adicionales en la barra del convertidor HVDC.

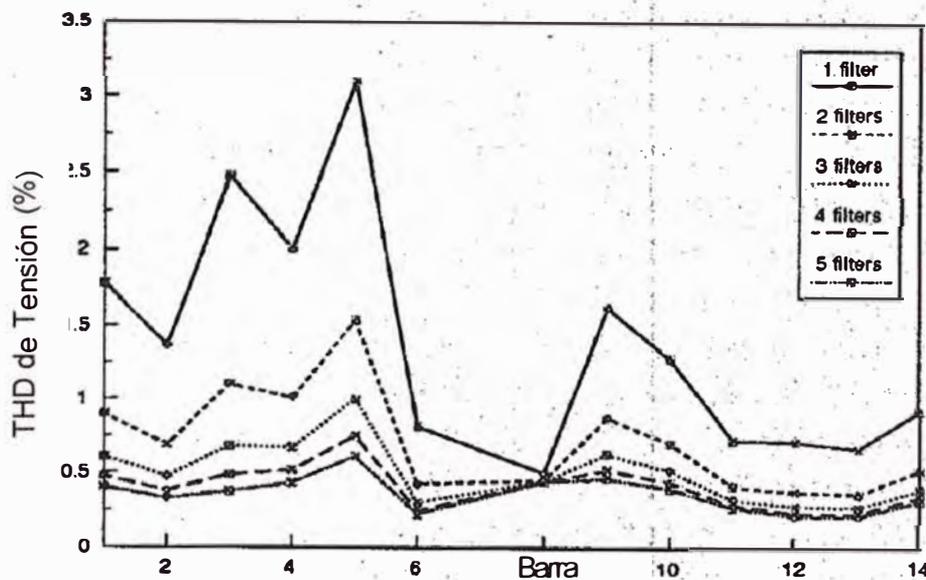


Figura 22 : TDD aplicando filtros en la barra del HVDC

Pasada la adición del tercer filtro no hay una mejora sustantiva en el nivel de THD a mantener.

Este ejemplo sirve para ilustrar un estudio de apantallado armónico típico.

El diseño actual de filtros de potencias armónicas altas que producen equipos como el convertidor en el HVDC y el SVC, requiere un mayor estudio de las variaciones de corriente armónica, de los cambios de impedancia armónica en sistemas con topología AC y de los efectos de sintonización de filtros.

### 3.2 Sistema B : Estudio de un sistema desequilibrado

Este es un sistema desequilibrado:

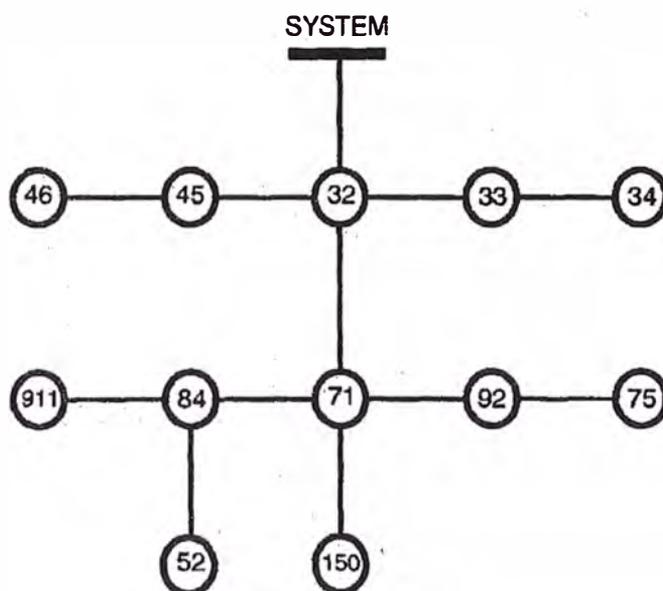


Figura 23 : Diagrama unifilar del sistema de barra IEEE-13

El sistema considerado corresponde a un sistema de distribución Standard de prueba (Standard IEEE 13-BUS SYSTEM) cuyo detalle lo podemos encontrar en la referencia [5]. Esta configuración corresponde a un alimentador primario trifásico con alimentadores laterales de tres, dos y una fase.

La composición de carga es variada: mandos de velocidad ajustable (ASD) para bombas de calor, iluminación fluorescente y fuentes no específicas como Televisores, computadoras.

El sistema se encuentra sumamente desequilibrado. La relación entre la corriente de secuencia negativa con respecto a la de secuencia positiva es alrededor del 20%

Las especificaciones del tipo de armónico presente y la magnitud y características de las cargas conectadas en el sistema se encuentran detalladas en el Anexo B.

### **3.2.1 Consideraciones de modelado:**

El sistema debe ser analizado usando un modelo trifásico para poder describir correctamente las líneas de transmisión, el desbalance de las cargas y la variedad de conexiones de los transformadores.

La metodología empleada está descrita en la referencia [4].

Los componentes fueron modelados de acuerdo a los siguientes criterios:

- Las cargas pasivas se consideran como cargas constantes.

- La composición de la carga se ha considerado en la Tabla 3 del Anexo B. En las frecuencias armónicas la parte lineal de la carga se consideró como una impedancia constante.
- Las cargas productoras de armónicas se modelaron como fuentes de corriente de acuerdo a la Tabla 2 del Anexo B

Se hicieron las siguientes consideraciones a nivel sistema:

- Las líneas de distribución fueron modeladas usando un modelo de parámetro distribuido (línea larga) es decir considerando el efecto de retorno a tierra dependiente de la frecuencia
- Las conexiones de los transformadores fueron modeladas usando la aproximación de bobina acoplada ignorándose la saturación. De estudios prácticos se considera que para valores más altos que el valor de referencia de 1.1 p.u. requiere el modelamiento de la saturación.
- Los motores fueron modelados como cargas de energía constante a frecuencia fundamental y con una impedancia transitoria de 0.2 p.u. a 60 Hz. (base propia de la máquina). La conexión motriz también fue modelada.

### **3.2.2 Estudio de Exploración de Frecuencia:**

Al igual que el sistema equilibrado se puede utilizar un análisis de exploración de frecuencia para determinar las condiciones de resonancia.

En un sistema de distribución típico en las barras están presentes una gran cantidad de capacitores y un gran número de cargas productoras de armónicas. Pudiendo haber variación significativa de impedancia en cada barra, incluso a nivel de cada fase.

### **3.2.3 Estudio de Flujo de Potencia Armónica:**

Para este estudio se asumió todas las consideraciones detalladas en los párrafos anteriores.

Además las magnitudes de las armónicas de corriente fueron escaladas de acuerdo al valor de la corriente fundamental y se asumió tres diferentes aproximaciones para definir los ángulos de fase de corriente armónica tal como se resume a continuación:

- S1: Los ángulos de fase fueron ajustado de acuerdo al ángulo de fase de la corriente fundamental con respecto a la referencia.
- S2: Todas las fuentes armónicas fueron asumidas para tener los mismos ángulos de fase.
- S3: Sólo las fuentes no específicas fueron modeladas para que tengan el mismo ángulo de fase.

El sistema se modelo como una fuente puramente sinusoidal con impedancia derivada de la información dada por el caso: Falla de 1 Línea Trifásica a Tierra.

En la Tabla 1 se muestran los resultados del THD obtenido para los tres escenarios descritos en cada una de las barras del sistema.

Para el escenario S1 solamente 12 de las 34 barras por fase tiene un THD por encima del 5%, límite recomendado por IEEE-519.

En los escenarios S2 y S3 varias barras-fase están fuera del rango e incluso algunos casos exceden el 10%.

Estas apreciaciones nos llevan a la conclusión de que la presunción del modelado debe ser revisada especialmente cuando se compara contra las normas.

| Barra | Fase | Escenario |       |       | Tipo de Fuente Armónica |       |       |
|-------|------|-----------|-------|-------|-------------------------|-------|-------|
|       |      | S1        | S2    | S3    | Fluor.                  | ASD   | Otras |
| 45    | B    | 2.701     | 4.502 | 4.859 | 2.400                   | 0.221 | 0.887 |
|       | C    | 3.311     | 6.882 | 5.831 | 2.845                   | 0.278 | 1.346 |
| 33    | A    | 2.921     | 4.557 | 5.022 | 2.516                   | 0.305 | 1.166 |
|       | B    | 2.670     | 4.525 | 4.823 | 2.361                   | 0.222 | 0.908 |
|       | C    | 3.258     | 6.894 | 5.756 | 2.773                   | 0.278 | 1.364 |
| 46    | B    | 2.702     | 4.495 | 4.855 | 2.402                   | 0.221 | 0.882 |
|       | C    | 3.348     | 6.897 | 5.895 | 2.887                   | 0.278 | 1.348 |
| 32    | A    | 2.914     | 4.548 | 5.010 | 2.511                   | 0.304 | 1.163 |
|       | B    | 2.663     | 4.515 | 4.810 | 2.355                   | 0.221 | 0.906 |
|       | C    | 3.251     | 6.878 | 5.741 | 2.767                   | 0.277 | 1.361 |
| 52    | A    | 5.549     | 9.326 | 9.156 | 4.794                   | 0.669 | 2.127 |
| 71    | A    | 5.386     | 8.945 | 9.046 | 4.687                   | 0.546 | 2.104 |
|       | B    | 4.700     | 8.370 | 8.369 | 4.111                   | 0.384 | 1.677 |
|       | C    | 6.153     | 3.362 | 10.51 | 5.172                   | 0.523 | 2.690 |
| 84    | A    | 5.512     | 9.288 | 9.098 | 4.769                   | 0.629 | 2.121 |
|       | C    | 6.588     | 4.516 | 11.57 | 5.507                   | 0.576 | 2.908 |
| 150   | A    | 5.386     | 8.945 | 9.046 | 4.687                   | 0.546 | 2.104 |
|       | B    | 4.700     | 8.370 | 8.369 | 4.111                   | 0.384 | 1.677 |
|       | C    | 6.153     | 3.362 | 10.51 | 5.172                   | 0.523 | 2.690 |
| 92    | A    | 5.386     | 8.945 | 9.046 | 4.687                   | 0.546 | 2.104 |
|       | B    | 4.700     | 8.370 | 8.369 | 4.111                   | 0.384 | 1.677 |
|       | C    | 6.153     | 3.362 | 10.51 | 5.172                   | 0.523 | 2.690 |
| 911   | C    | 6.746     | 4.952 | 11.98 | 5.631                   | 0.598 | 2.991 |
| 75    | A    | 5.603     | 9.290 | 9.516 | 4.865                   | 0.567 | 2.227 |
|       | B    | 4.861     | 8.679 | 8.745 | 4.244                   | 0.404 | 1.754 |
|       | C    | 6.342     | 3.862 | 10.94 | 5.310                   | 0.545 | 2.809 |
| 34    | A    | 1.506     | 1.064 | 2.569 | 1.201                   | 0.208 | 0.789 |
|       | B    | 1.203     | 1.323 | 3.761 | 1.054                   | 0.152 | 0.527 |
|       | C    | 1.522     | 1.499 | 4.174 | 1.253                   | 0.217 | 0.822 |

**Tabla 1 : Distribución de la Distorsión Armónica de Tensión THD de acuerdo a los escenarios S1, S2, S3 y los tipos de Fuentes Armónicas**

De la Tabla 1 no se puede concluir cual modelado es el más conservativo.

También en las columnas siguientes de la Tabla 1 se muestran los valores de distorsión sólo cuando este tipo de fuente armónica este presente.

Otra observación interesante para sistemas de distribución es que a menudo los valores de THD son mucho menores que los obtenidos por un estudio de flujo de potencia armónica. Entre las razones más comunes de este hecho están:

- Tolerancias en la fabricación y el uso diverso de dispositivos, puede crear suficientes diferencias en le espectro que permita la cancelación armónica dentro de cargas agregadas.
- En muchas instalaciones comerciales equipos como los fluorescentes están distribuidos de manera arbitraria entre las tres fases. Si estos equipos se pudieran agrupar en bancos idénticos y fueran servidos desde un transformador Delta-Estrella de manera equilibrada, se podrían eliminar las armónicas triples (múltiplos de 3).

En conclusión mientras no se gane mejor experiencia adicional, el análisis armónico retendrá alguna subjetividad. A manera de ilustración se presenta la figura con el espectro de tensiones en las tres fases en la barra 32 del sistema propuesto.

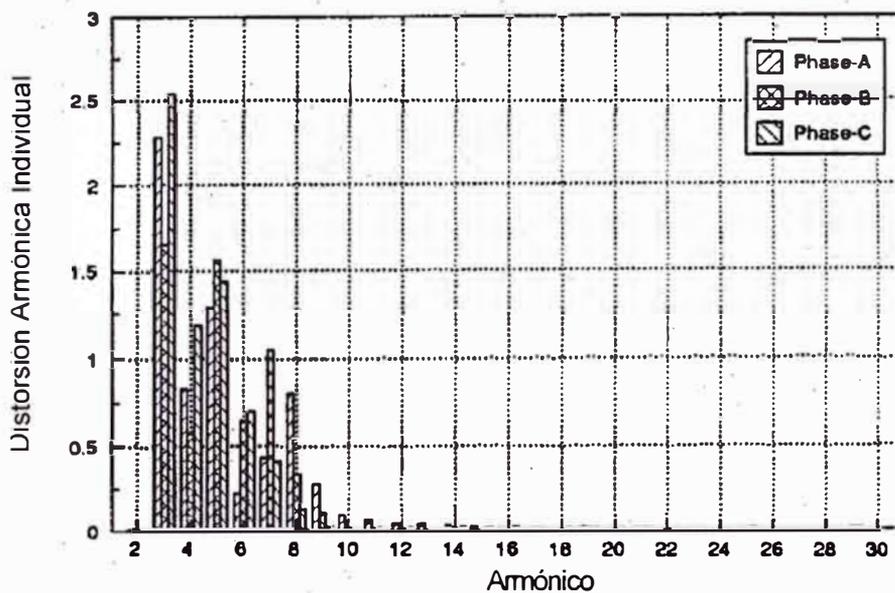
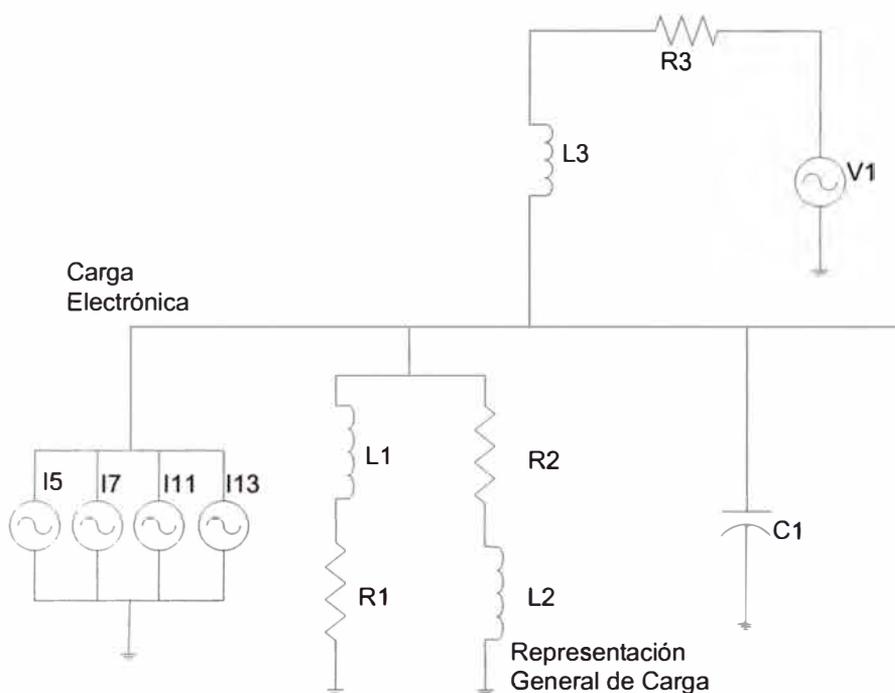


Figura 24 : Espectro de voltaje en la barra 32

### 3.3 Sistema C : Sistema de Distribución

Este ejemplo consiste en un sistema de distribución en 11kV. Tal como se muestra en la figura 19. Los datos de carga y operación se encuentran en el Anexo C



**Figura 25 : Diagrama unifilar de un Sistema de Distribución Típico en 11 kV**

### 3.3.1 Consideraciones de modelado:

Una manera de simplificar el estudio de armónicas es determinar cual de los niveles armónicos es más importante, para lo cual estimaremos la frecuencia de resonancia paralela armónica predominante, que se estima por:

$$h = \sqrt{\frac{MVA_{SC}}{MVAR_{CAP}}} = \sqrt{\frac{30000}{250}} = 10.95$$

El resultado nos permitirá simplificar el estudio alrededor de la 11ª armónica. Entonces la distorsión de tensión armónica más significativo se da ésta armónica.

Más análisis revelan que: la frecuencia de resonancia varía con la resistencia del sistema y con la amplitud de la impedancia equivalente armónica. Asimismo las tensiones de salida no son máximas en la frecuencia de resonancia y son función del amortiguamiento del circuito.

En el diagrama del sistema se ha propuesto una representación general de la carga para simular los diferentes modelos de representación de una carga.

### **3.3.2 Discusión de resultados:**

Las tensiones armónicas altas producen altas corrientes armónicas tanto en el banco capacitivo como en la reactancia del sistema.

Si se asume el modelo 2, del anexo C, y se simula bajo las condiciones descritas se obtiene una distorsión de 66 V. (1.04%). Y con el modelo1 el resultado es de 332 V. (3.23 %).

Así cerca de la frecuencia de resonancia paralela, el impacto de la representación de la carga puede ser muy significativo.

Para tener una idea más clara de la respuesta del sistema en función del modelo de carga adoptado se realiza una simulación para diferentes casos típicos:

| Caso    | Modelo Carga Linear                        |
|---------|--|
| Caso 1  | Sin representación de carga                |
| Caso 2  | P,Q Flujo con carga básica                 |
| Caso 3  | P,Q Flujo con carga básica                 |
| Caso 4  | Motor de Inducción 50% carga               |
| Caso 5  | Motor de Inducción 25% carga               |
| Caso 6  | Motor de Inducción 50% carga               |
| Caso 7  | Motor de Inducción 75% carga               |
| Caso 8  | Motor de Inducción 90% carga               |
| Caso 9  | Motor de Inducción 25% carga + Efecto skin |
| Caso 10 | Motor de Inducción 75% carga + Efecto skin |

Obteniéndose los siguientes resultados:

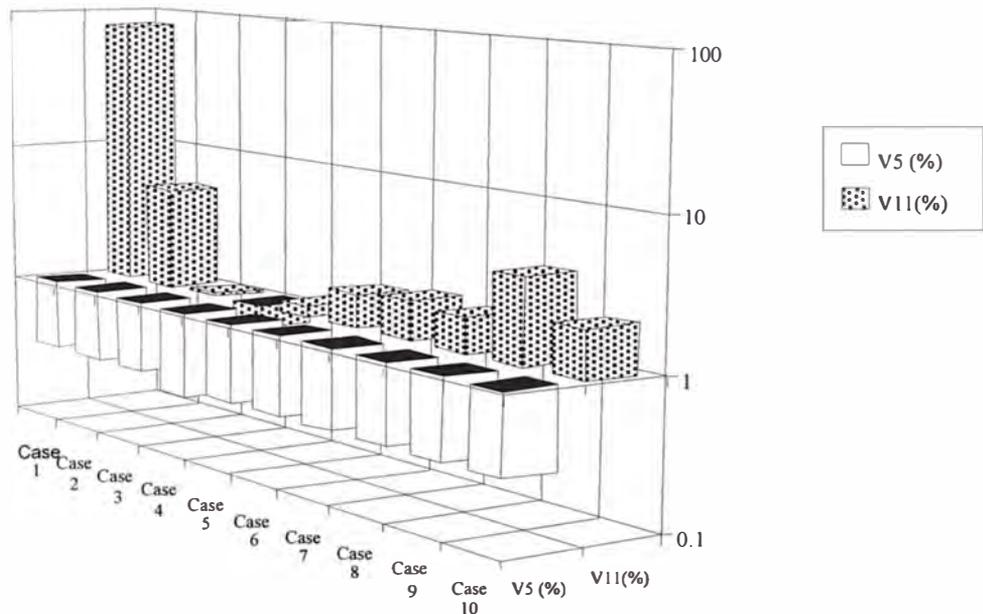
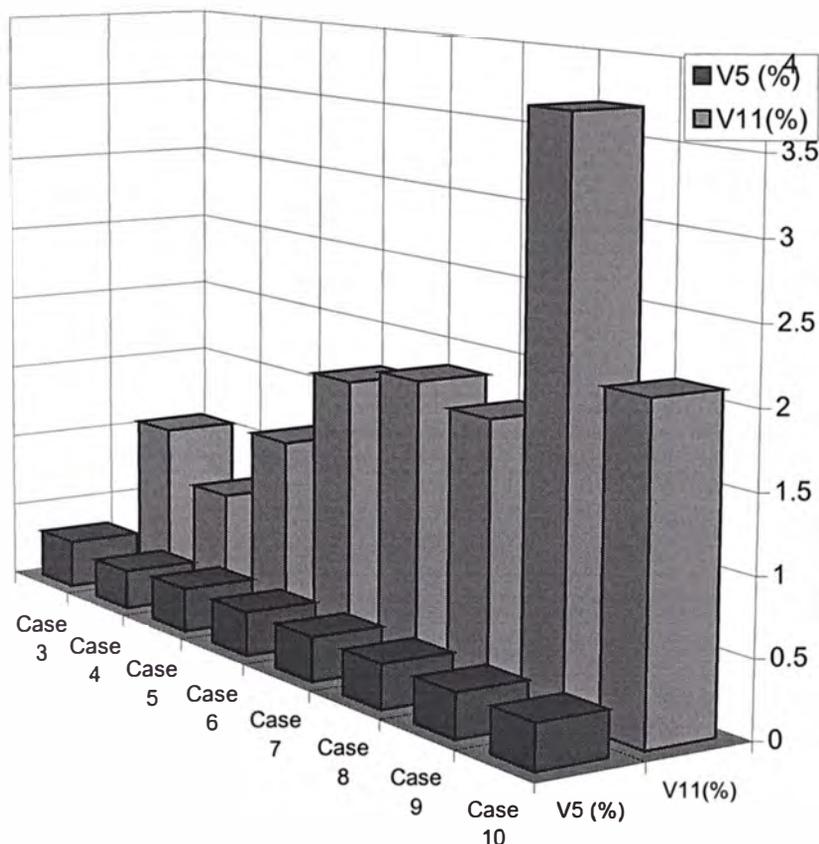


Figura 26 : Tensión Armónica (%) para diferentes modelos de carga.



**Figura 27 : Tensión Armónica (%) en la barra de 11 kV para diferentes modelos de carga**

El efecto SKIN fue incluido para los caso 9 y 10 a causa del impacto en la impedancia del sistema en la frecuencia y en la componente resistiva de la carga. Esto se puede apreciar en la figura 26.

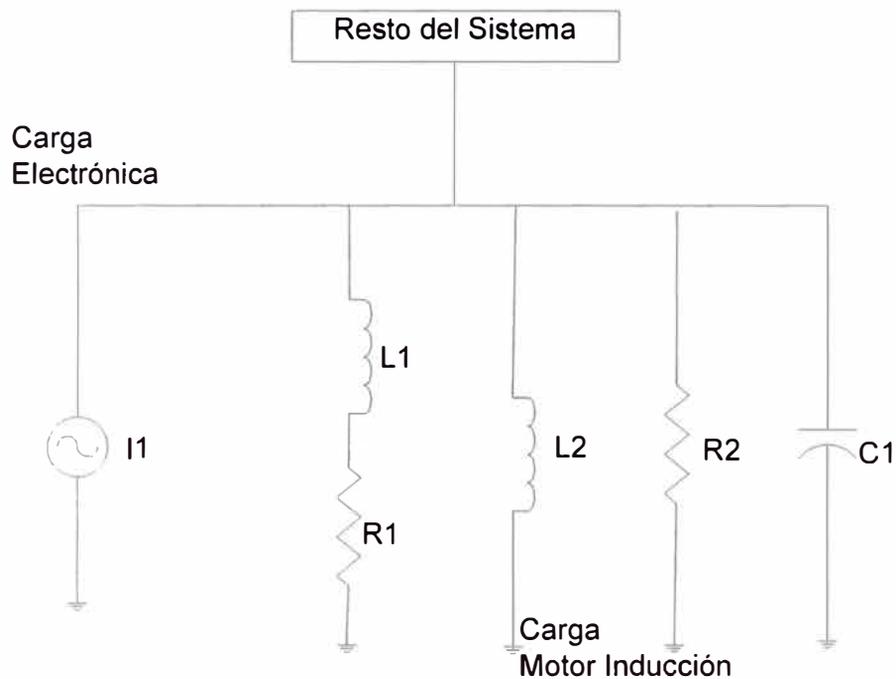
Se puede demostrar claramente, ver figura 27, como varias tensiones resultantes pueden mostrar mucha dependencia con

el modelo empleado y la composición de la carga. Al comparar estos valores con los Standard IEEE-519, estos son superados claramente.

El modelo económico P, Q es inadecuado para estudios armónicos. Los modelos sugeridos en la literatura no pueden ser usados

indiscriminadamente sin un cuadro actual y detallado de las características y composición de la carga, por lo tanto es crucial una representación apropiada.

Por lo tanto se propone un modelo que resume las características más apropiadas:



**Figura 28 : Representación general de carga para estudios de armónicos**

Las ecuaciones que describen el comportamiento del circuito son:

$$R_1 = \frac{V^2}{P(1-K-K_E)} h^\beta$$

$$XL_2 = \frac{V^2}{K_m K K_1} h$$

$$R_2 = \frac{XL_2}{K_2}$$

Donde:

- V : Tensión del sistema
- $XL_1$ : Reactancia del transformador
- $C_1$  : Capacitancia estimada de la carga.
- $I_1$  : Fuente de corriente armónica estimada

Además:

- P : Potencia activa total
- K : fracción de los motores de inducción
- $K_E$  : Fracción de carga electrónica.
- $R_1$  : Resistencia equivalente representando la componente puramente resistiva de la carga.
- $\beta$  : Factor de corrección del efecto SKIN
- $XL_2$ : Inductancia equivalente representando la inducción

Considerar para Motores:

- $R_2$  : Factor en retraso para representar el motor de Inducción.
- $K_1$  : Condición de severidad del arranque
- $K_m$  : Factor de motores instalados
- $K_2$  : Fracción de rotor bloqueado (secuencia negativa)

Considerar para Inductancias:

- h : Orden armónico
- $XL_1$ : Inductancia de dispersión del transformador en el lado de menor tensión conectado con la carga resistiva
- $I_1$  : Fuente ideal de corriente armónica (use valores típicos acorde con el tipo de carga alimentada)

La resistencia  $R1$  es estimada de la actual carga resistiva conectada en la barra.

## CONCLUSIONES

1. El análisis nodal de redes con respecto al de mallas presenta ciertas ventajas como: la simplificación al describir el comportamiento de la red y preparar los datos, obtención directa de resultados.
2. Los resultados que se obtengan son muy sensibles al modelo de red utilizado y al modelo de los componentes elegido. En especial alrededor de los puntos de resonancia.
3. Al seleccionar el modelo de los componentes y técnica de análisis tendremos cuidado de hallar un equilibrio entre la complejidad de las formulaciones y un nivel razonable de exactitud.
4. Será indispensable una representación multifásica del sistema cuando existan: excitaciones armónicas desequilibradas, transformadores (estrella-delta, estrella-estrella) para cancelación de armónicos bancos de condensadores, desequilibrio significativo en la red, y aquellos casos donde sea importante el estudio de corrientes en los conductores neutros.
5. El fundamento que permite la representación de un dispositivo no lineal como fuente ideal de corriente armónica ocurre cuando la tensión de alimentación presenta distorsión entre el 5% y 10%. Consultar referencia [6].

6. Los niveles de distorsión armónica combinadas son altamente dependientes de los ángulos de fase.
7. Para dimensionar el tamaño del sistema equivalente es necesario tomar en cuenta que elementos deben ser retenidos, por su importancia, y como es el resto de la red a ser representado. Se hace necesario un estudio de sensibilidad.
8. En un sistema donde predomina una fuente monofásica el estudio de la fase del espectro no es necesario a diferencia del caso multifásico.
9. El estudio de armónicos se lleva a cabo mediante simulaciones empleando herramientas numéricas. Lo que permite cuantificar la distorsión de la forma de onda de corriente y tensión originada por los armónicos y las pérdidas adicionales originadas por el flujo de armónicos.
10. Para la simulación en el dominio de la frecuencia el tiempo de operación del sistema es subdividido en intervalos casi-permanentes. Donde las ecuaciones son transformadas en ecuaciones algebraicas lineales dependiendo de la frecuencia.
11. El conocer la corriente y tensión armónica en un sistema permite el cálculo del flujo de potencia reactiva para cada armónico, permitiendo la identificación de los circuitos involucrados en la resonancia.
12. El método de flujo de potencia armónica permite considerar inyecciones armónicas desequilibradas ya que el modelo considera el acoplamiento mutuo entre fases a una misma frecuencia.
13. Es posible el empleo de múltiples fuentes armónicas en el sistema pues se está empleando operaciones matriciales directas.

14. Para realizar un estudio por el método flujo de potencia armónica es necesario realizar un análisis más preciso para considerar el peor caso de distorsión que pueda experimentar el sistema.
15. En los casos con presencia de múltiples fuentes armónicas el peor caso de distorsión se obtiene analizando separadamente cada fuente y sumando la magnitud de cada una. Para determinar la fase se recurre a la relación entre la corriente a frecuencia fundamental y las corrientes armónicas producidas por el elemento no lineal.
16. En los casos donde se emplee un modelo de fuente de corriente, los valores de corriente no pueden ser correctos para barras donde, la distorsión de tensión es significativa, pues el modelo asumido es válido para condiciones de poca distorsión armónica en la tensión terminal.
17. Para modelos con alta distorsión de tensión y desbalance significativo de tensión, será necesario un análisis más detallado que contemple el desarrollo de formulaciones en función de la tensión terminal y parámetros de operación de los dispositivos. Asimismo será necesario combinar métodos de solución en el dominio de la frecuencia con los de dominio del tiempo y las técnicas de solución de los métodos numéricos iterativos.
18. Los sistemas eléctricos en distribución son muy difíciles de desarrollar empleando el modelo de fuente de corriente pues resulta de agregar muchas fuentes de corriente y entonces hay que desarrollar el modelo a partir de los datos de composición de la carga.

19. La forma de onda resultante de todas las fuentes normalmente es menos distorsionada que la forma de onda del dispositivo individual.
20. Para los sistemas en distribución la tesis del análisis por caso no es aplicable, por lo que se plantea una necesidad de investigación en el modelado de carga y su respuesta de frecuencia en el sistema.
21. Debido a que la proliferación de fuentes de distorsión aumenta, tiene que considerarse que existe un número de fuentes que no pueden ser descritas por las técnicas discutidas. Entonces será necesario una investigación adicional para fuentes de distorsión en frecuencias no armónicas.

**ANEXO A**  
**DETALLES DEL SISTEMA A:**  
**MODIFICACIÓN DEL MODELO IEEE-14-BUS SYSTEM**

Consideraciones generales:

Barra 3: se reemplazará la carga de 91 MW por otra de 100 MW DC terminal.

Barra 8: se reemplaza el condensador por un SVC.

a) Datos del Convertidor en la barra HVDC:

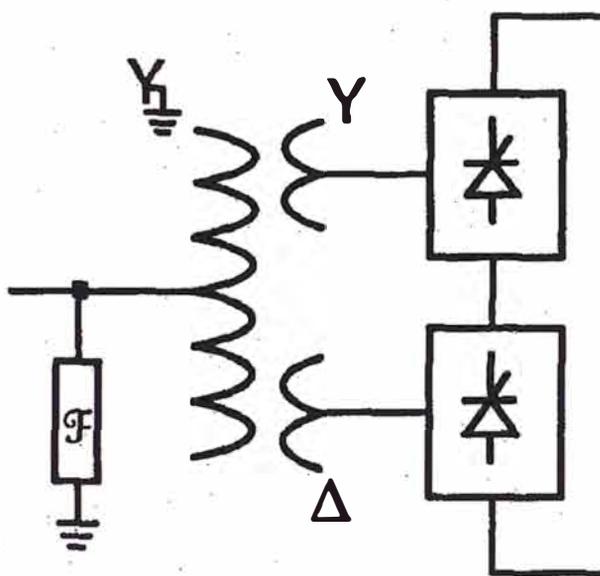


Figura 29 : Convertidor HVDC conectado en la Barra 3

- Transformador:  
135MVA  
230 kV – 35.42 kV – 35.42 kV Y-Y-Δ

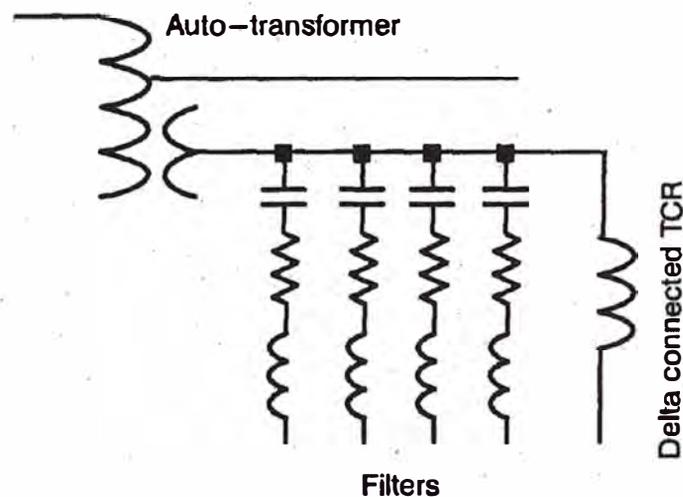
$$X = 2.8\%$$

- Filtro:

$$R = 300\Omega; L = 39 \text{ mH}; C = 1.25 \mu\text{F}$$

- El convertidor entrega 100 MW a 83.3 kV en el lado DC.
- El lado DC es modelado como una fuente de corriente fija de acuerdo al ángulo  $\alpha$  del controlador.

**b) Datos del SVC:**



**Figura 30 : SVC (Compensador variable) de la barra 8**

- Transformador:

230 kV – 115 kV – 13.8 kV auto  $\Delta$  - terciario

SVC y filtros son terciarios

- TCR (en delta)  $I = 48 \text{ mH}$
- SVC proporciona 10 MVAR
- Filtros : ver tabla adjunta

| <b>Armónico</b> | <b>R (<math>\Omega</math>)</b> | <b>L (mH)</b> | <b>C (<math>\mu</math>F)</b> |
|-----------------|--------------------------------|---------------|------------------------------|
| 2               | 1                              | 42            | 42                           |
| 5               | 1                              | 6.7           | 42                           |
| 7               | 1                              | 3.4           | 42                           |
| 11              | 1                              | 1.39          | 42                           |

**Tabla 2 : Tabla de los Filtros del SVC**

**ANEXO B**  
**DETALLES DEL SISTEMA B:**  
**MODIFICACIÓN DEL MODELO IEEE-13-BUS DISTRIBUTION SYSTEM**

Consideraciones generales:

Los círculos representan las barras donde se concentran las cargas, las cuales son consideradas cargas puntuales.

Barra 34: el motor de inducción considerado en esta barra presenta los siguientes datos:

Potencia: 500 HP Trifásico

Factor de Potencia: 0.8

Eficiencia: 90%

Potencia a Rotor Bloqueado: 3000 kVA. Con 0.4 de factor de potencia

Los armónicos de corriente inyectados se detallan en la siguiente tabla:

| Orden Armónico | Tipos de Fuentes Armónicas |          |               |          |              |          |
|----------------|----------------------------|----------|---------------|----------|--------------|----------|
|                | ASD                        |          | Fluorescentes |          | Otras Cargas |          |
|                | Magnitud (%)               | Fase (°) | Magnitud (%)  | Fase (°) | Magnitud (%) | Fase (°) |
| 1              | 100                        | -1.45    | 100           | -107     | 100          | 105.5    |
| 3              | 84.6                       | -8.34    | 19.2          | 76       | 3.6          | -44.4    |
| 5              | 68.3                       | -14.23   | 10.7          | 100      | 3.2          | 139.4    |
| 7              | 47.8                       | -20.13   | 2.1           | 37       |              |          |
| 9              | 27.7                       | -29.02   | 1.4           | 31       |              |          |
| 11             | 0.2                        | -27.91   | 0.9           | 36       |              |          |
| 13             | 6.1                        | 158.2    | 0.6           | 47       |              |          |
| 15             | 4.2                        | 122.3    | 0.5           | 20       |              |          |

**Tabla 3 : Tabla de Magnitudes de Corriente armónica -en porcentaje de la fundamental- y fase – con respecto a la tensión respectivo**

| Barra | Fase A   |   | Fase B   |  | Fase C   |   |
|-------|--|---|--|--|--|---|
|       | kW   | kVAR                                      | kW   | kVAR                                     | kW   | kVAR                                      |
| 34    | <b>42.63</b><br>Motores<br>Pasiva                        | <b>15</b><br>60%<br>40%                   |  |  |  |   |
| 45    |  |   | <b>170.53</b><br>Motores<br>Fluoresc.<br>Pasiva<br>Otras | <b>54</b><br>20%<br>20%<br>40%<br>20%    |  |   |
| 46    |  |   |  |  | <b>230</b><br>Motores<br>Fluoresc.<br>Pasiva<br>Otras    | <b>73</b><br>20%<br>20%<br>40%<br>20%     |
| 52    | <b>127.9</b><br>Motores<br>Fluoresc.<br>Pasiva<br>ASD    | <b>55.79</b><br>20%<br>10%<br>60%<br>10%  |  |  |  |   |
| 71    | <b>383.7</b><br>Motores<br>Fluoresc.<br>Pasiva           | <b>140.95</b><br>20%<br>20%<br>40%        | <b>383.7</b>   | <b>140.95</b><br>20%<br>20%<br>40%       | <b>383.7</b>   | <b>140.95</b><br>20%<br>20%<br>40%        |
| 75    | <b>486.02</b><br>Motores<br>Fluoresc.<br>Pasiva<br>Otras | <b>189.07</b><br>15%<br>15%<br>50%<br>20% | <b>68.21</b>   | <b>60.55</b><br>15%<br>15%<br>50%<br>20% | <b>289.91</b>  | <b>212.65</b><br>15%<br>15%<br>50%<br>20% |
| 92    |  |   |  |  | <b>170.53</b><br>Motores<br>Fluoresc.<br>Pasiva<br>Otras | <b>51.38</b><br>15%<br>15%<br>50%<br>20%  |
| 911   |  |   |  |  | <b>170</b><br>Motores<br>Fluoresc.<br>Pasiva<br>Otras    | <b>45</b><br>15%<br>15%<br>50%<br>20%     |

**Tabla 4 : Tabla de Cargas conectadas en las Barras del sistema B**

**ANEXO C**  
**DETALLES DEL SISTEMA C:**  
**SISTEMA DE DISTRIBUCION TIPICO EN 11 Kv.**

Carga conectada:

$S = 865 \text{ kVA}$ .

Factor potencia = 0.85 en atraso

Capacitor (Corrección de factor de potencia)

$Q = 250 \text{ kVAR}$ .

Carga Electrónica:

ASD(control de velocidad ajustable)

Convertidor de 6 pulsos

Corrientes armónicas producidas: 5°, 7°, 11° y 13° armónica.

Transformador :

$Q = 30 \text{ MVA}$

Se considera una inductancia pura.

Se considera un modelo de una inductancia en serie con una resistencia despreciable

**ANEXO D**  
**COMENTARIOS DE LA NORMA IEEE –519**

### **La Importancia de Entender a los Armónicos, en los sistemas actuales.**

Como se mencionó recientemente, los problemas por distorsión armónica no son nuevos ni para las compañías de distribución eléctrica ni para los sistemas industriales. De hecho, la distorsión fue observada por los operadores de las compañías de distribución a principios de la primera década de este siglo. Típicamente, la distorsión era ocasionada por cargas no lineales conectadas a la red de distribución.

Sin embargo, hoy día son necesarios ciertos métodos para reducir los armónicos, debido a tres razones principales:

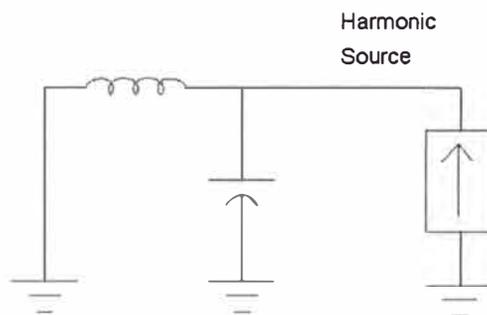
1. La proliferación en el uso de los convertidores estáticos de potencia.
2. Las resonancias de red han aumentado.
3. Las cargas del sistema de potencia son cada vez más sensibles al armónico.

La introducción de convertidores de potencia confiable y eficiente ha ocasionado un aumento elevado en el número de dispositivos generadores de armónicas lo que ha resultado en su dispersión sobre todo el sistema de potencia. El término " convertidor estático de potencia ", como se usa en este texto, se refiere al dispositivo semiconductor que convierte potencia de una frecuencia en potencia de otra frecuencia. Los tipos de convertidores más comunes en la industria son el rectificador, convertidor de potencia AC en DC, y el inversor que convierte de potencia DC a AC.

Además, el problema de los armónicos es agravado frecuentemente por la tendencia actual de instalar condensadores para mejorar el factor de potencia o regular la tensión. Debido a que los capacitores se instalan en paralelo con la inductancia del sistema de potencia, como se muestra en la Figura 31, puede producirse una condición resonante a la frecuencia dada por:

$$f_{resonant} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

Donde L representa la inductancia del sistema de potencia, y la C representa la capacitancia del capacitor instalado.



**Figura 31 : Excitación de un Circuito resonante en Paralelo**

Si una corriente armónica es inyectada (desde un convertidor estático de potencia, por ejemplo) con una frecuencia cercana a la frecuencia resonante, puede entonces circular una alta corriente oscilante, la que podría quemar el fusible de los condensadores y producir tensiones armónicas altos.

Además del aumento en los generadores de armónicas y la resonancia de la red, las cargas y los sistemas eléctricos no se han quedado atrás, y en algunos casos son aun más sensibles a los armónicos. Hay un número de nuevas áreas de interés continuo:

1. Computadoras, la computadora controla herramientas, máquinas, y los diversos tipos de controladores digitales los cuales son especialmente susceptibles al armónico, así como también a otros tipos de interferencia.
2. El armónicos puede ocasionar daños calentando el dieléctico en cables subterráneos.
3. La medición de reactivos puede ser adversamente afectada por los armónicos.
4. Las fallas en bancos de capacitores son frecuentemente ocasionadas por los armónicos.
5. Diseños menos conservadores para máquinas de rotación y transformadores, agravan los problemas de calentamiento ocasionados por los armónicos.
6. Los armónicos puede ser especialmente problemáticos para los sistemas de comunicación.

Los actuales problemas de armónicos pueden tener más consecuencias serias y generalizadas que en el pasado. Los diseñadores y los proyectistas de sistemas deberían ser capaces de reconocer y evitar o mitigar tales problemas.

## Los efectos de los Armónicos

Los efectos de los armónicos se dividen en tres categorías generales:

1. Efectos sobre el sistema de potencia mismo
2. Efectos sobre la carga del consumidor
3. Efectos sobre circuitos de comunicación

En el sistema de potencia, las corrientes armónicas son el problema principal, ocasionando recalentamiento y pérdida de vida útil. Esto refiriéndonos a motores o transformadores. El impacto es peor cuando la resonancia de la red amplifica las corrientes armónicas. Los armónicos pueden también interferir en la operación de relees y mediciones.

Los armónicos pueden ocasionar también errores de disparo a los tiristores en equipos convertidores y en instalaciones SVC, inexactitudes en las mediciones, y falsos disparos en los dispositivos de protección. El desempeño de los equipos de los consumidores, tales como controladores de velocidad de motores y fuentes de alimentación de computadoras, puede ser adversamente afectado por los armónicos. Además, las corrientes armónicas que fluyen sobre las líneas de potencia pueden inducir ruido sobre líneas cercanas de comunicación.

La distorsión armónica de tensión puede ocasionar esfuerzos en el aislamiento de equipos, particularmente en condensadores. Cuando los armónicos deforman el tensión en el banco de condensadores, la tensión pico puede ser lo suficientemente alto como para ocasionar una descarga parcial, o efecto corona, dentro de el dieléctrico del condensador. Esto

puede producir eventualmente un cortocircuito entre bornes y carcasa y hacer fallar al condensador.

Las corrientes armónicas altas también ocasionan el disparo de fusibles en bancos de condensadores. Esto ocasiona la pérdida de una fuente de alimentación reactiva al sistema, lo que puede ocasionar otros problemas.

### **Las Fuentes de Armónicos**

Los armónicos son ocasionados por cargas no lineales conectadas al sistema de potencia. Las cargas no lineales producen corrientes no sinusoidales. Los resistores, inductores, y los condensadores son dispositivos lineales. Cuando se conecta una carga resistiva en el sistema de potencia AC, se obtiene una corriente sinusoidal. Cuando se conecta una carga inductiva, se observan corrientes sinusoidales aunque con fase diferente a la carga resistiva. Hay muchos tipos de cargas no lineales que producen armónicos. La fuente más grande de armónicos son los convertidores. Los convertidores oscilan desde enormes subestaciones inversoras de 1000 MW para líneas HVDC (High Voltage DC) hasta rectificadores de 75 W encontrados en una televisión. Las otras fuentes no lineales de armónicos incluyen dispositivos de arco tales como hornos de arco, impedancia magnetizante de transformadores, y luces fluorescentes.

La corriente armónica ocasionada por las fuentes no lineales puede ocasionar la distorsión armónica en la tensión del sistema, lo que puede ocasionar problemas para otros dispositivos. La Figura 32 muestra mediciones para formas de onda de corriente y espectros armónicas para varias fuentes armónicas comunes.

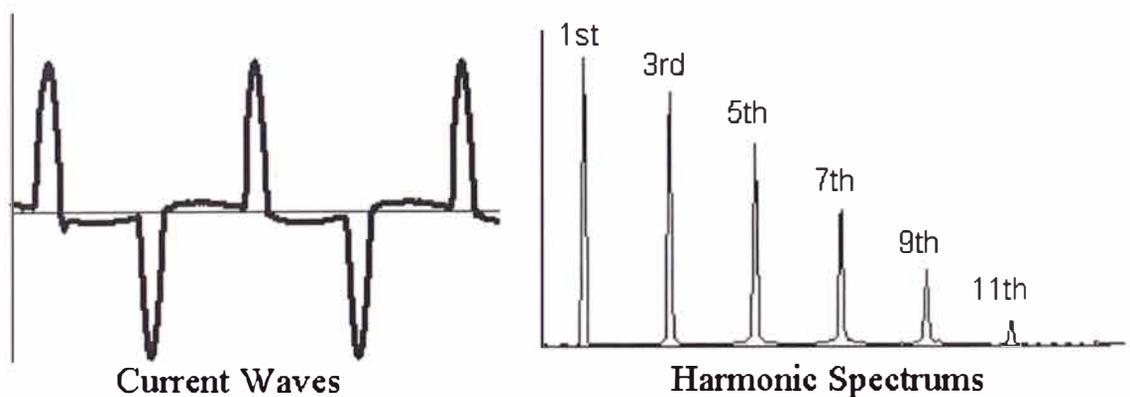
## Los Convertidores Estáticos de Poder

La mayor aplicación de los convertidores estáticos está en los dispositivos variadores de velocidad para el control de motores. Estos dispositivos (drive) estáticos se usan ahora en todos los motores industriales, ofreciendo mayor eficiencia, mejor control de la velocidad, y mayor operación libre de mantenimiento que otros dispositivos convencionales.

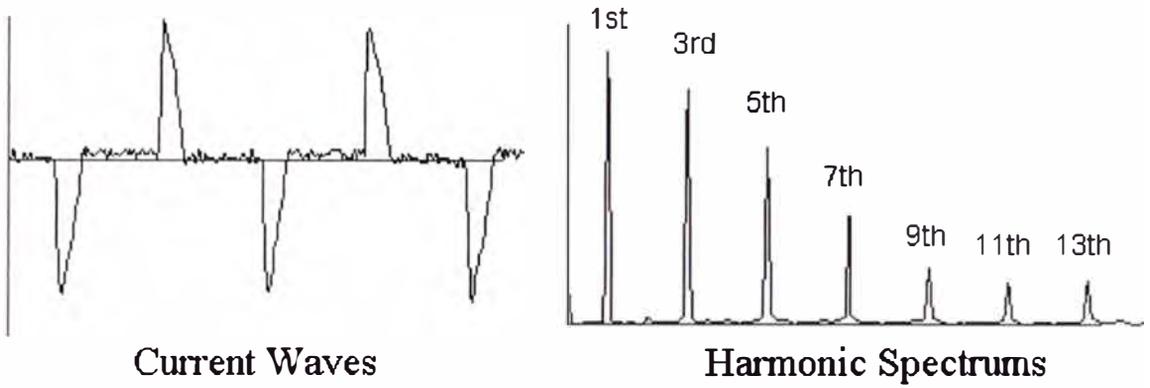
Los convertidores usan dispositivos de "switchero" de estado sólido para convertir la potencia de una frecuencia a otra (comúnmente entre CA y CC).

Estos dispositivos de "switchero" pueden ser diodos, tiristores, GTO, o muchos otros dispositivos de electrónica de potencia.

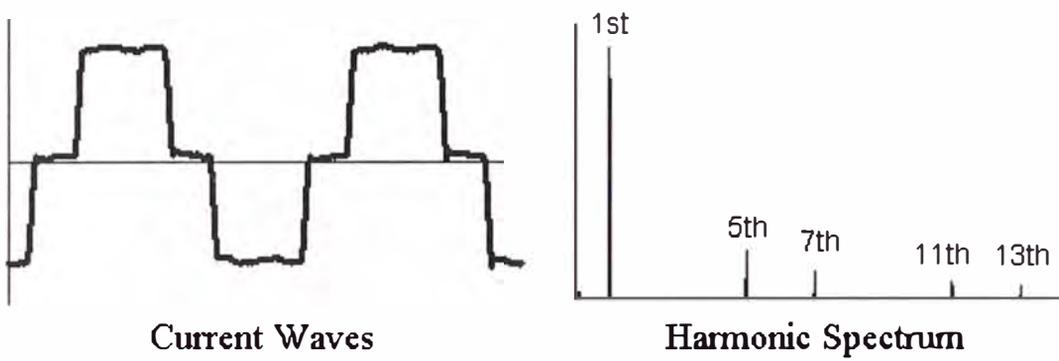
### Computer (switched-mode power supply)



### Fluorescent Light (Electronic Ballast)

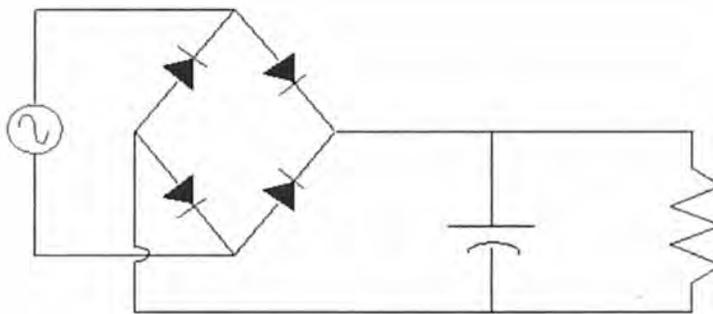


### 6-Pulse Static Drive

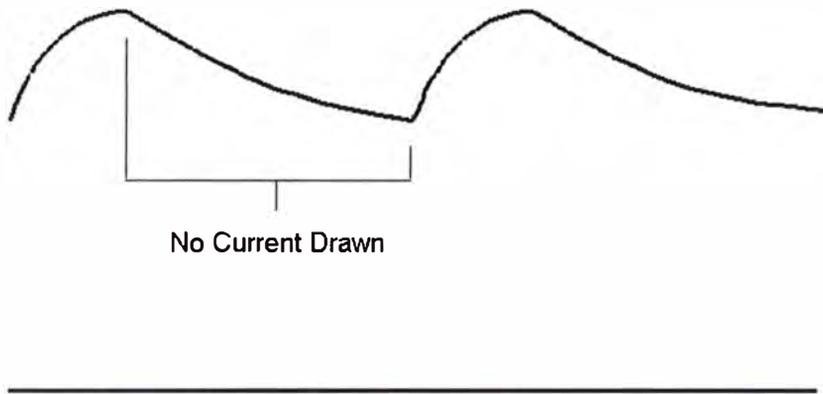


**Figura 32 : Ejemplo de las formas de onda desde varias fuentes comunes.**

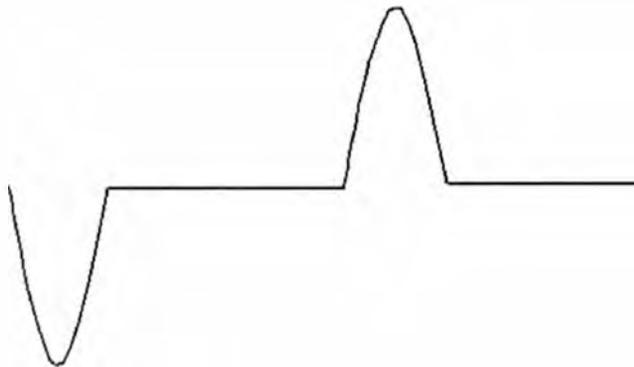
Se muestra la salida de un rectificador monofásico de onda completa, para ilustrar como los dispositivos de "switchero" producen armónicos. Los rectificadores de onda completa son muy comunes en pequeños equipos electrónicos (TVs, computadoras, estéreos, etc). El rectificador monofásico para corriente DC se observa en la Figura 34. Los diodos actúan para cortar la mitad negativa de la onda sinusoidal. El condensador trata de retener la tensión al pico. Dos veces por ciclo, el condensador se carga, y esta es la única vez en que el rectificador dibuja la forma real de la corriente del sistema. Por lo tanto, la corriente de carga se obtiene como la suma de pulsos tal y como se observa en la Figura 35.



**Figura 33 : Rectificador monofásico de onda completa.**



**Figura 34 : Voltaje y Corriente AC a través de la Carga en un rectificador de onda completa.**



**Figura 35 : Corriente AC obtenida de un equipo común.**

## **NORMA IEEE 519**

Los problemas del sistema de potencia asociado con los armónicos comenzaron a ser de interés general en la década de los 70, cuando dos desarrollos independientes tuvieron lugar. El primero era el embargo de petróleo, que condujo a incrementos en la electricidad y al ahorro de la energía. Las compañías de distribución de energía y los consumidores industriales comenzaron a instalar condensadores para el mejoramiento del factor de potencia. Los condensadores reducen la demanda de MVA que exige el sistema eléctrico abasteciendo la porción de reactivos necesarios de forma local (donde se requiere). Como resultado, se reducen las pérdidas eléctricas tanto en la planta industrial como en la red de distribución. Para mejorar el factor de potencia fue necesario incrementar significativamente el número de capacitores conectados en el sistema de potencia. Como una consecuencia, ha habido un aumento igualmente importante en el número de circuitos sintonizados (resonantes) en redes de distribución y plantas.

El segundo desarrollo involucrado fue la llegada de la era tecnológica de los tiristores en bajo voltaje. En los años 60, los tiristores fueron desarrollados para motores en DC y luego durante la década de los 70, utilizados para controlar la velocidad de motores AC. Esto resultó en una proliferación de pequeños convertidores operados independientemente sin técnicas de mitigación de armónicas.

Aún con niveles de corriente de armónicas relativamente bajo, un circuito resonante puede ocasionar severos problemas de distorsión en la tensión e interferencia telefónica. Un circuito resonante paralelo puede

amplificar los niveles de corriente armónica a un punto tal que produzca falla en los equipos. Los circuitos resonantes serie pueden concentrar el flujo de corrientes armónicas en alimentadores o líneas específicas al punto de producir interferencia telefónica de gran magnitud.

El aumento en el uso de convertidores estáticos, tanto en equipos de control industrial como en aplicaciones domésticas, combinado con el aumento en el uso de los condensadores para el mejoramiento del factor de potencia, han creado problemas generalizados. Debido a lo extenso de estos problemas, ha sido necesario desarrollar técnicas y lineamientos para la instalación de equipos y control de armónicos. Este segmento discute esos lineamientos y su importancia en el diseño de sistemas.

Las normas estadounidenses con respecto a los armónicos han sido agrupadas por la IEEE en la norma 519: IEEE Recomendaciones Prácticas y Requerimientos para el Control de armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia. Existe un efecto combinado de todas las cargas no lineales sobre el sistema de distribución la cual tienen una capacidad limitada para absorber corrientes armónicas. Adicionalmente, las compañías de distribución tienen la responsabilidad de proveer alta calidad de abastecimiento en lo que respecta al nivel de la tensión y su forma de onda. IEEE 519 hace referencia no solo al nivel absoluto de armónicos producido por una fuente individual sino también a su magnitud con respecto a la red de abastecimiento.

Se debe tomar en cuenta que la IEEE 519 esta limitada por tratarse de una colección de recomendaciones prácticas que sirven como guía tanto a

consumidores como a distribuidores de energía eléctrica. Donde existan problemas, a causa de la inyección excesiva de corriente armónica o distorsión de la tensión, es obligatorio para el suministrador y el consumidor, resolver estos problemas.

El propósito de la IEEE 519 es el de recomendar límites en la distorsión armónica según dos criterios distintos, específicamente:

1. Existe una limitación sobre la cantidad de corriente armónica que un consumidor puede inyectar en la red de distribución eléctrica.
2. Se establece una limitación en el nivel de voltaje armónico que una compañía de distribución de electricidad puede suministrar al consumidor.

### **Lineamientos para Clientes Individuales**

El límite primario de los clientes individuales es la cantidad de corriente armónica que ellos pueden inyectar en la red de distribución. Los límites de corriente se basan en el tamaño del consumidor con respecto al sistema de distribución. Los clientes más grandes se restringen más que los clientes pequeños. El tamaño relativo de la carga con el respecto a la fuente se define como la relación de cortocircuito (SCR), al punto de acoplamiento común (PCC), que es donde carga del consumidor conecta con otras cargas en el sistema de potencia. El tamaño del consumidor es definido por la corriente total de frecuencia fundamental en la carga,  $I_L$ , que incluye todas las cargas lineales y no lineales. El tamaño del sistema de abastecimiento es

definido por el nivel de la corriente de cortocircuito, ISC, al PCC. Estas dos corrientes definen el SCR:

$$\text{SCR} = \frac{\text{short circuit MVA}}{\text{load MW}} = \frac{I_{SC}}{I_L}$$

Una relación alta significa que la carga es relativamente pequeña y que los límites aplicables no serán tan estrictos como los que corresponden cuando la relación es mas baja. Esto se observa en la tabla 1, donde se recomiendan los niveles máximos de distorsión armónica en función del valor de SCR y el orden de la armónica. La tabla también identifica niveles totales de distorsión armónica. Todos los valores de distorsión de corriente se dan en base a la máxima corriente de carga (demanda). La distorsión total está en términos de la distorsión total de la demanda (TDD) en vez del término más común THD.

La tabla 5 muestra límites de corriente para componentes de armónicas individuales así como también distorsión armónica total. Por ejemplo un consumidor con un SCR entre 50 y 100 tiene un límite recomendado de 12.0% para TDD, mientras que para componentes armónicas impares individuales de ordenes menores a 11, el límite es del 10%. Es importante notar que los componentes individuales de las corrientes armónicas no se suman directamente para que todo el armónico característico no pueda estar a su límite máximo individual sin exceder el TDD.

| <b>Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras Cargas, para tensiones entre 120 - 69,000 volts.</b>     |      |         |         |         |      |      |
|--|------|---------|---------|---------|------|------|
| Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental  |      |         |         |         |      |      |
| ISC/IL   | <11  | 11≤h<17 | 17≤h<23 | 23≤h<35 | 35≤h | TDD  |
| <20*   | 4.0  | 2.0     | 1.5     | 0.6     | 0.3  | 5.0  |
| 20<50  | 7.0  | 3.5     | 2.5     | 1.0     | 0.5  | 8.0  |
| 50<100   | 10.0 | 4.5     | 4.0     | 1.5     | 0.7  | 12.0 |
| 100<1000   | 12.0 | 5.5     | 5.0     | 2.0     | 1.0  | 15.0 |
| >1000  | 15.0 | 7.0     | 6.0     | 2.5     | 1.4  | 20.0 |
| <b>Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras Cargas, para tensiones entre 69,000 - 161,000 volts.</b> |      |         |         |         |      |      |
| Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental  |      |         |         |         |      |      |
| ISC/IL   | <11  | 11≤h<17 | 17≤h<23 | 23≤h<35 | 35≤h | TDD  |
| <20*   | 2.0  | 1.0     | 0.75    | 0.3     | 0.15 | 2.5  |
| 20<50  | 3.5  | 1.75    | 1.25    | 0.5     | 0.25 | 4.0  |
| 50<100   | 5.0  | 2.25    | 2.0     | 0.75    | 0.35 | 6.0  |
| 100<1000   | 6.0  | 2.75    | 2.5     | 1.0     | 0.5  | 7.5  |
| >1000  | 7.5  | 3.5     | 3.0     | 1.25    | 0.7  | 10.0 |
| <b>Límites de Corriente Armónica para Carga no lineal en el Punto Común de acoplamiento con Otras Cargas, para tensiones &gt; 161,000 volts.</b>           |      |         |         |         |      |      |
| Máxima Distorsión Armónica Impar de la Corriente, en % del Armónico fundamental  |      |         |         |         |      |      |
| ISC/IL   | <11  | 11≤h<17 | 17≤h<23 | 23≤h<35 | 35≤h | TDD  |
| <50  | 2.0  | 1.0     | 0.75    | 0.30    | 0.15 | 2.5  |
| 50   | 3.0  | 1.5     | 1.15    | 0.45    | 0.22 | 3.75 |
| Los armónicos pares se limitan al 25% de los límites de los armónicos impares mostrados anteriormente  |      |         |         |         |      |      |
| * Todo equipo de generación se limita a estos valores independientemente del valor de I <sub>sc</sub> /I <sub>l</sub> que presente                         |      |         |         |         |      |      |
| Donde ISC = corriente Máxima de cortocircuito en el punto de acoplamiento común.   |      |         |         |         |      |      |
| IL = Máxima demanda de la corriente de carga (a frecuencia fundamental) en el punto de acoplamiento común.   |      |         |         |         |      |      |
| TDD = Distorsión total de la demanda (RSS) en % de la demanda máxima.  |      |         |         |         |      |      |

**Tabla 5 : IEEE 519 Límites en la Distorsión de la Corriente.**

(Para condiciones con duración superior a una hora. Para períodos más cortos el límite aumenta un 50%)

Es importante notar que la Tabla 5 muestra únicamente los límites para armónicos impares. IEEE 519 da lineamientos para los armónicos pares limitándolos al 25% de los impares, dentro de la misma gama. El armónico par es el resultado de una onda de corriente asimétrica (con forma diferente a la positiva y negativa) que puede contener componentes DC que saturarán los núcleos magnéticos.

Para equipos de generación, IEEE 519 no discrimina en el tamaño. Los límites son más estrictos por el hecho de que los límites de inyección de armónicos son menores que los mostrados en la tabla.

### **El Calentamiento del Transformador**

Los límites de distorsión dados arriba son permitidos con tal que el transformador utilizado por el usuario no se someta a armónicos que sobrepasen el 5% de la corriente nominal del transformador como lo establece ANSI/IEEE C57.12.00 –

### **Flicker de Voltaje**

Los lineamientos para el parpadeo de voltaje ocasionado por consumidores individuales se dan también en IEEE 519. La figura 37 se ofrece una guía para determinar el grado de susceptibilidad del problema.

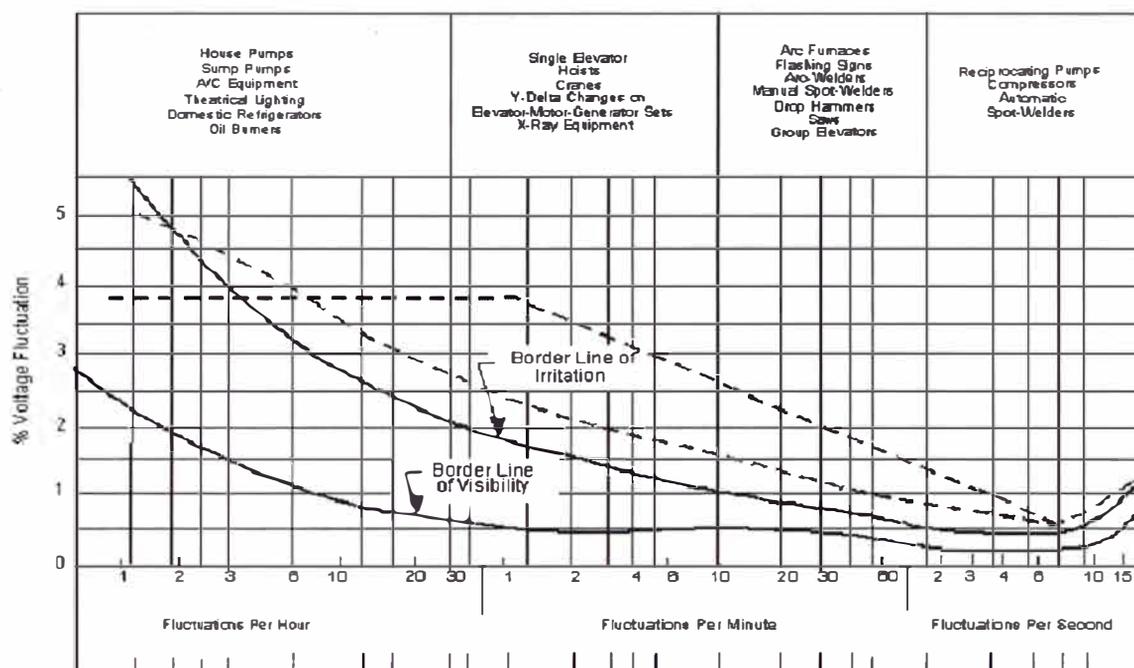
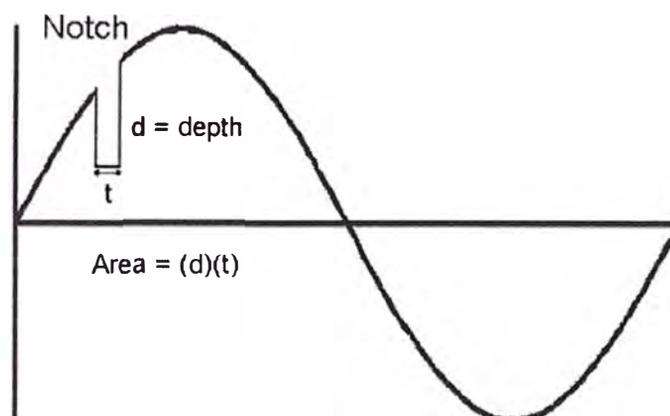


Figura 36 : Curva de Flicker de Voltaje.

### La tensión Mellado

Muchos convertidores estáticos hacen mordeduras grandes o mellan la tensión (Figuran 31). Los lineamientos se dan según el cliente y la profundidad de la muesca, la THD de voltaje y el área de la muesca (Tabla 6). Este es aplicable en el PCC para sistemas de bajo de voltaje.



**Figura 37 : La tensión Mellado**

|  | Aplicación Especial | Sistema General | Sistema Dedicado |
|--|---------------------|-----------------|------------------|
| Profundidad de la muesca                   | 10%                 | 20%             | 50%              |
| THD (Voltage)                              | 3%                  | 5%              | 10%              |
| Área de la muesca*                         | 16,400              | 22,800          | 36,500           |
| * en volt-microsegundos a valores de V & I |                     |                 |                  |

**Tabla 6 : Sistema de bajo Voltaje clasificación y límites de Distorsión.**

### **Los lineamientos para las compañías de electricidad.**

El segundo conjunto de criterios establecido por IEEE 519 se refiere a los límites de distorsión de la tensión. Estos rigen la cantidad de distorsión aceptable en la tensión que entrega la compañía de electricidad en el PCC de un consumidor. Los límites armónicos de voltaje recomendados se basan en niveles lo suficientemente pequeños como para garantizar que el equipo de los suscriptores opere satisfactoriamente. La Tabla 3 enumera los límites de distorsión armónica de voltaje según IEEE 519.

| Voltaje de barra en el punto de acoplamiento común   | Distorsión individual de Voltaje (%) | Distorsión total de la tensión THD (%) |
|--|--------------------------------------|--|
| Hasta 69 KV  | 3.0                                  | 5.0                                    |
| De 69 KV a 137.9 KV  | 1.5                                  | 2.5                                    |
| 138 KV y mas   | 1.0                                  | 1.5                                    |
| Nota: Los sistemas de alto voltaje pueden llegar hasta un 2.0% en THD cuando lo que causa es un alto voltaje terminal DC, el cual podría ser atenuado. |                                      |  |

**Tabla 7 : Límites de distorsión de Voltaje según IEEE 519**

**(Para condiciones con más de una hora de duración. Períodos más cortos aumentan su límite en un 50%)**

Como es común, los límites se imponen sobre componentes individuales y sobre la distorsión total para la combinación de todas las tensiones armónicas (THD). Lo diferente en esta tabla, sin embargo, es que se muestran tres límites diferentes. Ellos representan tres clases de voltaje; hasta 69 KV, de 69 a 161 KV, y por encima de 161 KV. Observe que los límites disminuyen cuando la tensión aumenta, al igual que para los límites de corrientes.

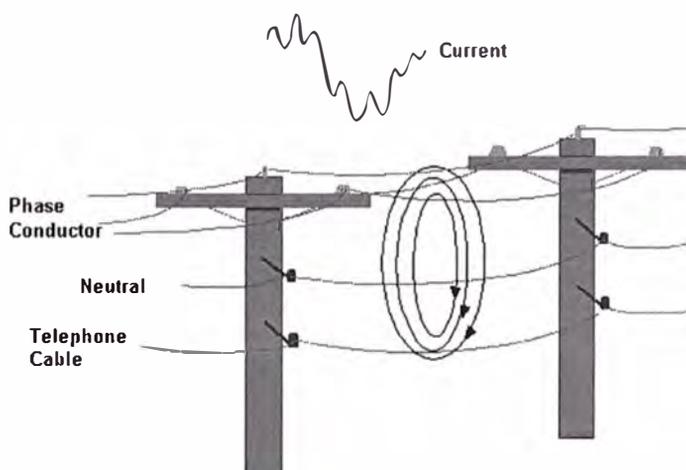
Nuevamente los límites armónicos impares son los únicos que se muestran en la tabla. La generación de armónicos pares se restringe más debido a que la resultante DC puede ocasionar saturación en motores y transformadores. La corriente de secuencia negativa puede ocasionar calentamiento en generadores. Los armónicos pares individuales se limitan a un 25% de los límites armónicas impares, al igual que sucede con las corrientes.

Es muy común que los alimentadores de las compañías de electricidad alimenten a más de un consumidor. Los límites de distorsión de voltaje

mostrados en la tabla no deberían excederse mientras todos los consumidores conectados no superen los límites de inyección de corriente. Cualquier consumidor que degrade la tensión en el PCC deberá corregir el problema. Sin embargo, el problema de distorsión de voltaje es uno para la comunidad entera de consumidores y la utilidad. Los consumidores muy grandes pueden buscar un compromiso con la compañía de distribución sobre la resolución de un problema específico, y ambos pueden contribuir a su solución.

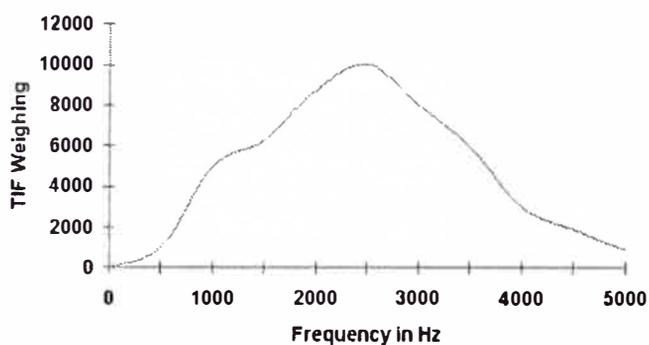
### Interferencia Telefónica

El ruido de teléfono originado por tensiones y corrientes armónicas de los sistemas de potencia se denomina generalmente Factor de Influencia Telefónica (TIF). El sistema reconoce que el ruido inducido por las corrientes o tensiones armónicas tiene un efecto subjetivo sobre el usuario del teléfono. Esto se debe a que el oído humano es más susceptible a algunas frecuencias que los otros.



**Figura 38 : Campos magnéticos ocasionando tensiones inducidos en circuitos telefónicos**

La figura 32 muestra los factores TIF según IEEE 519. El TIF en la curva es una medida de la sensibilidad del sistema telefónico y el oído humano al ruido a diversas frecuencias discretas.



**Figura 39 : Factor de influencia telefónica típica (TIF) influencia vs. Frecuencia**

El factor TIF de 60 SS está cercano a cero, indicando que los circuitos telefónicos y el oído son insensibles a esa frecuencia. Aún para los armónicos más comunes, tales como el 5th o el 7th, el factor TIF es todavía despreciable. El TIF tiene su peso máximo sobre los 2600 SS, con valores de 10,600 a esta frecuencia.

IEEE 519 da directivas para tres de niveles de probabilidad de interferencia como muestra en la Mesa 4. Este se aplican cuando que un circuito de teléfono tenga exposición considerable a los conductores de poder.

**Los límites de duración.**

Los límites de distorsión especificados por IEEE 519 están para condiciones "normales" que duran períodos mayores de hora. Para períodos más cortos, durante arranques o condiciones inusitadas, los límites pueden ser excedidos hasta un 50%. Algún equipo, tal como una fuente de alimentación estática puede ser sensible a la distorsión armónica de corta duración, pero la mayoría de los efectos armónicos tales como interferencias de telefónicas, en transformadores y el calentamiento de motores, son exclusivos de los armónicos de larga duración o repetitivos.

**Las Directivas de Fabricante**

IEEE 519 no contiene ninguna directiva para la tensión en un cliente a la salida o en barra de voltaje. IEEE 519 únicamente aplica a la conexión entre un cliente y la utilidad. La distorsión armónica puede ser más grande aguas abajo del PCC. Por lo tanto, el fabricante no tiene ningunos lineamientos reales con respecto a la distorsión armónica máxima en la tensión a la que un equipo puede someterse.

## BIBLIOGRAFIA

- [ 1 ] S. Mark Halpin, Paulo F. Ribeiro and J.J. Dair: "Frequency-Domain Harmonic Analysis Methods"
- [ 2 ] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks. Part I: Concepts, Models and Simulation Techniques" IEEE Transactions on Power Delivery , Vol. 11, N° 1, January 1996.
- [ 3 ] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks. Part II: Sample Systems and Examples" IEEE Transactions on Power Delivery , Vol. 11, N° 1, January 1996.
- [ 4 ] W. Xu, J. Marti and H. W. Dommel : "A Multiphase Harmonic Load Flow Solution Technique" IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PS-6, Feb. 1991, pp. 174-182.
- [ 5 ] Kersting W. H. and Willis L.: "Radial Distribution Test Systems" IEEE Distribution Planning Working Group Report, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 6, N° 3 Aug. 1991, pp. 975-985.

- [ 6 ] IEEE Std 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", IEE, New York, 1993
- [ 7 ] "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems" IEEE Standard 519-1993, IEEE, New York, 1993.
- [ 8 ] Paulo F. Ribeiro: "Distribution System and other Elements Modeling"
- [ 9 ] Arrillaga, J. Smith, B.C., Watson, N. R. Watson, A. R. "Power System Harmonic Analysis,, John Wiley & Sons, New Yo