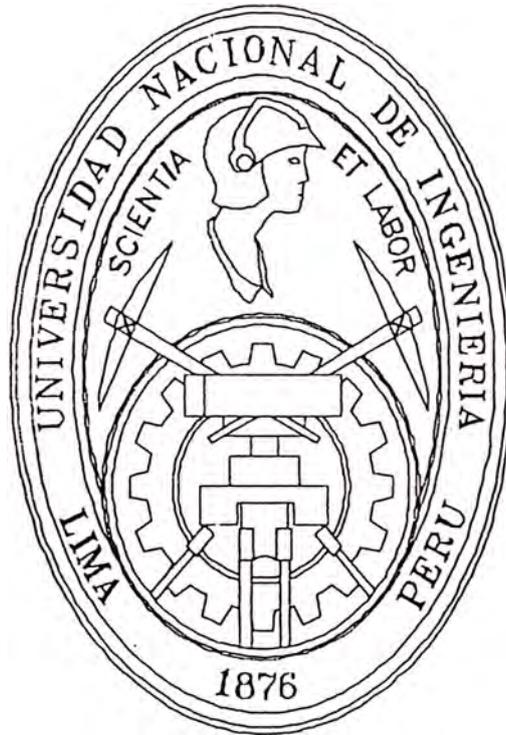


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE  
ARMÓNICAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE  
POTENCIA  
PARTE II**

**TESIS**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO ELECTRICISTA**

**BORIS BERMÚDEZ SOMOCURCIO**

**LIMA-PERU  
2001**

Dedicado a nuestros padres, por su constante e incondicional apoyo durante nuestra formación profesional.

... Gracias Raúl por las valiosas sugerencias.

**MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE  
ARMÓNICAS EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE  
POTENCIA  
PARTE II**

## SUMARIO

El creciente aumento de la utilización de dispositivos de electrónica de potencia en las redes eléctricas, hace que el tener formas de onda perfectamente sinusoidales en corrientes y tensiones, sea en la práctica una situación poco mas que teórica. Ello lleva a la necesidad de estudiar los sistemas de potencia bajo situaciones de corrientes y tensiones no sinusoidales que crecientemente son mas frecuentes en el ámbito industrial y de energía.

El estudio de los sistemas eléctricos bajo estas condiciones requiere la utilización de diversas herramientas de modelamiento, ya sea en dominio del tiempo o de la frecuencia conjuntamente con técnicas de solución de redes apropiadas. Una de las técnicas que combina la simplicidad del cálculo y la capacidad de analizar sistemas complejos es la técnica de inyección de corrientes armónicas, la cual aplicada en un sistema modelado en dominio de la frecuencia utilizando coordenadas de fase permite la representación mas precisa del comportamiento de los sistemas trifásicos. Esta técnica, su implementación computacional y aplicación, tratados en el presente trabajo.

## INDICE

	Página
<b>PROLOGO</b>	1
<b>CAPITULO I</b>	3
<b>FLUJO DE CORRIENTES ARMONICAS POR TECNICA DE INYECCION DE CORRIENTES</b>	
1.1 Matriz admitancia e impedancia nodal del sistema	4
1.2 Característica de respuesta en frecuencia del sistema	13
1.2.1 Característica de la magnitud de impedancia vs. Frecuencia	13
1.2.2 Característica ángulo de la impedancia vs. Frecuencia	14
1.2.3 Característica de la impedancia en el plano complejo en función de la frecuencia	15
1.3 Circuitos resonantes	16
1.3.1 Resonancia serie	17
1.3.2 Resonancia paralelo	18
1.4 Frecuencia natural de resonancia en el sistema	20
1.5 Técnica de inyección de corrientes	21
1.5.1 Espectro de tensiones armónicas	22
1.5.2 Flujo de corrientes armónicas	25

1.5.3	Flujo de potencia armónica	26
1.6	Indices de distorsión armónica	26
1.6.1	Distorsión total armónica (THD)	26
1.6.2	Distorsión armónica individual	27
1.6.3	Factor "K"	27
<b>CAPITULO II</b>		<b>29</b>
<b>ASPECTOS DE PROGRAMACION</b>		
2.1	Datos requeridos para la construcción de modelos de los componentes del sistema en estudio	30
2.1.1	Definición de barras	30
2.1.2	Definición de componentes del sistema y fuentes armónicas	31
2.2	Representación completa del sistema en memoria del computador según la programación orientada a objetos	31
2.3	Determinación de la matriz de admitancia e impedancia	38
2.3.1	Formación de la matriz de admitancia	38
2.3.2	Bifactorización de la matriz admitancia	39
2.3.3	Obtención de los elementos de la matriz impedancia	40
<b>CAPITULO III</b>		<b>42</b>
<b>APLICACIÓN PRACTICA A SISTEMAS DE PRUEBA IEEE</b>		
3.1	Análisis del sistema de 2 barras IEEE	42
3.1.1	Descripción del sistema	43
3.1.2	Preparación de datos	44

3.1.3	Análisis de impedancia en barras	47
3.1.4	Espectro de tensiones armónicas en barras	56
3.1.5	Flujo de corrientes armónicas	59
3.1.6	Influencia de los bancos de condensadores en la respuesta en frecuencia del sistema	61
3.2	Análisis del sistema de 13 barras IEEE	64
3.2.1	Descripción del sistema	64
3.2.2	Análisis de impedancia en barras	66
3.2.3	Espectro de tensiones en barras	70
3.2.4	Flujo de corrientes	72
3.3	Análisis con múltiples fuentes armónicas	74
<b>CAPITULO IV</b>		81
<b>CONCLUSIONES GENERALES</b>		
<b>REFERENCIAS</b>		84
<b>ANEXO A</b>		
Referencia de comandos		
<b>ANEXO B</b>		
Definición del sistema de prueba de 2 barras		
<b>ANEXO C</b>		
Definición del sistema de prueba de 13 barras		
<b>ANEXO D</b>		
Definición del sistema de prueba de 2 barras con 2 convertidores		

**ANEXO E**

*Harmonic calculations on a two bus system IEEE*

**ANEXO F**

*13 Bus balanced industrial distribution system IEEE*

**ANEXO G**

Guía de tareas comunes para análisis con HNET

## PROLOGO

El objetivo de la presente investigación constituye el desarrollo de un programa computacional de simulación para la predicción y análisis de los posibles problemas causados por la propagación de corrientes armónicas en un sistema eléctrico de potencia.

La simulación por ordenador es considerada actualmente la mejor herramienta de análisis de las redes eléctricas [12].

El presente trabajo comprende la implementación práctica de los conceptos desarrollados en la primera parte del presente trabajo: "Modelamiento y Simulación de armónicas en sistemas de potencia - Parte I" en el cual se han desarrollado las ideas básicas necesarias para el análisis de la penetración de armónicas en dominio de la frecuencia en régimen permanente sinusoidal y se presenta además la filosofía de simulación adoptada, Las técnicas de transformación lineal y coordenadas de fase aplicadas para la obtención de la matriz admitancia nodal multifase de los componentes del sistema y sus interconexiones.

Se utilizarán los modelos propuestos del sistema dependientes de la frecuencia y sus respectivas formulaciones multifase empleando el concepto de sub sistemas.

En el primer capítulo del presente trabajo se describe el procedimiento de construcción de la matriz admitancia nodal multifase del sistema a partir de los datos de los sub sistemas componentes y la posterior obtención de la matriz impedancia nodal del sistema, cuyos elementos determinan la respuesta natural en frecuencia del sistema, permitiendo la identificación de las frecuencias de resonancia. Asimismo se muestra la aplicación de la técnica de inyección de corrientes para evaluar los flujos de las corrientes armónicas en los sub sistemas de la red, se detalla además, el cálculo de índices que evalúan la distorsión armónica de tensión y corriente sobre el sistema de potencia.

Los aspectos principales de programación e ingreso de datos son explicados en el capítulo dos.

Para validar la metodología propuesta y resultados obtenidos, en el capítulo tres se presenta la aplicación del programa en dos sistemas estándar de prueba: *2 - Bus and 13 - Bus Balanced Industrial Distribution System* del IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) específico para análisis de armónicas.

En el capítulo cuatro, se señalan las conclusiones finales.

# CAPITULO I

## FLUJO DE CORRIENTES ARMONICAS POR TECNICA DE INYECCION DE CORRIENTES

En general, el estudio de un sistema de potencia es llevado a cabo sobre la base del conocimiento de los elementos de la matriz admitancia nodal y matriz impedancia de operación del sistema, lo cual permite obtener gran cantidad de información, lográndose de este modo el análisis detallado del sistema [6].

Al presente, el objetivo de los procesos de simulación en computadoras son la optimización de los algoritmos numéricos empleados en la solución del sistema matricial de ecuaciones, estos algoritmos son seleccionados principalmente según el procedimiento de almacenamiento de datos, verificación de errores de entrada y salida, procedimientos de solución, respuesta que se desee obtener y según la topología del sistema en estudio, entre otros. Así, entre los procesos de solución que resuelven el sistema matricial a partir de la matriz admitancia nodal o impedancia del sistema, que incluyen procesos de construcción directa de la matriz impedancia de operación o inversión de la matriz admitancia nodal del sistema, se tienen: Eliminación Gaussiana con sustitución regresiva, la Reducción de Kron, la descomposición LU, la Bifactorización, la Inversión de Shipley – Coleman,

entre otros [21]. El presente estudio considera el empleo de los procesos de Reducción de Kron y Bifactorización.

### 1.1 Matriz admitancia e impedancia nodal del sistema

La matriz admitancia nodal de un sistema lineal de potencia relaciona por medio de la ley de Ohm un vector de tensión nodal que es el resultado de la inyección de un vector de corrientes a todos los nodos del sistema, la ecuación matricial para un sistema de "N" nodos, respecto al nodo de referencia tierra, toma la siguiente estructura:

$$[I_{SIS}] = [Y_{SIS}] \cdot [V_{SIS}] \quad (1.1)$$

La técnica de transformación lineal combinada con la ley de corrientes de Kirchhoff es empleada para la construcción de la matriz, permitiendo su fácil formulación. La matriz del sistema considera muchas fases (matriz multifásica) y es construida a partir de las matrices multifásicas de admitancia nodal de todos los sub sistemas componentes, es decir, cada elemento de la matriz admitancia nodal del sistema es también una matriz multifásica de orden menor. Para propósitos de nuestro estudio cada elemento matricial es expresado en función de la frecuencia, de esta manera se evalúa el comportamiento de los elementos de la matriz frente a las inyecciones armónicas. Se siguen las siguientes reglas para la construcción de la matriz admitancia nodal del sistema [12]:

1. Cada elemento de una matriz admitancia nodal del sistema, es una cantidad matricial de orden 3x3, en ella se distinguen los elementos matriz

admitancia multifásica propia del nodo "i" ( $i = j$ ) y matriz admitancia multifásica de transferencia entre los nodos "i" y "j" ( $i \neq j$ ).

2. La matriz admitancia multifásica propia de cualquier nodo del sistema es la suma de todas las admitancias multifásicas propias de los sub sistemas conectados a ese nodo.
3. La admitancia multifásica de transferencia entre dos nodos es la suma algebraica de las admitancias multifásicas de transferencia de todos los sub sistemas conectados entre esos dos nodos.
4. Todas las admitancias multifásicas de los sub sistemas deben contener el mismo número de elementos mutuamente acoplados, es decir, se debe asegurar que todas las cantidades matriciales sean del mismo orden para que las multiplicaciones matriciales sean ejecutables, además, los elementos desacoplados de los sub sistemas son considerados como unidades con acoplamiento cero para mantener las dimensiones correctas de todas las matrices.

Para propósitos de identificación de los elementos de la matriz admitancia nodal, se muestra su estructura:

$$[Y_{SIS}] = \begin{bmatrix} [Y_{11}] & \dots & \dots & [Y_{1i}] & [Y_{1j}] & \dots & \dots & [Y_{1N}] \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ [Y_{i1}] & \dots & \dots & [Y_{ii}] & [Y_{ij}] & \dots & \dots & [Y_{iN}] \\ [Y_{j1}] & \dots & \dots & [Y_{ji}] & [Y_{jj}] & \dots & \dots & [Y_{jN}] \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ [Y_{N1}] & \dots & \dots & [Y_{Ni}] & [Y_{Nj}] & \dots & \dots & [Y_{NN}] \end{bmatrix} \quad (1.2)$$

En el presente estudio se considera el caso de inyección de fuentes de corriente armónica, consideradas independientes de las fuentes de tensión a frecuencia fundamental, la matriz de admitancia del sistema permite obtener las tensiones armónicas en todos los nodos del sistema. Para el caso de existencia de fuentes de tensión armónica, el uso de circuitos equivalente Norton permite incluirlas como fuentes de corriente, considerando la impedancia Norton asociada de la fuente como propia de la red localizada en el nodo donde se ubica la fuente.

Se observa que la estructura de la matriz admitancia nodal del sistema tiene la propiedad de ser muy dispersa, a razón de que son pocos los sub sistemas entre nodos lejanos, así mismo, la matriz es de naturaleza simétrica por la característica bilateral de la red, asimismo es de notar que la posición de los elementos no nulos en la matriz admitancia es siempre diferente de cero para todas las frecuencias, mientras que la ubicación de los elementos nulos son siempre ceros.

Como un ejemplo, se muestra el procedimiento de obtención de la matriz admitancia nodal para el siguiente sistema trifásico equilibrado, el esquema representa inicialmente un circuito unifilar [23].

Adicionalmente se considera:

- El punto neutro de la conexión en estrella del transformador Dyn5 se encuentra conectado a tierra directamente.
- La línea de distribución es corta y trifásica de 4 hilos.

Empleando la definición de sub sistemas, la representación del sistema ejemplo en coordenadas de fase en forma multifásica es la siguiente:

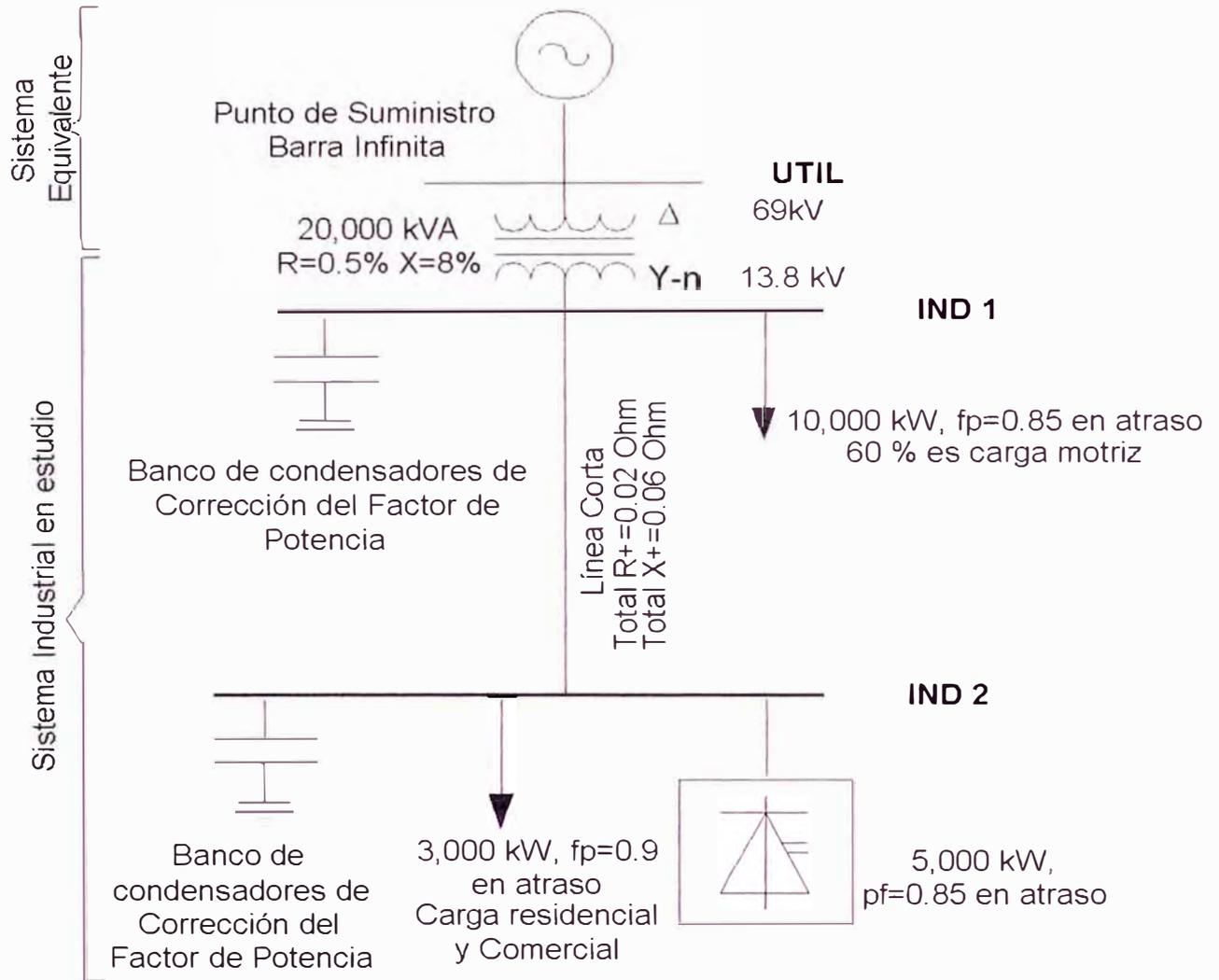


Fig. 1.1. Diagrama unifilar del sistema en estudio.

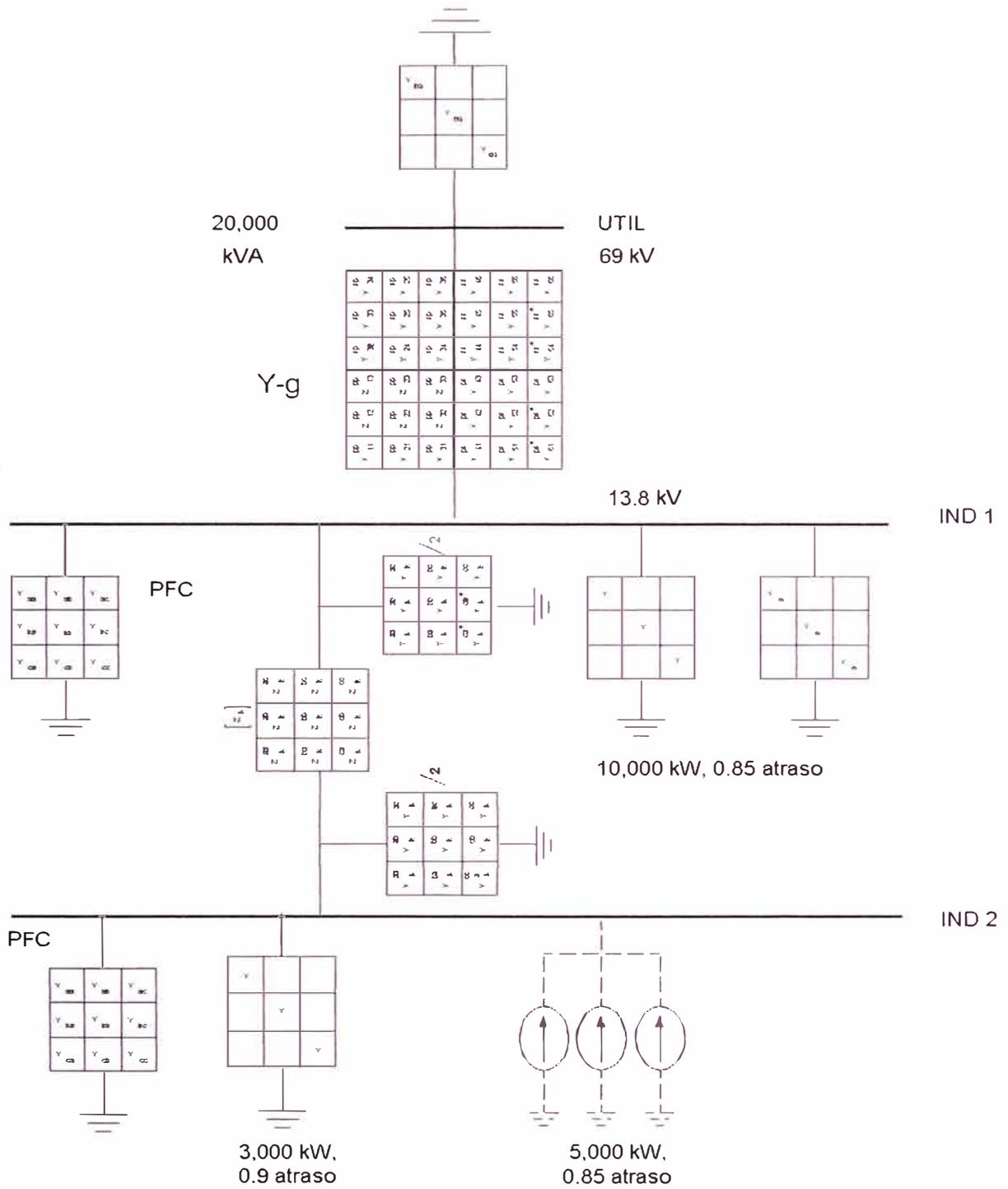


Fig. 1.2. Representación de sub sistemas del sistema en estudio.

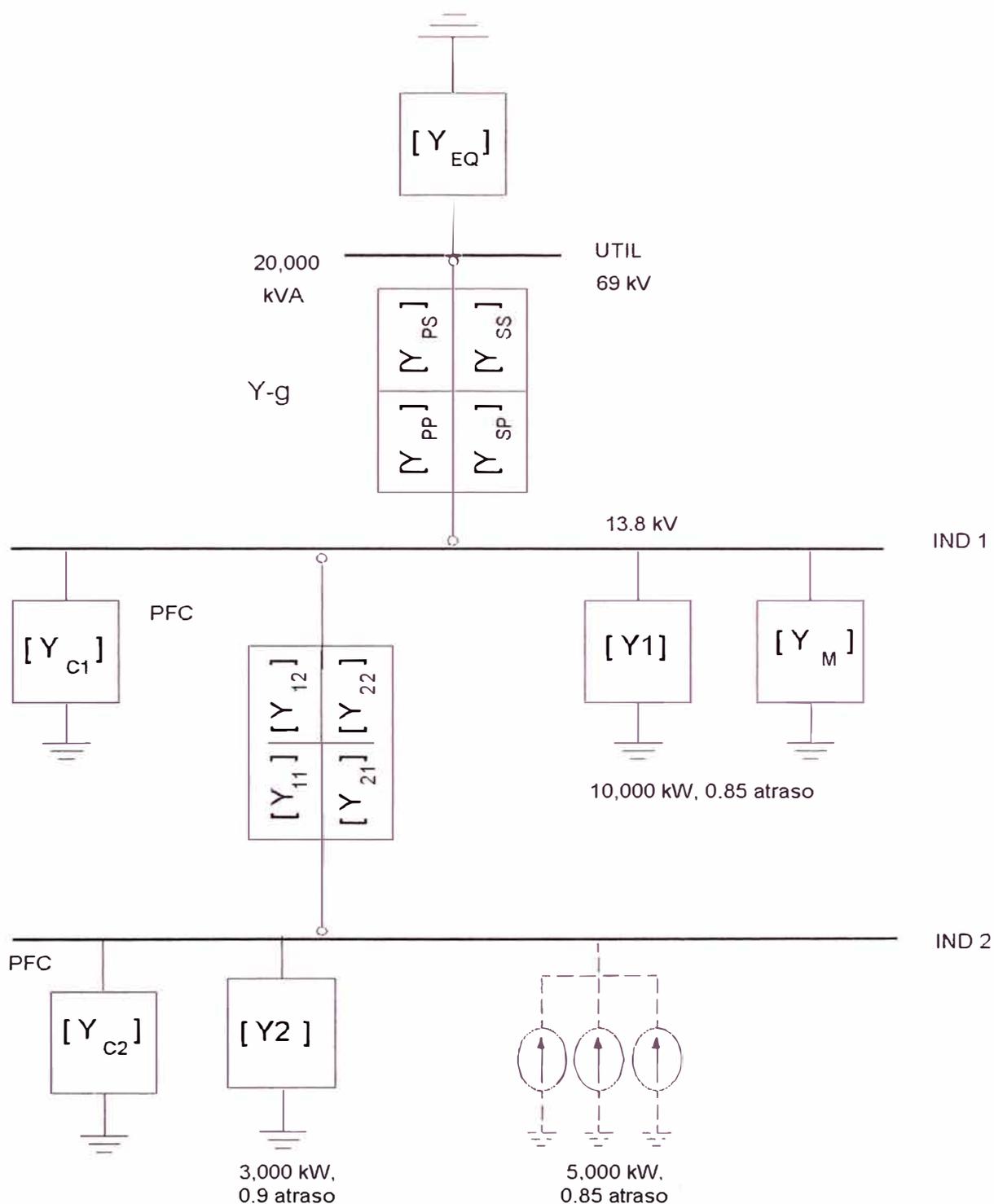


Fig. 1.3. Representación matricial del sistema en estudio.

La matriz admitancia nodal del sistema en estudio es de orden  $9 \times 9$ , pues existen 3 barras IND 1, IND 2 y UTIL, es decir, existen 9 elementos matriciales de orden  $3 \times 3$  cada uno.

Según las reglas de construcción de la matriz admitancia nodal, se indica la expresión de la matriz admitancia multifásica del sistema:

$$[Y_{SIS}] = \begin{bmatrix} [Y_{EQ}] + [Y_{PP}] & [Y_{SP}] \\ [Y_{PS}] & [Y_{SS}] + [Y_{C1}] + [Y_1] + [Y_M] + [Y_{11}] \\ & [Y_{12}] & [Y_{21}] \\ & & [Y_{C2}] + [Y_2] + [Y_{22}] \end{bmatrix} \quad (1.3)$$

La expresión del elemento matriz admitancia multifásica propia correspondiente al nodo IND2 es:

$$[Y_{SS}] + [Y_{C1}] + [Y_1] + [Y_M] + [Y_{11}] \quad (1.4)$$

Asimismo la expresión del elemento matriz admitancia multifásica de transferencia entre los nodos IND1 e IND2 es:

$$[Y_{21}] \quad (1.5)$$

El algoritmo de bifactorización permite encontrar la matriz impedancia del sistema vía inversión de la matriz admitancia nodal del sistema, la matriz admitancia nodal de un sistema puede poseer cientos de filas y columnas, es decir, cada nodo de la red en estudio contribuye con tres filas y tres columnas a la matriz admitancia nodal del sistema. El algoritmo de bifactorización combinado con técnicas para procesamiento de matrices dispersas es empleado para minimizar los requerimientos de almacenamiento de los elementos de la matriz y tiempos de solución en computadora.

$$[V_{SIS}] = [Y_{SIS}]^{-1} \cdot [I_{SIS}] = [Z_{SIS}] \cdot [I_{SIS}] \quad (1.6)$$

Análogamente se identifican los elementos de la matriz impedancia nodal del sistema resultante de la inversión, según la siguiente estructura:

$$[Z_{SIS}] = \begin{bmatrix} [Z_{11}] & \dots & \dots & [Z_{1i}] & [Z_{1j}] & \dots & \dots & [Z_{1N}] \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ [Z_{i1}] & \dots & \dots & [Z_{ii}] & [Z_{ij}] & \dots & \dots & [Z_{iN}] \\ [Z_{j1}] & \dots & \dots & [Z_{ji}] & [Z_{jj}] & \dots & \dots & [Z_{jN}] \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ [Z_{N1}] & \dots & \dots & [Z_{Ni}] & [Z_{Nj}] & \dots & \dots & [Z_{NN}] \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

El significado físico de la matriz Impedancia puede ser visto examinando las ecuaciones siguientes:

El vector  $[V_{SIS}] = [Y_{SIS}^{-1}] \cdot [I_{SIS}] = [Z_{SIS}] \cdot [I_{SIS}]$ , tiene por elementos

$$[V_j] = \sum_{j=1}^N [z_{jk}] \cdot [I_j] \quad (1.8)$$

Donde se puede observar:

$$[z_{j,k}] = \left. \frac{[V_j]}{[I_k]} \right|_{I_m=0 \forall m \neq k \wedge m \in [1,N]} \quad (1.9)$$

En la ecc. (1.8)  $[Z_{JK}]$  es la relación entre la tensión  $V_j$  que se establece en la barra "j" y la corriente inyectada  $I_k$  en la barra "k" cuando no existe inyección de corriente en las demás barras, esto representa la impedancia de transferencia entre las barras "j" y "k". En el caso particular de "k = j", esta relación  $[Z_{JJ}]$  es la impedancia propia o Thevenin vista desde la barra "j".

Los elementos impedancia  $[Z_{JK}]$  de la matriz  $[Z_{SIS}]$  coinciden numéricamente con los elementos del vector tensión  $[V_j]$  en la barra "j", cuando el elemento del vector de corrientes inyectado al sistema en la barra

“k” es unitario y los demás son nulos.

$$\begin{bmatrix} [V_1] \\ \vdots \\ [V_i] \\ [V_j] \\ \vdots \\ [V_N] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{11}] & \dots & \dots & [Z_{1i}] & [Z_{1j}] & \dots & \dots & [Z_{1N}] \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ [Z_{i1}] & \dots & \dots & [Z_{ii}] & [Z_{ij}] & \dots & \dots & [Z_{iN}] \\ [Z_{j1}] & \dots & \dots & [Z_{ji}] & [Z_{jj}] & \dots & \dots & [Z_{jN}] \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ [Z_{N1}] & \dots & \dots & [Z_{Ni}] & [Z_{Nj}] & \dots & \dots & [Z_{NN}] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

$$\begin{bmatrix} [V_1] \\ \vdots \\ [V_i] \\ [V_j] \\ \vdots \\ [V_N] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [Z_{1j}] \\ \vdots \\ [Z_{ij}] \\ [Z_{jj}] \\ \vdots \\ [Z_{Nj}] \end{bmatrix} \quad (1.11)$$

Como se observa en la ecc. (1.10) La inyección de corriente en la única barra “k”, originará potencial en todos los nodos de la red respecto al de referencia. Por esta razón la matriz  $[Z_{\text{SIS}}]$  tiende a estar llena, con la ventaja de ser simétrica por la naturaleza bilateral de la red [21], Ver fig. 1.4:

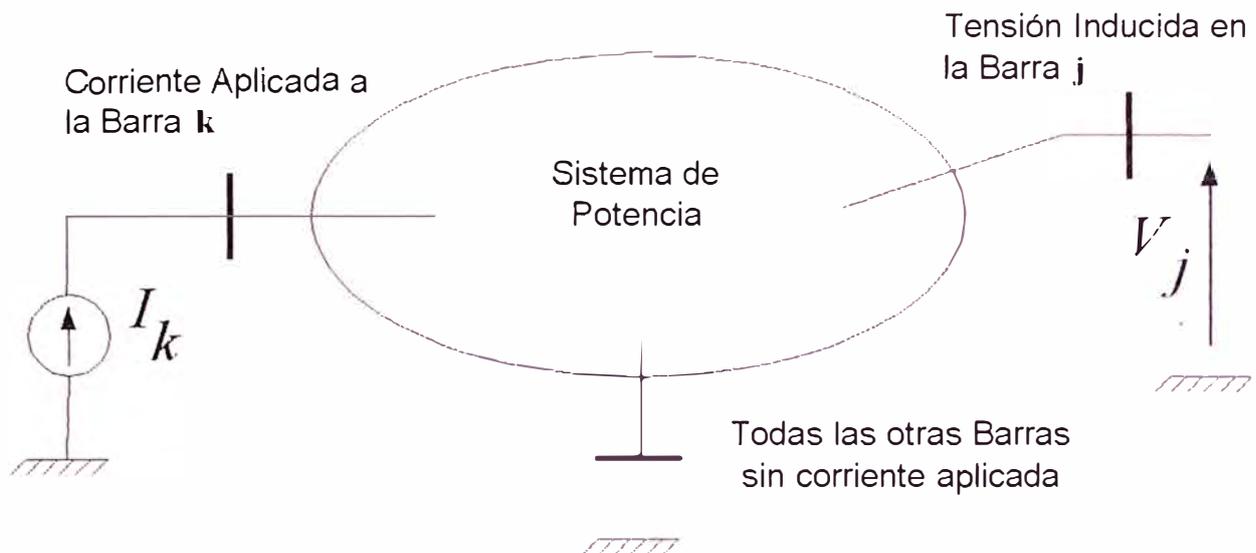


Fig. 1.4. Significado del término  $[z_{jk}]$  de la matriz de Impedancia.

## 1.2 Característica de respuesta en frecuencia del sistema

La matriz impedancia nodal, es rica en información cuantitativa, la intersección entre los elementos de la diagonal principal con cada fila "i" de ella, constituyen las impedancias Thevenin multifásicas equivalentes de los nodos de la red la que se define como la relación entre la tensión en un nodo cualquiera que resaltaría de una corriente inyectada en ese mismo nodo. (*driving point impedance*). los elementos fuera de la diagonal principal constituyen las impedancias multifásicas de transferencia entre nodos, es decir la relación entre la tensión existente en un nodo "k" debido a una corriente inyectada en otro nodo "j" (*transfer impedance*). [6]

### 1.2.1 Característica de la magnitud de impedancia vs. frecuencia

La gráfica del módulo de los elementos de la matriz impedancia del sistema respecto a la frecuencia u orden armónico "h", permite obtener la característica de respuesta en frecuencia del sistema, identificándose

fácilmente así los puntos de máximas y mínimas impedancias y las frecuencias a las cuales ocurren.

Un gráfico típico de la característica de respuesta en frecuencia para la fase "a" de un determinado nodo o barra se muestra a continuación:

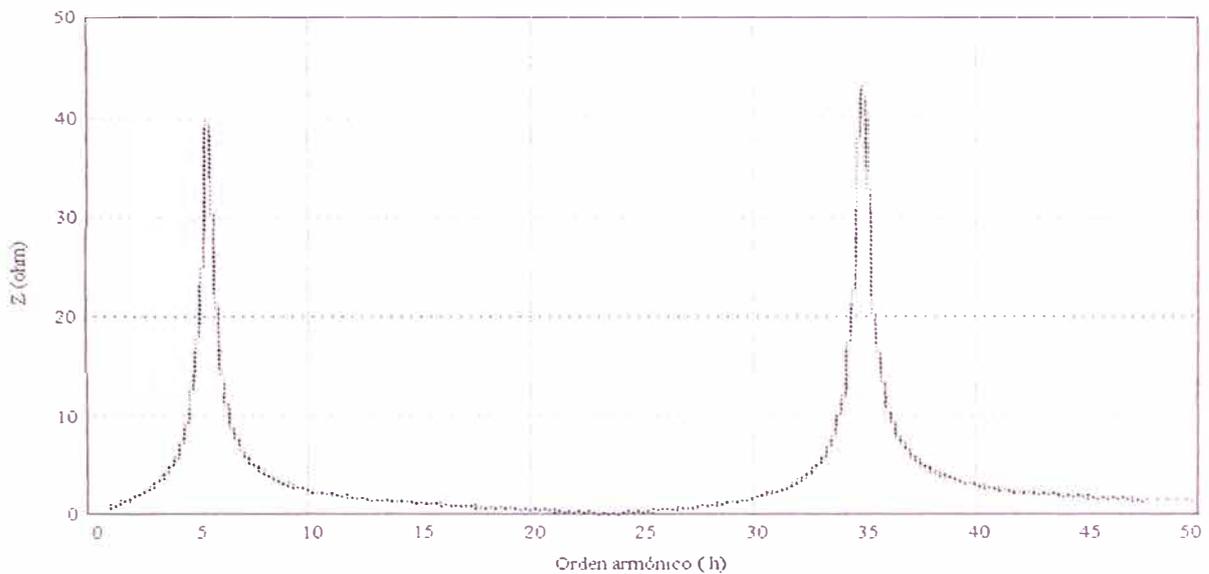


Fig. 1.5. Característica de la magnitud de impedancia vs frecuencia.

Del gráfico, es fácil notar los puntos de máxima impedancia localizados en este caso cerca al orden de la armónica 5<sup>a</sup> y 35<sup>a</sup>, además se distingue un punto de mínima impedancia en cercanía del orden 25<sup>a</sup>.

### 1.2.2 Característica ángulo de la impedancia vs. frecuencia

Brinda información acerca de la variación del ángulo de fase con la frecuencia, necesario para establecer las zonas de comportamiento resistivo, inductivo o capacitivo de la impedancia equivalente de la red en un nodo.

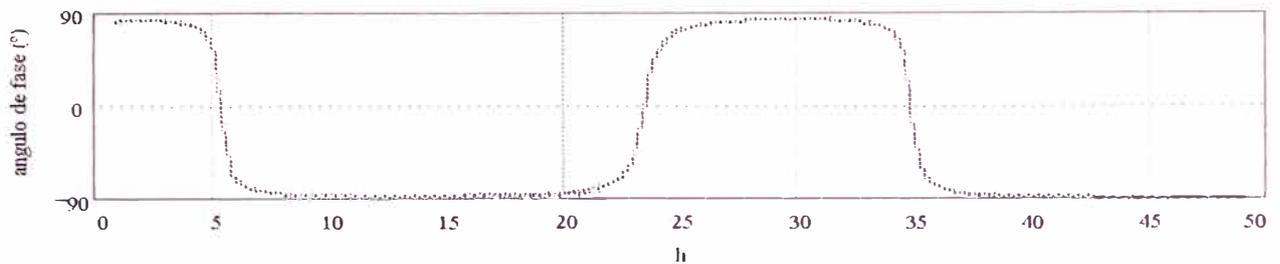


Fig. 1.6. Característica del ángulo de fase de la impedancia equivalente.

### 1.2.3 Característica de la impedancia en el plano complejo en función de la frecuencia (diagrama R - X)

Los valores evaluados del módulo de impedancia pueden ser representados en el plano complejo R - X, originando curvas paramétricas en función del incremento de la frecuencia. En estos diagramas es posible observar los puntos de máximas y mínimas impedancias, además de permitir visualizar los cambios en el comportamiento de la impedancia del nodo o nodos del sistema en estudio (resistivo, capacitivo e inductivo) en función de la frecuencia.

Un gráfico típico de la característica de respuesta en frecuencia para la fase "a" del nodo o barra en estudio anterior, se muestra a continuación:

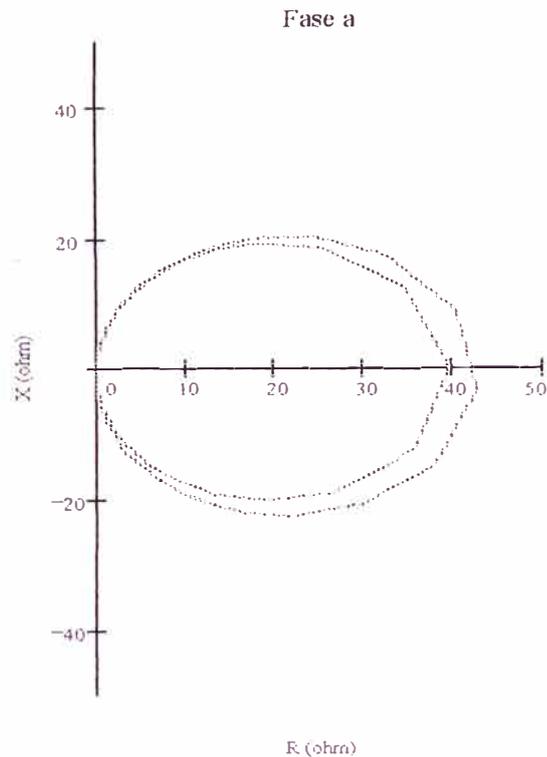


Fig. 1.7. Diagrama R - X de la impedancia equivalente del sistema.

En el diagrama, se distinguen los puntos de mínima y máxima impedancia, además se visualizan las regiones en donde la impedancia se hace resistiva pura, predominantemente capacitiva ó inductiva.

### 1.3 Circuitos resonantes

La mayoría de los elementos presentes en un sistema de potencia son inductivos, ello implica que la presencia de bancos de condensadores para compensación reactiva, corrección del factor de potencia o para filtrado de armónicos, pueda originar transferencias cíclicas de energía entre los elementos capacitivos e inductivos a las frecuencias de resonancia. En estas frecuencias, la reactancia capacitiva es igual en magnitud a la reactancia inductiva, es decir el factor de potencia de la impedancia equivalente a la frecuencia de resonancia es unitaria.

### 1.3.1 Resonancia serie

Un ejemplo de un circuito resonante serie donde cada elemento se describe en términos de su impedancia:

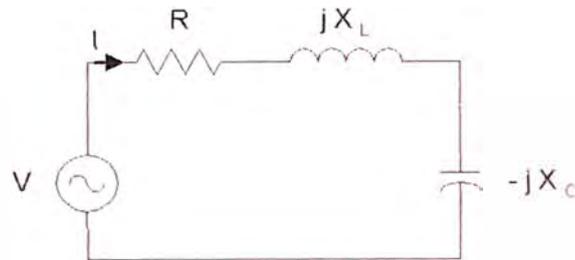


Fig. 1.8. Circuito resonante serie.

La impedancia equivalente del circuito y la corriente circulante se expresan como:

$$Z = R + j(X_L - X_C) \quad (1.12)$$

$$I = \frac{V}{R + j(X_L - X_C)} \quad (1.13)$$

Este circuito se encuentra en resonancia cuando la reactancia inductiva  $X_L$  es igual a la reactancia capacitiva  $X_C$ , esto es  $X_L = X_C$ , teniendo que:

$$I = \frac{V}{R} \quad (1.14)$$

$$Z = R \quad (1.15)$$

Para una frecuencia de resonancia de:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (1.16)$$

Para el caso de  $R = 2 \text{ Ohm}$ ,  $L = 3.98 \text{ mH}$ , y  $C = 36.09 \text{ uF}$ , se tiene la siguiente característica:

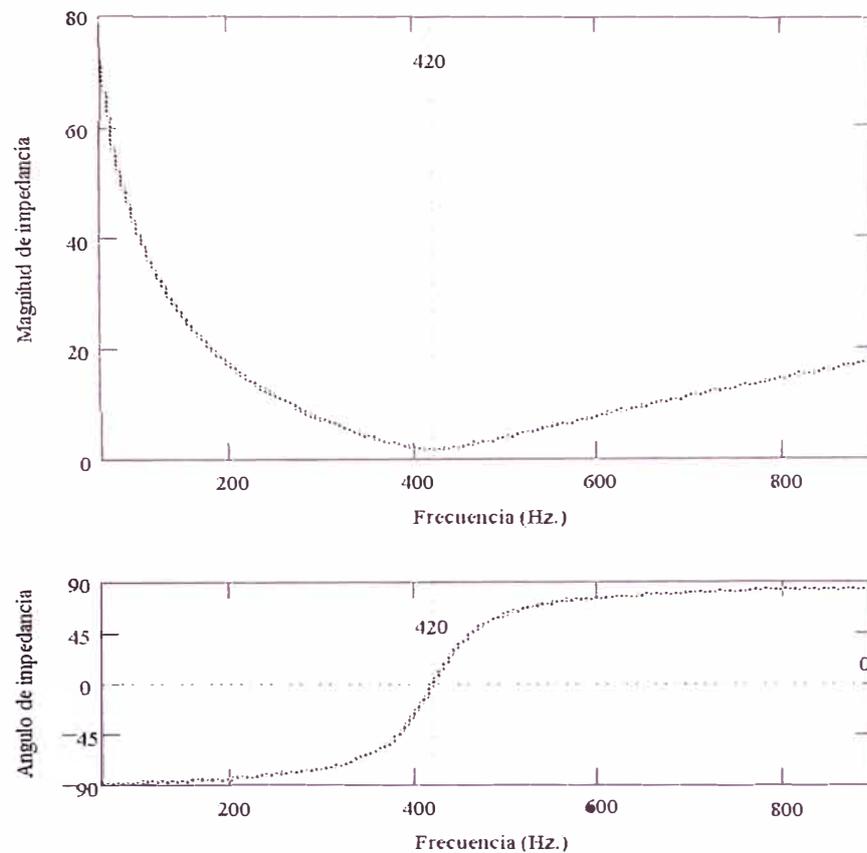


Fig. 1.9. Característica en frecuencia de un circuito resonante serie.

Para estos valores en el circuito, la resonancia ocurre a los 720 Hz y como es de apreciarse del gráfico 1.9 y de la ecc. (1.13), la impedancia a esta frecuencia es mínima y además puramente resistiva (dado el pequeño valor que presenta  $R$  en los sistemas de potencia). La variación del ángulo de impedancia conforme varía la frecuencia también nos permite identificar el punto de resonancia ( $\angle Z = 0^\circ$ ) y establecer las zonas donde el sistema es predominantemente inductivo ( $0^\circ < \angle Z < 90^\circ$ ) o predominantemente capacitivo ( $-90^\circ < \angle Z < 0^\circ$ ).

### 1.3.2 Resonancia paralelo

A diferencia del circuito serie, existen muchas formas de circuitos resonantes paralelo, pero en general, un condensador debe encontrarse en

paralelo con una inductancia para producir resonancia. El circuito típico siguiente entrará en resonancia al igual que el circuito serie cuando la reactancia de la impedancia equivalente sea cero.

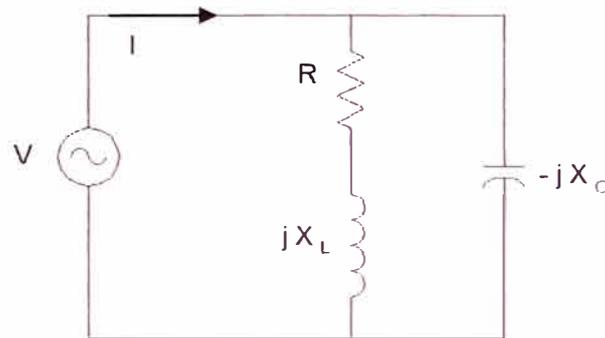


Fig. 1.10. Circuito resonante paralelo.

$$Z = -\frac{jX_C(R + jX_L)}{R + j(X_L - X_C)} \quad (1.17)$$

A diferencia del caso serie, la frecuencia resonancia no ocurre cuando  $X_L = X_C$ , teniendo el valor de la resistencia  $R$  influencia en el desplazamiento de la frecuencia de resonancia, si los valores de  $R$  son pequeños, la resonancia es muy cercana al la del caso serie (420 Hz). Dado que generalmente, los valores de  $X_L$  y  $X_C$  son mayores que  $R$ ,  $|Z|$  presenta valores elevados.

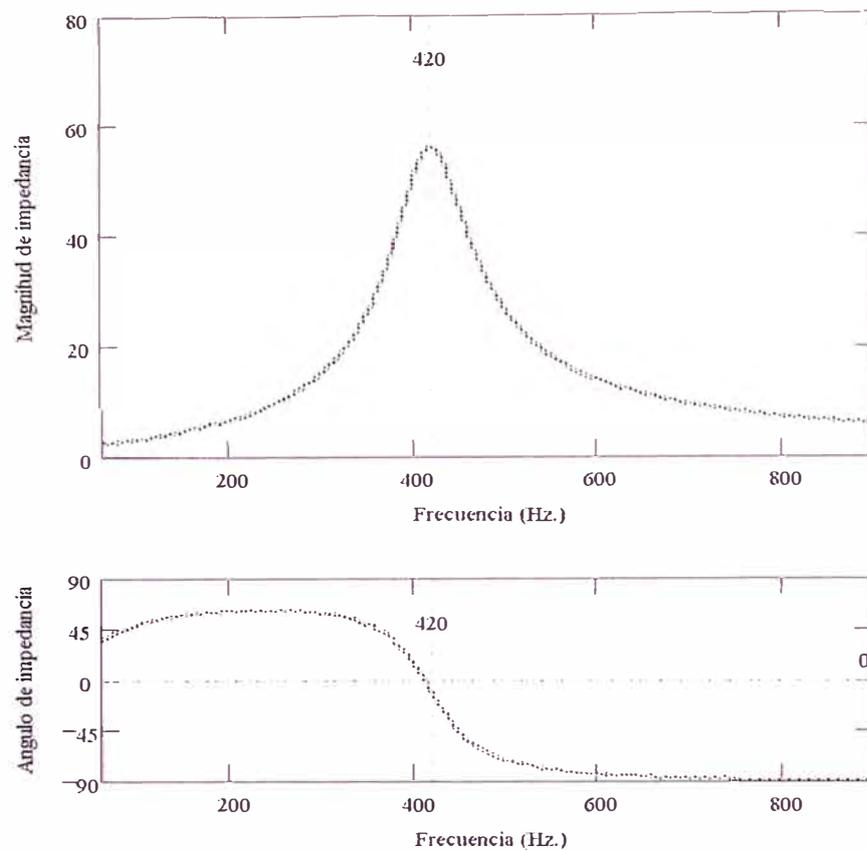


Fig. 1.11. Característica en frecuencia de un circuito resonante paralelo.

#### 1.4 Frecuencia natural de resonancia en el sistema

A partir de las características de respuesta en frecuencia del sistema en un nodo determinado, es posible identificar fácilmente los llamados puntos de frecuencia natural de resonancia, así como, los tipos de resonancia presentes, según:

Frecuencia natural de resonancia	Magnitud de impedancia	Angulo de impedancia	Factor de potencia
<b>SERIE</b>	mínima	cero	unitario
<b>PARALELO</b>	máxima	cero	unitario

Con estas consideraciones y utilizando los gráficos anteriores se pueden identificar los puntos de resonancia natural del sistema visto en la

fase "a" de un nodo determinado:

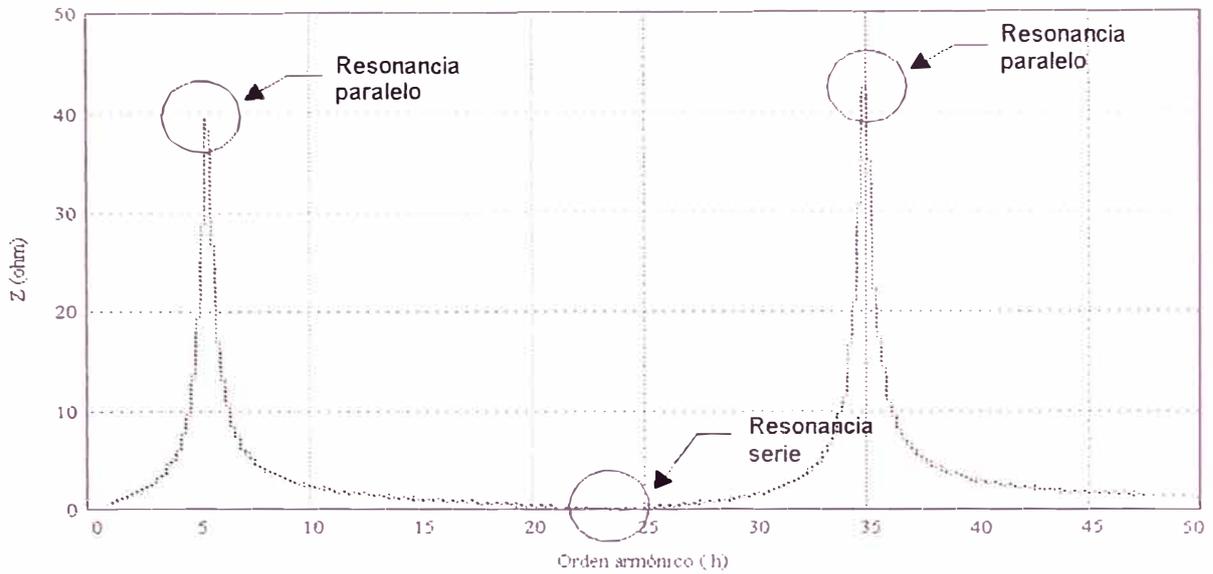


Fig. 1.12. Característica de la magnitud de impedancia vs frecuencia.

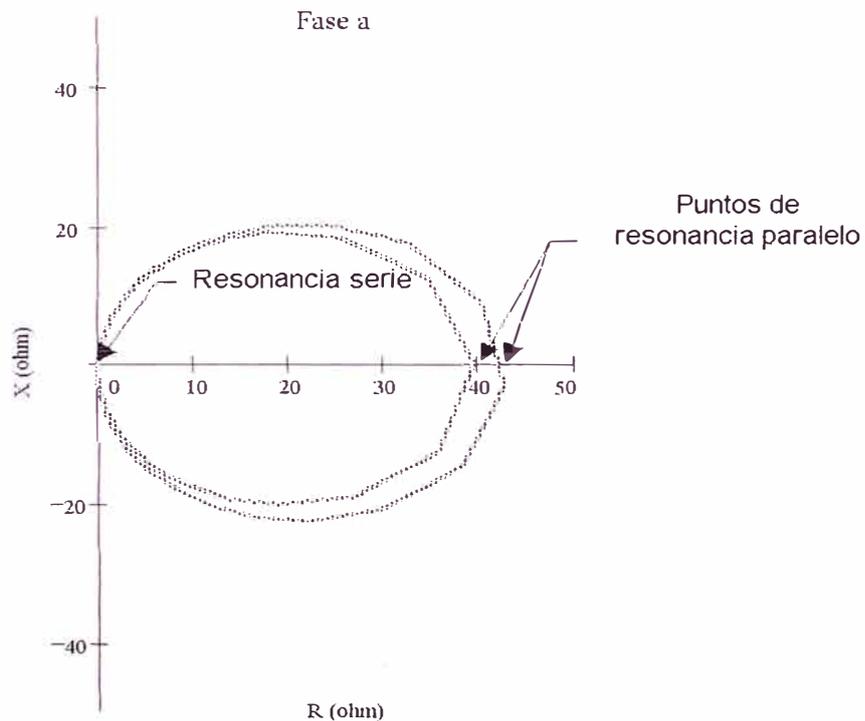


Fig. 1.13. Diagrama R - X de la impedancia equivalente del sistema .

## 1.5 Técnica de inyección de corrientes

Representar ondas distorsionadas de tensión o corriente por medio de la

serie de Fourier según las ecc. (1.18 y 1.19), ofrece la gran ventaja de que para sistemas lineales de componentes pasivos, el efecto de cada componente armónica de corriente puede ser considerada separadamente en régimen permanente sinusoidal, obteniéndose el efecto total mediante resultados parciales, haciendo uso del principio de superposición [11].

$$v(t) = V_o + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} V_h \cdot \sin(h \cdot \omega_o t + \theta_h) \Rightarrow V_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2} \quad (1.18)$$

$$i(t) = I_o + \sum_{h=1}^{\infty} \sqrt{2} I_h \cdot \sin(h \cdot \omega_o t + \theta_h) \Rightarrow I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (1.19)$$

### 1.5.1 Espectro de tensiones armónicas

El espectro de tensiones armónicas resultantes en todos los nodos del sistema se determina inyectando el espectro de corrientes armónicas de las fuentes generadoras en cada nodo del sistema donde ellas están presentes.

La siguiente ecuación matricial que ilustra el procedimiento, debe ser resuelta para cada frecuencia:

$$[I_{SIS}]_h = [Y_{SIS}]_h \cdot [V_{SIS}]_h \Rightarrow [V_{SIS}]_h = [Y_{SIS}]_h^{-1} \cdot [I_{SIS}]_h \Leftrightarrow [V_{SIS}]_h = [Z_{SIS}]_h \cdot [I_{SIS}]_h$$

$$\begin{bmatrix} [V_1] \\ \vdots \\ [V_i] \\ [V_j] \\ \vdots \\ [V_N] \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} [Z_{11}] & \cdots & \cdots & [Z_{1i}] & [Z_{1j}] & \cdots & \cdots & [Z_{1N}] \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ [Z_{i1}] & \cdots & \cdots & [Z_{ii}] & [Z_{ij}] & \cdots & \cdots & [Z_{iN}] \\ [Z_{j1}] & \cdots & \cdots & [Z_{ji}] & [Z_{jj}] & \cdots & \cdots & [Z_{jN}] \\ \vdots & \ddots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots \\ [Z_{N1}] & \cdots & \cdots & [Z_{Ni}] & [Z_{Nj}] & \cdots & \cdots & [Z_{NN}] \end{bmatrix}_h \cdot \begin{bmatrix} [I_1] \\ \vdots \\ [I_i] \\ [I_j] \\ \vdots \\ [I_N] \end{bmatrix}_h \quad (1.20)$$

Así, La tensión armónica en el nodo "i", asumiendo contribuciones en todos los nodos, es obtenida mediante el principio de superposición para una

misma frecuencia o determinado orden "h", según:

$$[V_i]_h = [I_1]_h \cdot [Z_{i1}]_h + [I_2]_h \cdot [Z_{i2}]_h + [I_3]_h \cdot [Z_{i3}]_h + \dots + [I_N]_h \cdot [Z_{iN}]_h \quad (1.21)$$

Donde:

- $[Z_{ij}]_h$  : Impedancia multifásica de transferencia entre los nodos "i" y "j" de orden "h"
- $[Z_{ii}]_h$  : Impedancia multifásica Thevenin propia del nodo "i" de orden "h"
- $[I_i]_h$  : Magnitud de corriente armónica de orden "h" ingresando al sistema en el nodo "i"
- $[V_i]_h$  : Tensión armónica de orden "h" en el nodo "i"

Finalmente, el espectro de la distribución de tensiones armónicas  $[V_i]_h$  para un nodo "i" es presentado en función del orden de la armónica "h" o de la frecuencia, la fig. 1.14 muestra el espectro de tensiones en cada fase de un nodo:

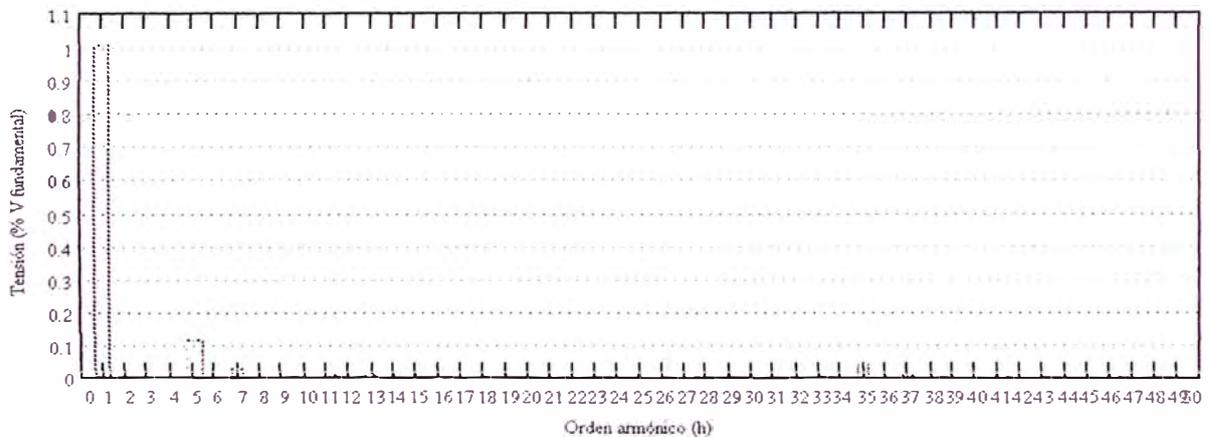


Fig. 1.14. Espectro de tensiones en un nodo del sistema.

Cuando la frecuencia de las excitaciones periódicas de corrientes armónicas coinciden con la frecuencia natural de resonancia del sistema, ocurre la amplificación de corriente y tensión según la respuesta en frecuencia del sistema.

Así, Los bancos de condensadores en serie con la reactancia del sistema crean rutas de baja impedancia frente al flujo de las corrientes armónicas inyectadas en una determinada barra. La resonancia serie puede causar altos niveles de distorsión de tensión entre la inductancia del sistema y el banco de condensadores, debido a que la corriente armónica es concentrada en la ruta de baja impedancia a la cual ocurre. Frecuentemente resonancia serie causa de fusión de fusibles por sobrecarga, sobre calentamiento de cables, etc. [6], [25].

Las resonancias paralelo en el sistema son creados en las rutas de alta impedancia frente al flujo de corrientes armónicas inyectadas en una barra, en el circuito involucrado son iguales la reactancia inductiva paralela con la reactancia capacitiva paralela, un flujo de altas corrientes oscila debido a la energía de transferencia cíclica almacenada entre la inductancia y la capacitancia, causando gran distorsión de tensión y amplificación de corriente en los elementos e interferencia telefónica donde el circuito de distribución de energía y telefónico están físicamente próximos. La gran distorsión de tensión en la barra puede causar flujo de corrientes distorsionadas en los circuitos adyacentes. La manifestación mas común de este efecto es la sobrecorriente en los bancos de condensadores, esta corriente amplificada puede causar fallas en la operación de los equipos y en ellos mismos. [6], [25].

Cuando las condiciones resonantes no son un problema, el sistema tiene la capacidad de absorber gran cantidad de corrientes armónicas, la

evaluación de problemas de resonancia en el sistema depende de la respuesta en frecuencia del sistema y de las corrientes armónicas inyectadas por las fuentes generadoras. [6], [25].

Cuando en el sistema aparecen grupos de inductancia y bancos de condensadores, el sistema presenta una combinación de circuitos resonantes serie y paralelo, y los efectos son menos que los causados por la presencia de un gran elemento resonante.

### 1.5.2 Flujo de corrientes armónicas

Las corrientes armónicas entrantes a los terminales de un sub sistema o un elemento de red se determinan en base a las tensiones resultantes en los terminales y su matriz de admitancia. Sea un sistema general polifásico de 2 terminales representado en la fig. 1.15:

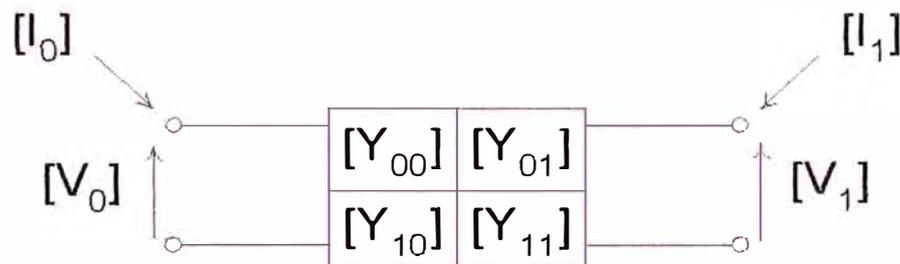


fig.1.15 Representación de un sub sistema general de 2 terminales.

Las corrientes trifásicas se obtienen mediante la ecuación:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Y_{00} & Y_{01} \\ Y_{10} & Y_{11} \end{bmatrix}_h \cdot \begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \end{bmatrix}_h \quad (1.22)$$

El cálculo es efectuado para cada orden armónico, obteniéndose el espectro total de corrientes a través del sub sistema.

### 1.5.3 Flujo de potencia armónica

La potencia asociada con un orden armónico que ingresa por las fases de un terminal de un subsistema se calcula a partir de la tensión y corriente entrante al terminal "k", considerando las corrientes entrantes a los terminales del sub sistema (ver figura anterior), según la expresión:

$$S_k = V_{ka} \cdot I_{ka}^* + V_{kb} \cdot I_{kb}^* + V_{kc} \cdot I_{kc}^* \quad (1.23)$$

Para una frecuencia de interés, los signos de las componentes activa y reactiva de la potencia  $S_k$  indican si el flujo es entrante al terminal del sub sistema (+) o saliente de dicho terminal (-).

## 1.6 Índices de distorsión armónica

Los índices de distorsión armónica son empleados para la descripción de los efectos de las armónicas de tensión y corriente sobre los componentes del sistema de potencia [25].

### 1.6.1 Distorsión total armónica (THD)

Este índice es usado para medir la desviación de una forma de onda periódica no sinusoidal (con contenido de armónicas) respecto a una onda de forma sinusoidal perfecta, cuantificando la distorsión armónica presente.

Esta definida como la razón del valor eficaz RMS de las componentes armónicas a una de las dos siguientes cantidades (dependiendo de la definición adoptada):

1. Al valor eficaz RMS de la componente fundamental (IEEE).
2. Al valor eficaz RMS total (IEC).

Los índices de distorsión son denominados también factores de distorsión total, según IEEE son:

Distorsión Armónica Total de Tensión:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (1.24)$$

Distorsión Armónica Total de Corriente:

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2}}{I_1} \cdot 100\% \quad (1.25)$$

h: Es el orden de la armónica

Para una onda sinusoidal perfecta a frecuencia fundamental, el índice THD es cero.

### 1.6.2 Distorsión armónica individual

Las distorsiones armónicas individuales para tensión y corriente se evalúan para un determinado orden "h", y son definidas como:

$$\text{Distorsión Armónica de Tensión} = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100\% \quad (1.26)$$

$$\text{Distorsión Armónica de Corriente} = \frac{I_h}{I_1} \cdot 100\% \quad (1.27)$$

### 1.6.3 Factor "K"

Este índice es usado para calcular el sobre - dimensionamiento necesario en los transformadores estándares cuando se encuentran presentes corrientes armónicas. Este factor, que es independiente de la corriente a frecuencia fundamental, ésta definido como:

$$K = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} h^2 (I_h/I_1)^2}{\sum_{h=1}^{\infty} (I_h/I_1)^2} = \frac{\sum_{h=1}^{\infty} h^2 (I_h)^2}{\sum_{h=1}^{\infty} (I_h)^2} \quad (1.28)$$

El factor "k" se calcula asumiendo que las pérdidas por corrientes parásitas en los devanados del transformador producido por cada componente armónica de la corriente es proporcional al cuadrado del orden armónico y al cuadrado de la magnitud del componente armónico.

## **CAPITULO II ASPECTOS DE PROGRAMACION**

El programa ha sido desarrollado utilizando BORLAND DELPHI V 1.0, principalmente por la facilidad de desarrollar aplicaciones interactivas con interfaz gráfico en forma rápida, además de que posee una implementación muy completa del concepto de programación orientada a objetos totalmente bajo el entorno Windows.

Al estar centrado este programa en la obtención de resultados numéricos en ciertos puntos de interés de la red, el programa ha sido desarrollado como una máquina de cálculo que puede colocar los resultados ya sea en reportes tipo listado o grabarlos en archivos de texto formateados delimitados por espacios (\*.prn), los cuales pueden ser graficados y analizados con diversas herramientas de software como MATLAB, MATHCAD, IDL etc.

El programa no incluye en este nivel graficadores integrados debido a la gran variedad de análisis gráfico que se puede realizar, por lo que una inclusión de este tipo traería consigo más limitantes que ventajas. Todos los gráficos correspondientes a resultados que se muestran en el presente trabajo han sido obtenidos utilizando MATHCAD

## 2.1 Datos requeridos para la construcción de modelos de los componentes del sistema en estudio

Los datos necesarios para la construcción de los modelos y del sistema a analizar deben ser introducidos en un archivo de texto ASCII el cual se encuentra estructurado de la siguiente manera:

Definición de Barras
Definición de tipo de conductores y disposición geométrica de líneas de transmisión
Definición de los componentes del sistema y fuentes armónicas

Fig. 2.1. Estructura del archivo con datos del sistema.

En las líneas de texto se especifican los comandos que crean los subsistemas componentes y los elazan entre sí. Los comandos y su respectiva sintaxis se detallan en el anexo A.

### 2.1.1 Definición de barras

Las Barras se definen utilizando el comando `BUSBAR` seguido del nombre que se le asignará y una breve descripción referencial según el formato que se muestra a en la referencia de comandos. Para definir las barras en un solo bloque sin tener que especificar el comando `BUSBAR` para cada una, se puede usar el símbolo `#` antes del comando (`#BUSBAR`), lo cual

automáticamente colocará el comando BUSBAR antes de cada línea siguiente hasta que encuentre un comando #END.

Las barras deben tener nombres únicos ya que estos serán utilizados al realizar las conexiones entre los diferentes elementos del sistema.

### **2.1.2 Definición de componentes del sistema y fuentes armónicas**

Por su naturaleza, los elementos han sido separados en los grupos:

- Elementos con conexión a una sola barra (un terminal trifásico).
- Elementos con conexión entre dos barras (dos terminales trifásicos).
- Definición de fuentes armónicas

La definición de los dos primeros elementos se realiza directamente utilizando comandos que crean el componente especificado en base a los datos suministrados (ver referencia de comandos).

Para la definición de las fuentes armónicas como fuentes de corriente es necesario contar con un archivo adicional donde se especifique el espectro de armónicas de dicha fuente en p.u. Estas fuentes son necesarias si se va a realizar estudios de distorsión armónica o amplificación de corriente, mas no es necesario si se va a analizar solamente la impedancia en barras del sistema (ver referencia de comandos en anexo A).

## **2.2 Representación completa del sistema en memoria del computador según la programación orientada a objetos**

El enfoque del análisis basado en la división de la red en subsistemas, cada uno de los cuales es completamente independiente de otro, nos sugiere que cada una de estas unidades puede tratarse como un *objeto*, tal como es

en la realidad. Así, un transformador, una línea de transmisión, etc. son objetos y a la vez cada uno de ellos es un subsistema.

Es de apreciar que el tratar los subsistemas como objetos y realizar la programación en base a ellos trae consigo grandes ventajas desde el punto de vista de organización de datos y facilidad de programación. Es así que considerando cada elemento del sistema como objetos (transformadores, líneas, barras, etc.) el sistema a analizar es una colección de objetos con interconexiones entre ellos (enlaces) que intervienen en el momento de realizar el análisis.

Desde el punto de vista de la Programación Orientada a Objetos, un objeto es una estructura de datos autónoma (independiente) que encapsula sus campos componentes, es decir los parámetros o datos característicos, y además tiene capacidad de realizar operaciones o procesos ya sea en sus campos o en campos de algún objeto con el cual tiene un enlace.

Una ventaja de la Programación orientada a objetos en cuanto a la facilidad de programación son las propiedades de Herencia y Polimorfismo lo que permite la creación de nuevos elementos fácilmente.

Los seis tipos de objetos base utilizados para la representación del sistema de potencia son los siguientes.

***Objeto Barra (TBusBar):***

Representa una barra / nodo del sistema, guarda información de tensiones armónicas y corrientes inyectadas a ella.

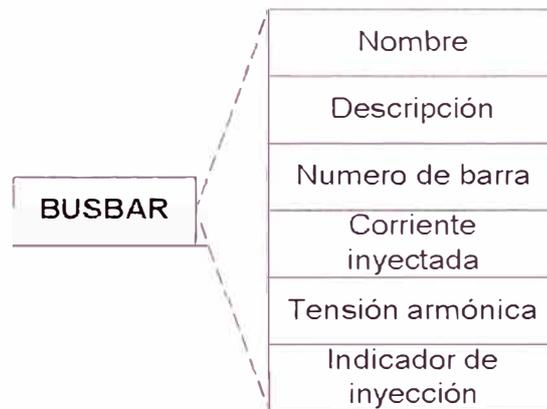


Fig. 2.5. Estructura de datos en un objeto barra.

Los campos "Nombre" y "Descripción" guardan información alfanumérica correspondiente al nombre con que se hará referencia a la barra y un nombre largo descriptivo para propósito de documentación y referencia. El campo "Número de barra" guarda el número de barra que se le asigna a este objeto automáticamente de creación, y es utilizado por los algoritmos de solución.

Otros campos que guardan datos internamente utilizados por el programa son los de "corriente inyectada", "tensión armónica" que almacenan vectores complejos de dimensión  $3 \times 1$  que almacenan los resultados intermedios para una determinada armónica, mientras que el campo "indicador de inyección" señala que existe inyección de corriente en dicha barra o nodo.

***Objeto Sub Sistema (Tsubsystem):***

Objeto base que representa a un subsistema en general e implementa los procedimientos base para su conexión (enlace) con los objetos Barra y su

inclusión en la matriz de admitancia nodal del sistema. Posee campos tipo puntero que señalan a los objetos Barra a los cuales está conectado.

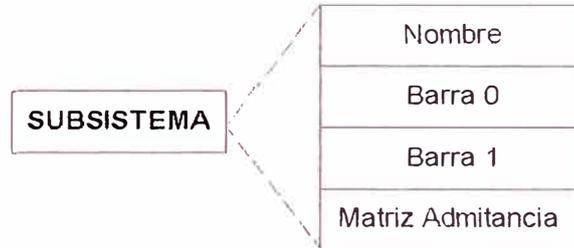


Fig. 2.6. Estructura de campos del objeto subsistema.

El campo "Nombre" almacena el nombre con que se hace referencia a este elemento, mientras que "Barra 0" y "Barra 1" son punteros hacia objetos BUSBAR que son precisamente las barras a las cuales va conectado el subsistema, via sus terminales "locales" números 0 y 1. El último campo "Matriz Admitancia" realmente se compone de campos variables y funciones que permiten calcular los elementos de la matriz de admitancia del subsistema.

***Objeto Sub Sistema de 1 Terminal (T1TermSubSys):***

Particulariza el objeto anterior para sub sistemas enlazados o conectados a una sola barra.

***Objeto Sub Sistema de 2 Terminales (T2TermSubSys):***

Particulariza el objeto Sub Sistema para sub sistemas enlazados o conectados a dos barras.

**Objeto Carga Fuente de Armónicas (THarmLoad):**

Representa una fuente de armónicos y contiene los procedimientos para la inyección de corrientes armónicas en la barra a la cual se encuentra conectado.

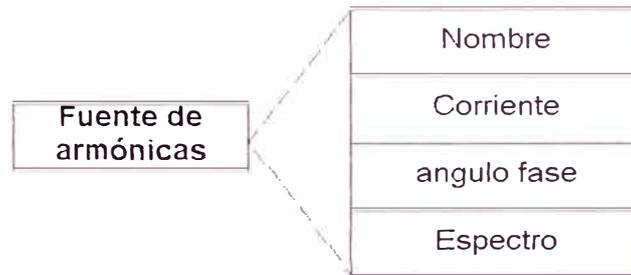


Fig. 2.7. Estructura de campos del objeto Fuente de armónicas.

EL campo "Nombre" guarda el nombre del subsistema , "Corriente" almacena el valor de corriente fundamental de esta fuente, "ángulo de fase" almacena el valor del ángulo de fase de la corriente fundamental y "Espectro" es una lista de valores complejos correspondientes al espectro armónico expresado en por unidad respecto a la corriente fundamental.

**Objeto Sistema de Potencia (TPwrSystem):**

Representa al sistema en estudio y actúa como contenedor para todos los objetos anteriores y sus enlaces / conexiones, además de los procedimientos necesarios para la creación de la matriz de admitancias nodal y obtención de las impedancias Thevenin y transferencia en nodos.

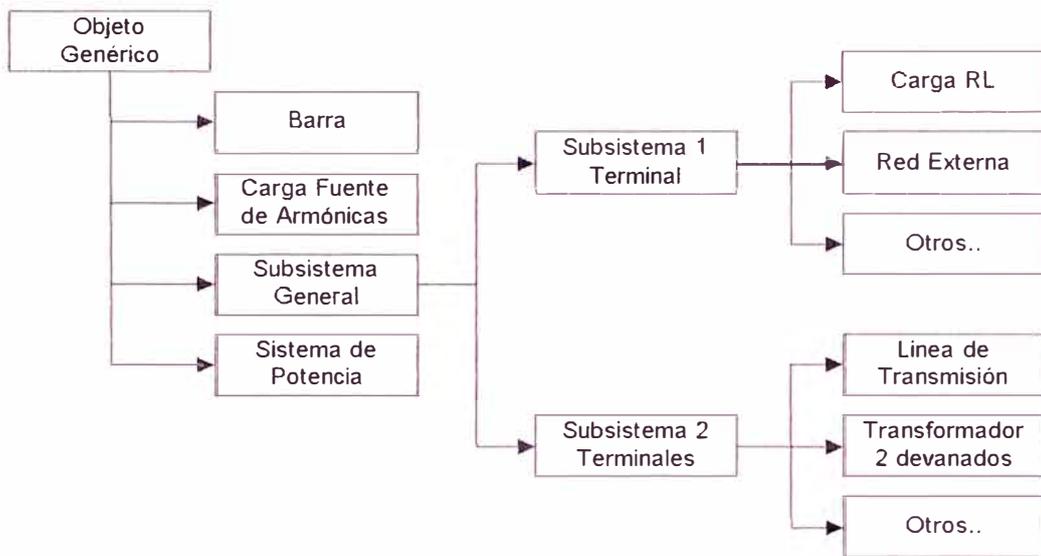


Fig. 2.8. Diagrama de herencia de los objetos base.

La estructura del sistema en memoria puede esquematizarse de la siguiente manera.

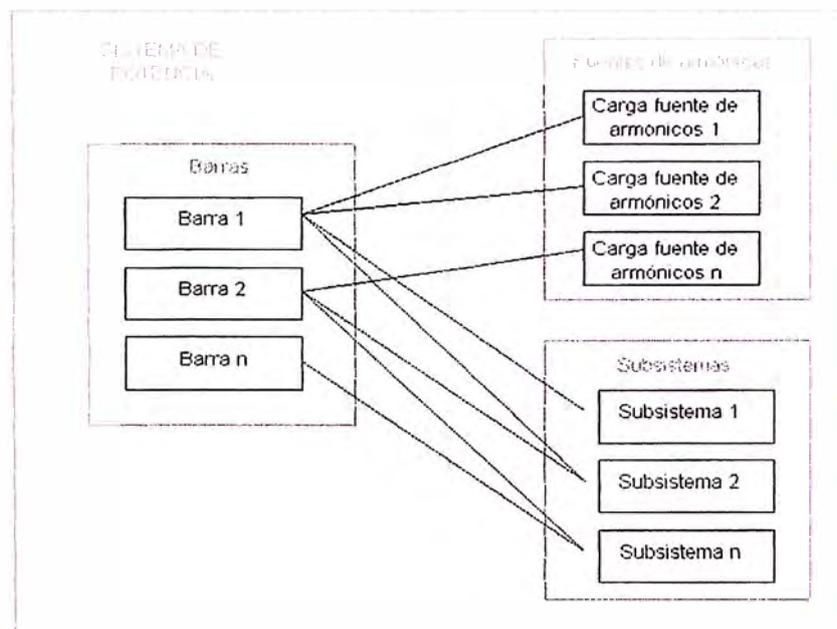


Fig. 2.9. Representación general del sistema de potencia en memoria.

Esta estructura es creada en memoria mediante los comandos en el archivo de texto que contiene la definición del sistema en base a los diagramas de flujo que se muestran a continuación.

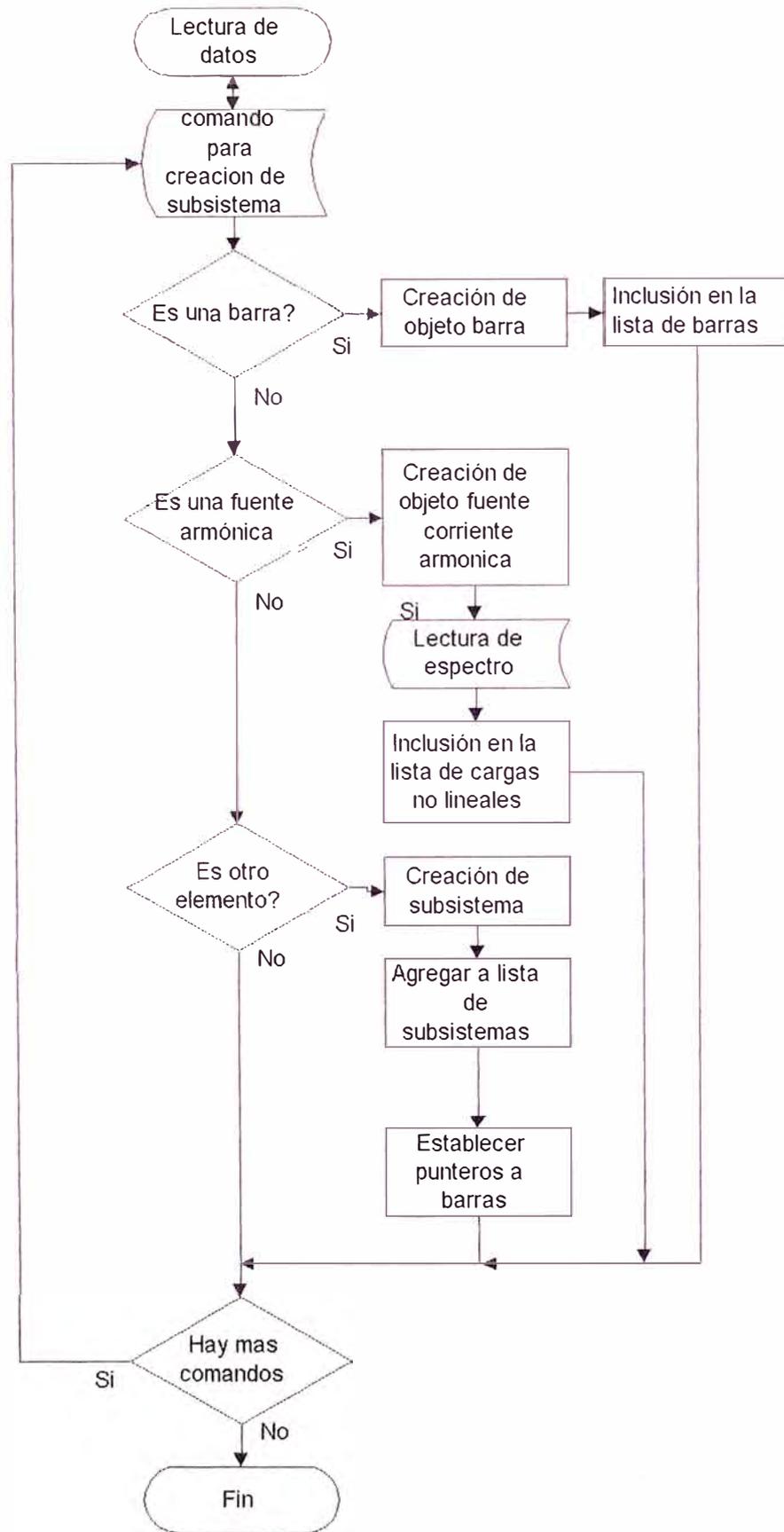


Fig. 2.10. Diagrama de flujo de la rutina de creación de objetos según comandos en archivo de texto.

## 2.3 Determinación de la matriz de admitancia e impedancia

Una vez leído el archivo de datos del sistema y ejecutados los comandos de creación de los subsistemas, el sistema de potencia ya se encuentra representado en memoria por los objetos correspondientes y los enlaces entre ellos, cada uno de los cuales mantiene su independencia en cuanto a parámetros y matriz de admitancia propia. No se puede hablar todavía de una matriz de admitancia del sistema.

Para el análisis de armónicas, las ecuaciones de la red deben ser resueltas para cada armónico de interés, es decir que la matriz de admitancia será construida para cada orden armónica a partir de las matrices admitancia de los subsistemas.

### 2.3.1 Formación de la matriz de admitancia

Para construir la matriz de admitancia del sistema a partir de la representación por objetos del sistema se ha implementado en primer lugar métodos en los objetos subsistema que permiten recalcularse su matriz de admitancia a una frecuencia que le sea indicada, una vez que todos los subsistemas han sido modelados para la frecuencia de interés, se introducen los valores de sus matrices admitancia por cada subsistema presente de acuerdo a las barras a las que se conecta según se muestra a continuación.

Sea la matriz propia del subsistema dada por la ecc. (2.1), que corresponde a un subsistema de dos terminales, los cuales se numeran como "0" y "1" los cuales llamaremos terminales "locales" al subsistema.

$$Y_{\text{Subsistema}} = \begin{bmatrix} Y_{00} & Y_{01} \\ Y_{10} & Y_{11} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Si consideramos que los terminales locales "0" y "1" se encuentran conectados a las barras "j" y "k" del sistema, entonces los elementos de la matriz del subsistema ingresa a la matriz de admitancia del sistema del siguiente modo:

Sea  $Y_{\text{SIS}}$  la matriz del sistema, los elementos de ésta se ven afectados según la ecc. ( 2.1)

$$\begin{aligned} Y_{\text{SIS}}_{jj} &= Y_{\text{SIS}}_{jj} + Y_{00} \\ Y_{\text{SIS}}_{kk} &= Y_{\text{SIS}}_{kk} + Y_{11} \\ Y_{\text{SIS}}_{jk} &= Y_{\text{SIS}}_{kj} = Y_{\text{SIS}}_{jk} + Y_{01} \end{aligned} \quad (2.2)$$

En el caso de subsistemas conectados a una sola barra, sólo es necesaria la primera ecuación.

Después de realizar este proceso para cada subsistema, la matriz admitancia del sistema ya se encuentra formada, presentado la particularidad de ser dispersa.

### 2.3.2 Bifactorización de la matriz admitancia

La inversión de la matriz dispersa de admitancia, resulta en una matriz totalmente llena, de modo que calcular la matriz inversa explícitamente no es práctica en términos de almacenamiento en memoria.

Para obtener la matriz impedancia nodal del sistema definida como la inversa de la matriz de admitancia nodal, se procede a bifactorizar la matriz admitancia en dos matrices triangulares superior e inferior (ecc. 2.2 ) que

mantengan la característica dispersa. Un método que cumple estos requerimientos es propuesto por Zolenkopf [26].

$$Y^{-1} = RL \quad (2.3)$$

con :

Y : Matriz admitancia del sistema

L : Matriz triangular inferior

R : Matriz triangular superior

### 2.3.3 Obtención de los elementos de la matriz impedancia

Una vez obtenidas las matrices triangulares factores, los elementos de la matriz impedancia pueden calcularse según se desee mediante la multiplicación entre elementos de las matrices factores, no siendo necesario calcular la totalidad de los elementos.

$$Z_{ij} = [Y^{-1}]_{i,j} = \sum_{k=1}^n R_{i,k} L_{k,j} \quad (2.4)$$

El proceso general de formación de la matriz de impedancia se ilustra en el diagrama de flujo de la fig. 2.11.

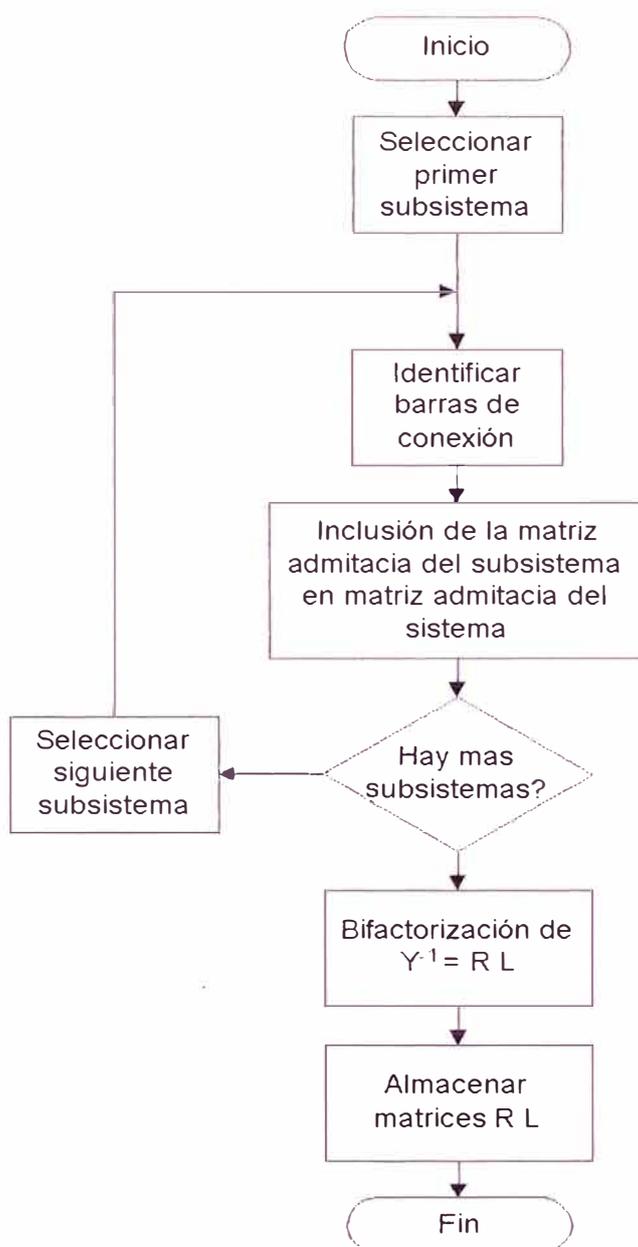


Fig. 2.11. Proceso de formación de la matriz de impedancia a partir de la matriz de admitancia del sistema.

# CAPITULO III

## APLICACIÓN PRACTICA A SISTEMAS DE PRUEBA IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*)

### 3.1 Análisis del sistema de 2 barras IEEE

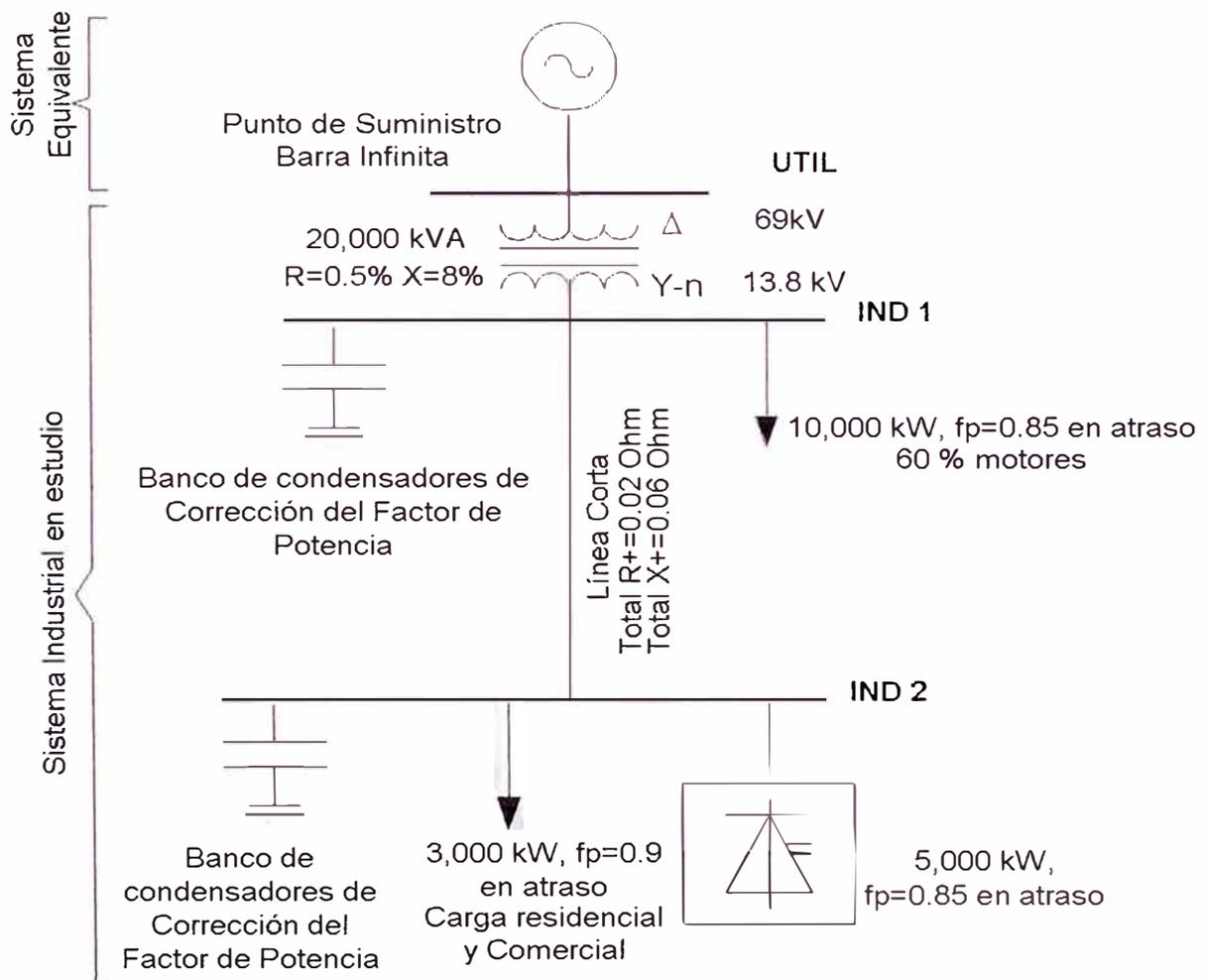


Fig. 3.1. Sistema industrial de 2 barras IEEE en estudio.

### 3.1.1 Descripción del sistema

Se propone un sistema industrial el cual consta de dos barras IND1 e IND2 conectadas a través de una línea trifásica corta. El sistema es alimentado desde una fuente externa a través de un transformador de 20 MVA, 69/13.8 kV. Un convertidor con conmutación de línea se encuentra conectado a la barra IND2, como muestra la fig. 3.1. Los datos de los componentes del sistema vienen dados a continuación:

UTIL	Barra infinita a 69 kV
TRF1	Transformador 20 MVA, 69/13.8 kV, $R_{cc} = 0.5\%$ , $X_{cc} = 8\%$ , Dyn5 con neutro sólidamente conectado a tierra.
Línea	Línea corta de distribución trifásica de 4 hilos. Resistencia en secuencia positiva $R = 0.02\Omega$ , Reactancia en secuencia negativa $X = 0.06\Omega$
Carga en IND 1	10,000 kW ; factor de potencia 0.85 en atraso. 60% de esta carga son motores.
Carga en IND 2	3,000 kW factor de potencia 0.9 en atraso. Carga mayormente comercial y residencial.
Convertidor en IND 2	Rectificador trifásico con conmutación de línea, 5000 kW, factor de potencia 0.9 y produce el espectro completo de sus armónicas características con normal amplitud y fase, además, no se producen armónicas no características
Bancos de Condensadores para corrección de factor de potencia PCF1 y PCF2	Los bancos de condensadores para la corrección del factor de potencia en barras IND1 e IND2 proveen la compensación total a las cargas en las barras correspondientes.

Las corrientes armónicas del convertidor son dadas en la siguiente tabla en valores por unidad:

Tabla 3.1 Corrientes armónicas del convertidor de

H	5	7	11	13	17	19	23	25	29
$\%I_{c1}$	0.2	0.143	0.091	0.077	0.059	0.053	0.043	0.04	0.034
$I_{ch}$	0.119	0.085	0.054	0.046	0.035	0.031	0.026	0.024	0.020
$\theta_n$	$-\pi$	0	$-\pi$	0	$-\pi$	0	$-\pi$	0	$-\pi$

Tabla 3.1 (continuación)

$h$	31	35	37	41	43	47	49
$\%I_{c1}$	0.032	0.029	0.027	0.024	0.023	0.021	0.02
$I_{ch}$	0.019	0.017	0.016	0.014	0.014	0.012	0.012
$\theta_h$	0	$-\pi$	0	$-\pi$	0	$-\pi$	0

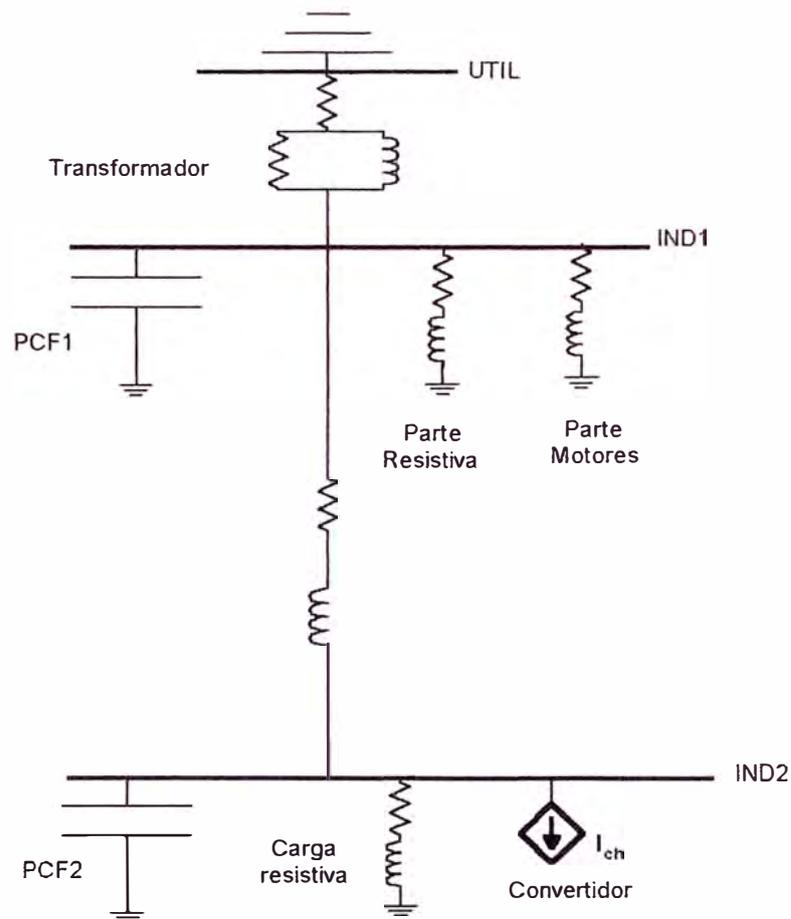


Fig. 3.2. Representación simplificada del sistema.

### 3.1.2 Preparación de datos

El sistema debe ser representado en base a componentes básicos tal como se muestra en la fig. 3.2, a fin de identificar los sub sistemas e ingresar los datos correspondientes en el programa.

**UTIL:**

Al ser UTIL una barra infinita por dato, se simula una barra infinita considerando que ésta barra pertenece a un sistema externo con capacidad de cortocircuito muy elevada. En el presente caso consideramos una  $S_{cc} = 500,000$  MVA y una relación  $R/X = 0.1$

**TRANSFORMADOR:**

Los datos que se necesitan para determinar el modelo no necesitan acondicionamiento previo y son ingresados directamente en el programa, mas bien es necesario establecer un grupo de conexión específico, y un valor para el parámetro  $R_p$ . En el presente caso se asume un grupo de conexión Dyn5, que es muy común en los sistemas de distribución. Para el parámetro  $R_p$  consideramos  $R_p = 80 X_T$

**LINEA:**

En este caso es necesario el ingreso de los valores de impedancia compleja en secuencia positiva y cero. El análisis a efectuar considera un sistema de red y cargas equilibradas, se puede considerar la impedancia en secuencia cero igual a la de secuencia positiva que es dada directamente como dato, a fin de que el comportamiento de este sistema trifásico guarde lógica con el sistema monofásico en secuencia positiva, que es el que se utiliza generalmente en la literatura para este tipo de análisis.

**CARGA EN IND 1:**

La carga comprende 60% motores y 40% carga resistiva. Para los motores tenemos:

$$P_{IND1} = 10000 \text{ kW}$$

$$P_M = 0.6P_{IND1} = 6000 \text{ kW}$$

$$S_M = \frac{P_M}{0.8} = 7500 \text{ kVA}$$

Para la determinación del circuito serie R - X equivalente consideramos un factor de severidad de arranque  $K_1 = 8$  y un factor de calidad del circuito R - X de 8, por lo que se obtiene:

$$X_M = \frac{V^2}{K_1 S_M} = 3.174 \Omega$$

$$R_M = \frac{X_M}{8} = 0.39675 \Omega$$

Con lo que se define el circuito R - X serie equivalente a la parte de la carga constituida por motores para frecuencia fundamental (60 Hz) como:

$$Z_M = 0.39675 + 3.174 j \Omega$$

Para la parte resistiva se tiene que:

$$P_R = 0.4P_{IND1} = 4000 \text{ kW}$$

$$Q_R = Q_{IND1} - Q_M = 6197.4 - 0.6S_M = 1697.44 \text{ kW}$$

$$S_R = 4345.26 \text{ kVA}$$

$$\phi_R = \text{atan}\left(\frac{Q_R}{P_R}\right) = 23^\circ$$

$$Z_R = \frac{V^2}{S_R} = 43.82 \Omega$$

considerando el factor de potencia obtenemos:

$$R_R = 40.34 \Omega \quad ; \quad X_R = 17.12 \Omega$$

$$Z_R = 40.34 + 14.12j \Omega$$

## CARGA RESISTIVA EN IND2

Para esta carga tenemos que

$$P_R = 3000 \text{ kW}$$

$$S_R = \frac{P_R}{0.9} = 3333.33 \text{ kVA}$$

$$\phi_R = 25.84^\circ$$

$$Z_R = \frac{V_R^2}{S_R} = 57.13 \Omega$$

finalmente se obtiene para esta carga el modelo de impedancia R - X constante dado por:

$$R_R = 51.42 \Omega \quad ; \quad X_R = 24.9 \Omega$$

$$Z_R = 51.42 + 24.9j \Omega$$

Estos datos conforman el archivo que define el sistema en estudio, el cual se muestra en el anexo B.

### 3.1.3 Análisis de impedancia en barras

Para estudiar este sistema en particular, se obtiene mediante el programa desarrollado el diagrama de impedancia equivalente Thevenin visto desde la barra del convertidor (IND 2).

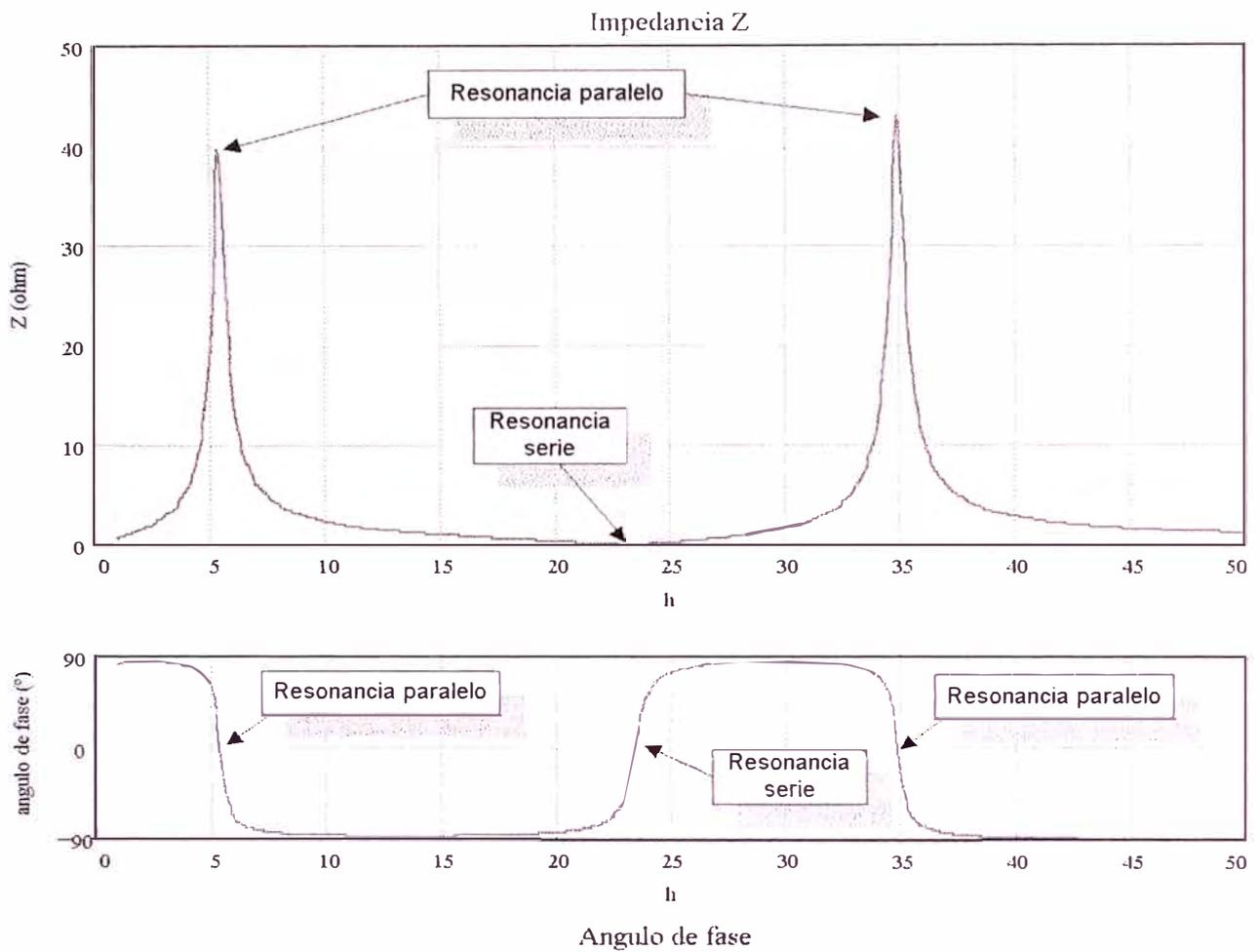


Fig. 3.3. Respuesta en frecuencia en la barra IND 2.

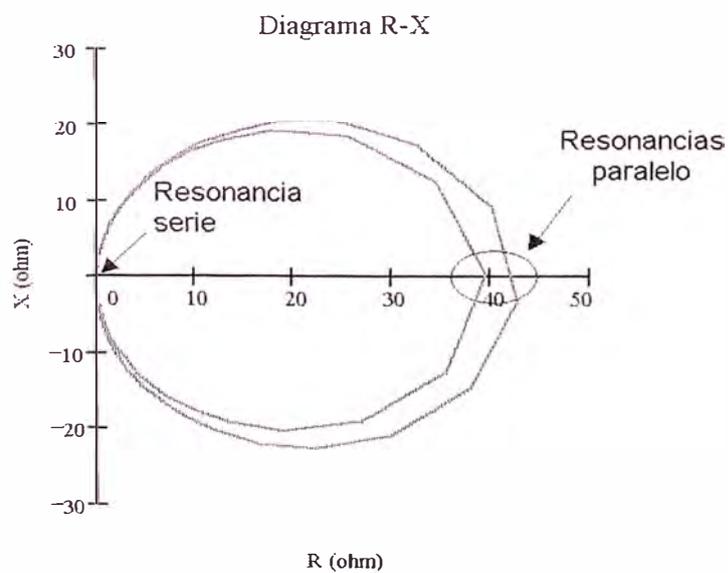


Fig. 3.4. Diagrama de impedancia R - X en barra IND 2.

La representación de la fig. 3.3 nos permite identificar notoriamente los puntos de resonancia paralelo (alta impedancia) entre las armónicas 5ª y 6ª, mientras que existe una resonancia serie (mínima impedancia) entre las armónica de orden 23 y 24.

Este diagrama fue obtenido realizando un muestreo en un rango de frecuencias entre 60 y 3000 Hz (50ª armónica) con incrementos de 5 Hz. El incremento que se utilice al obtener el diagrama de impedancia es de importancia crítica, especialmente si se trata de analizar puntos que se encuentren cerca de la frecuencia de resonancia paralelo ya que la distribución que toman es tal como se muestra:

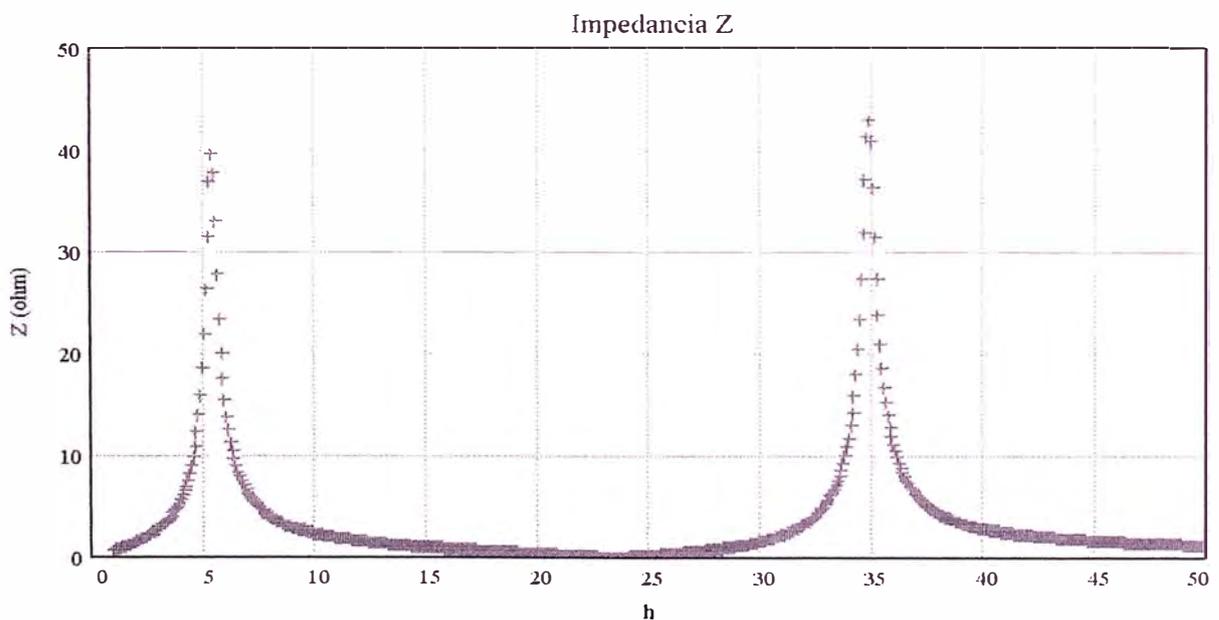


Fig. 3.5. Distribución de puntos en diagrama de impedancia en barra IND 2.

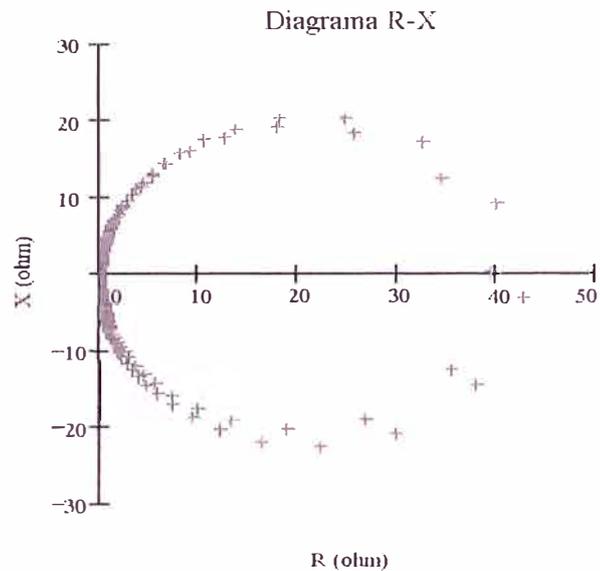


Fig. 3.6. Puntos obtenidos en barra IND2.

Se puede observar que a medida que la frecuencia de muestreo se acerca a las frecuencias de resonancia paralelo, el incremento de impedancia respecto al cambio en la frecuencia se hace considerable, hecho que se observa del distanciamiento entre los puntos consecutivos cerca de los picos de resonancia.

En las cercanías a los puntos de resonancia serie ocurre lo contrario, las variaciones de impedancia no son tan bruscos al variar la frecuencia.

En los diagramas de impedancia tal como el de la fig. 3.3 es fácil la identificación de las resonancias paralelo mas no las resonancias serie, por lo que se opta por representar el eje de ordenadas (impedancia) en escala logarítmica, obteniendo el diagrama de la fig. 3.7.

La información que puede obtenerse de este diagrama es abundante, concluyéndose de su análisis lo siguiente:

- La existencia de dos frecuencias de resonancia paralelo (máxima impedancia), ubicadas en  $h = 5.42$  (325.2 Hz) y en  $h = 34.9$  (2094 Hz), la presencia de una corriente armónica inyectada en IND2 con frecuencia cercana a estos puntos originará elevadas tensiones armónicas en dicha barra.
- Presencia de un punto de resonancia serie en  $h = 23.5$  (1410 Hz)
- Del diagrama de ángulo de fase se verifica que en los puntos de resonancia, ya sea serie o paralelo, la impedancia equivalente del sistema en esa barra es puramente resistiva (ángulo de fase cero).
- Se pueden diferenciar las zonas donde el sistema tiene comportamiento inductivo y capacitivo en base al diagrama del ángulo de fase apreciándose que la impedancia de la barra es inductiva para  $f < 325.2$  Hz Y  $1410$  Hz  $< f < 2094$  Hz; y capacitiva para el intervalo  $325.2$  Hz  $< f < 1410$  Hz y  $f > 2094$  Hz.
- El cambio de comportamiento de la impedancia de capacitivo a inductivo o viceversa es súbito, y ocurre dentro de un reducido rango de frecuencia.

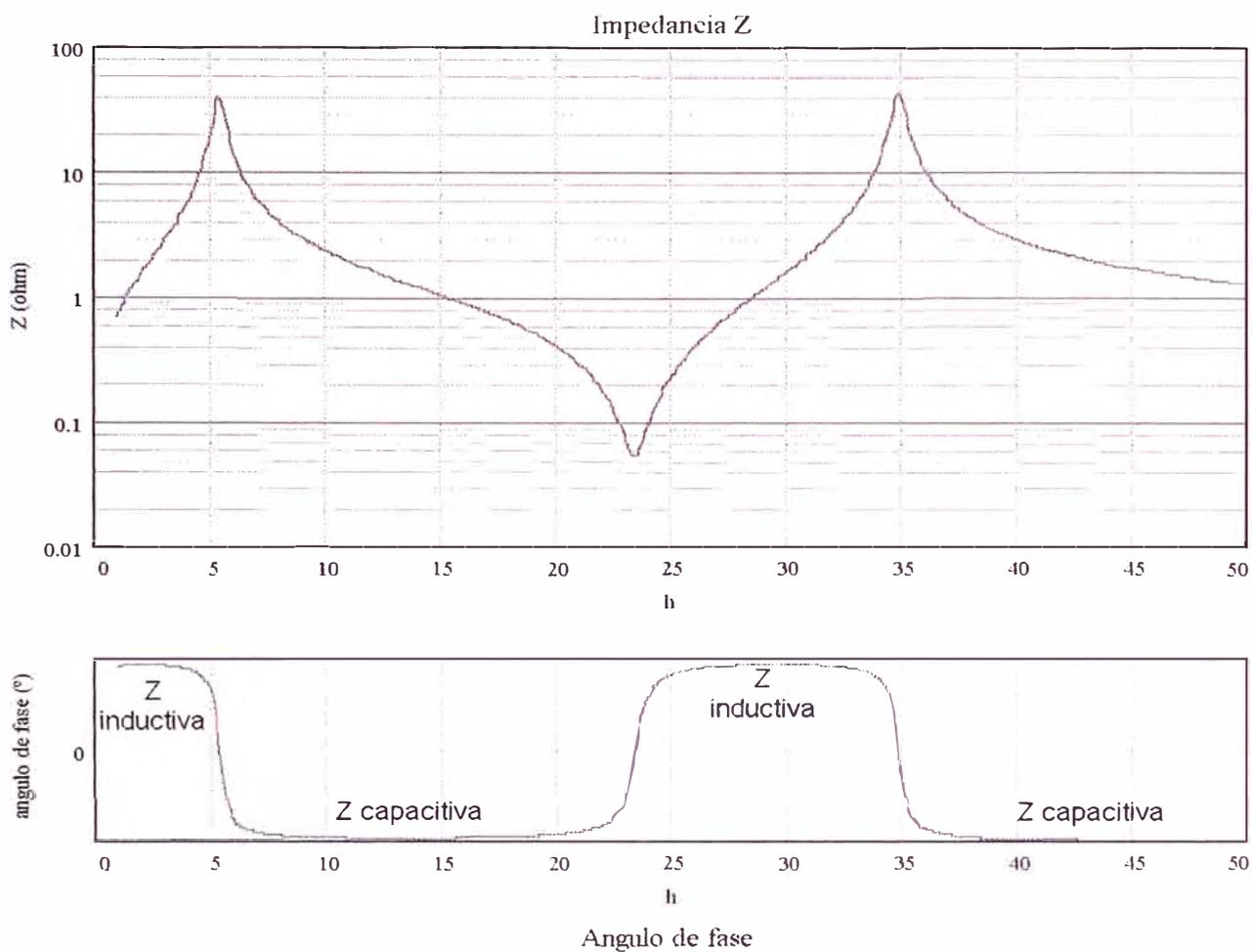


Fig. 3.7. Diagrama de Impedancia en barra IND2. Magnitud en eje logarítmico.

En forma similar para la barra IND 1 se obtiene su diagrama de impedancia de impedancia Thevenin equivalente.

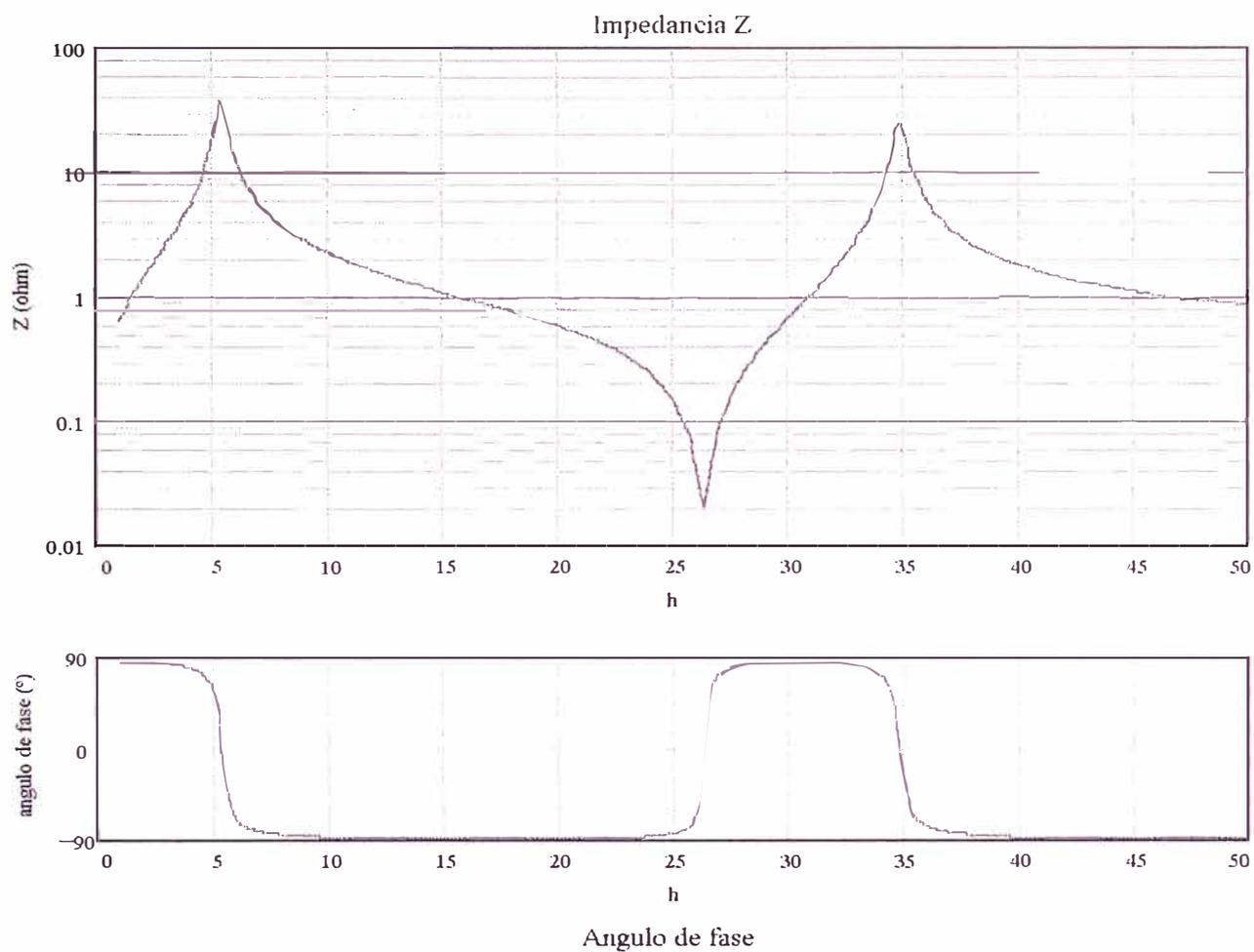


Fig. 3.8. Diagrama de Impedancia en barra IND1.

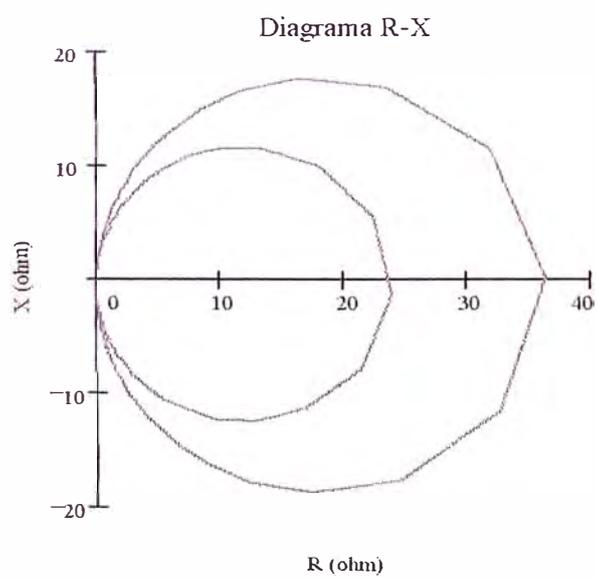


Fig. 3.9. Diagrama de impedancia R - X en barra IND1.

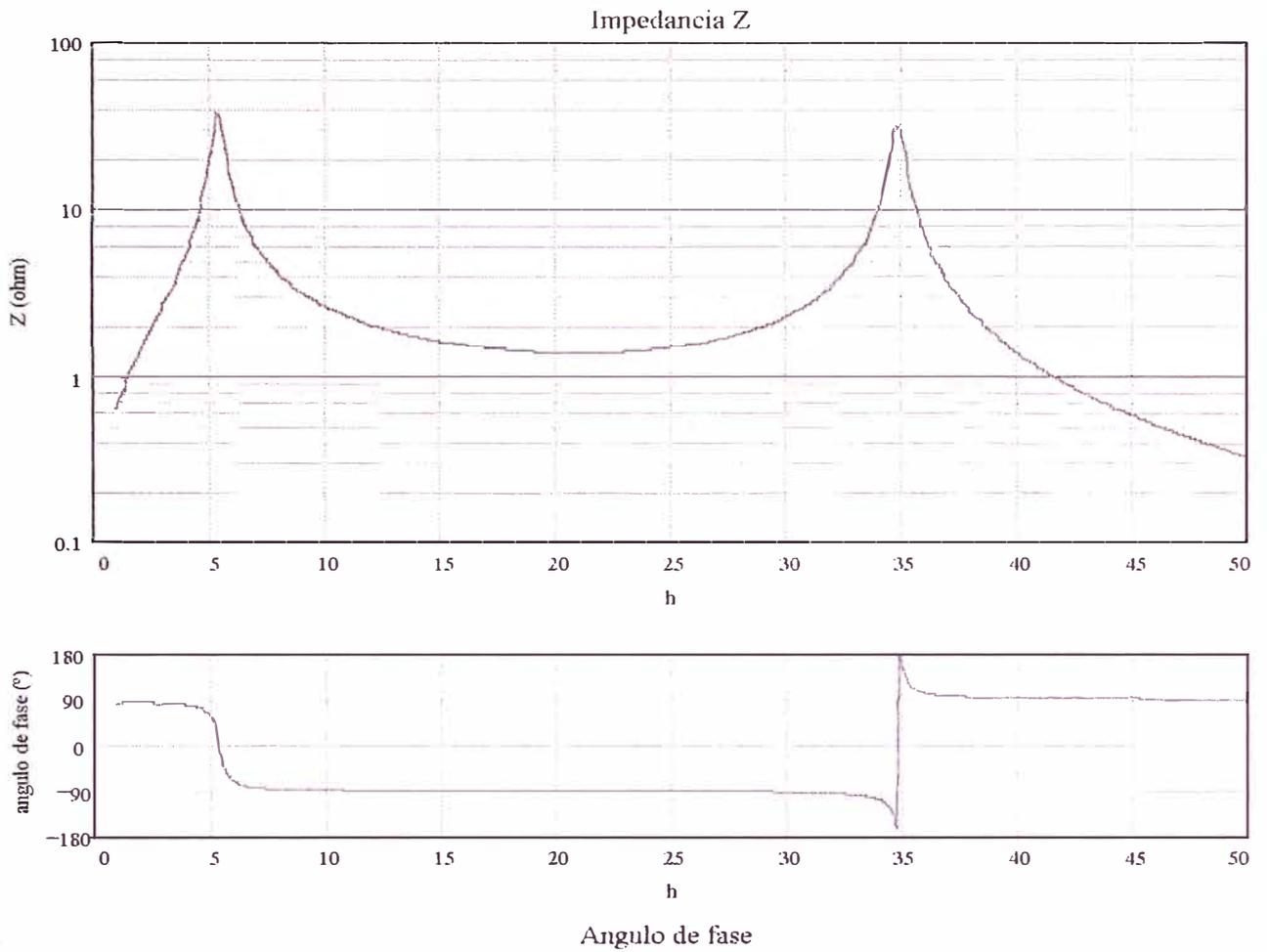


Fig. 3.10. Diagrama de Impedancia de transferencia entre barras IND1 e IND2.

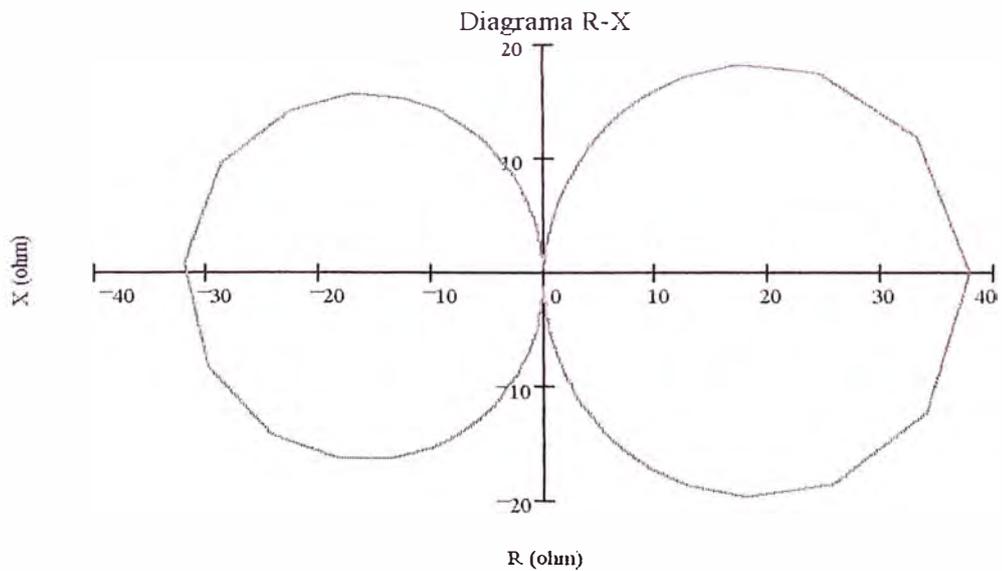


Fig. 3.11. Diagrama de Impedancia de transferencia R - X entre barras IND1 e IND2.

En lo que respecta a estos resultados cabe hacer algunas apreciaciones:

- Se aprecia del diagrama la existencia de puntos de resonancia paralelo mas no serie.
- Se aprecian valores de impedancia con partes reales negativas (en segundo y tercer cuadrante), si bien es cierto que una resistencia no puede ser negativa, hay que tener en cuenta el significado de la impedancia de transferencia.

A fin de ilustrar los efectos en las barras mostramos una comparación de estos tres resultados.

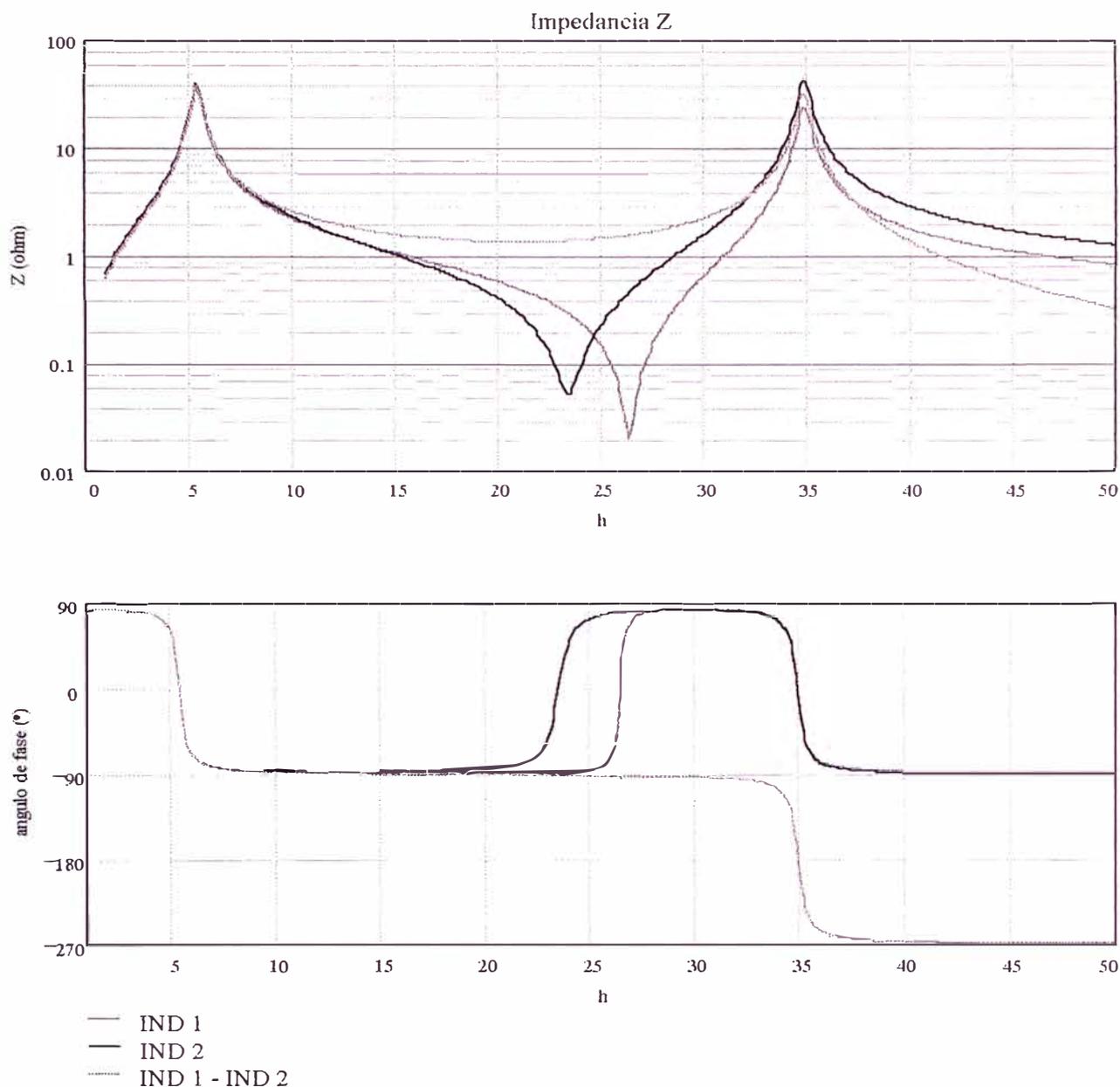


Fig. 3.12. Impedancias propias y de transferencia en barras del sistema.

### 3.1.4 Espectro de tensiones armónicas en barras

Las tensiones armónicas en las barras son consecuencia de las corrientes armónicas producidas por el convertidor en la barra IND 2, cuyo espectro se encuentra definido por la tabla 3.1 correspondiente a la forma de onda mostrada en la fig. 3.10, obteniéndose los espectros de tensiones de

línea en la barra IND 2 e IND 1 que se muestran en las figuras 3.11 y 3.12 respectivamente.

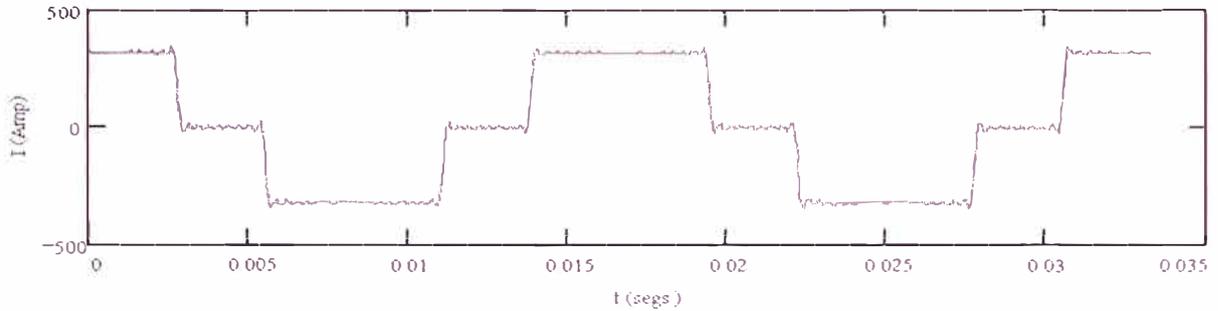


Fig. 3.13. Forma de onda de la corriente por el rectificador.

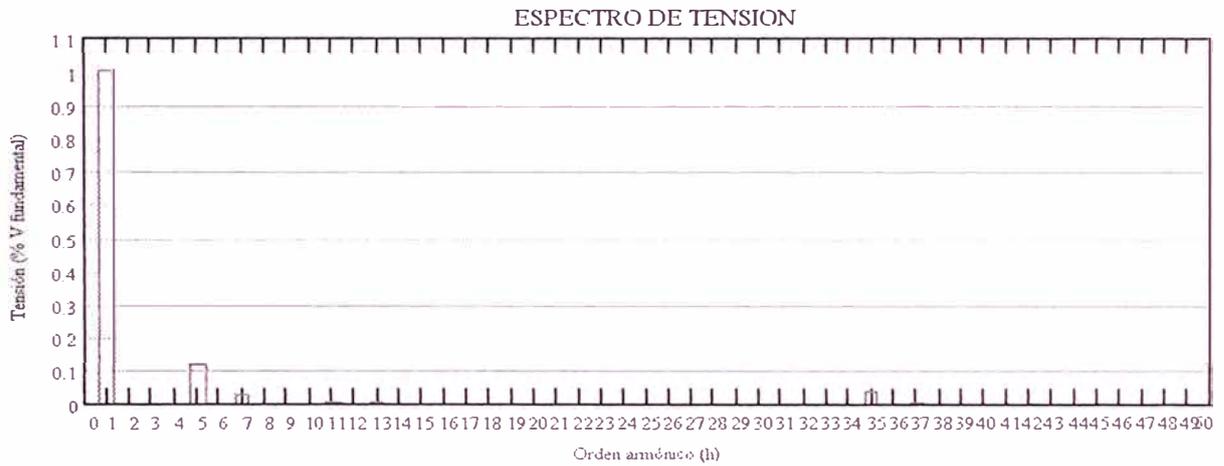


Fig. 3.14. Espectro de tensiones en IND 2.

con los siguientes índices evaluados para la barra IND 2:

$$THD_{IEEE} = 12.48 \% \quad ; \quad THD_{IEC} = 12.385 \% \quad ; \quad V_{rms} = 13.907 \text{ kV} \quad ; \quad V_{pu} = 1.008$$

Para la barra IND 1 tenemos:

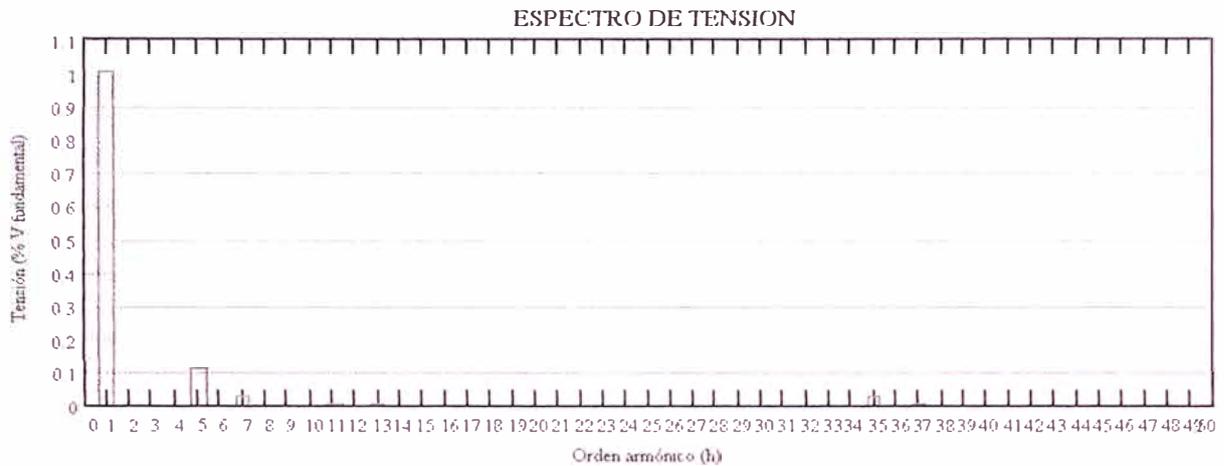


Fig. 3.15. Espectro de tensiones en barra IND 1.

Con los siguientes índices evaluados.

$$THD_{IEEE} = 11.71\% \quad ; \quad THD_{IEC} = 11.63\% \quad ; \quad V_{rms} = 13.894 \text{ kV} \quad ; \quad V_{pu} = 1.007$$

De lo anterior se observa que si bien la elevación de tensión en valor eficaz total no es muy apreciable y del orden del 0.7 %, la distorsión es apreciable en ambos casos, predominado la 5ª armónica. Esto se aprecia mejor si a partir de los datos de magnitudes de las tensiones armónicas del espectro obtenido se reconstruye la onda de tensión en dominio del tiempo considerando las magnitudes y ángulos de fase correspondientes a cada tensión armónica, es así que evaluando la serie de Fourier:

$$V(t) = \sqrt{2} \left( \sum_{h=1}^N V_h (h\omega_0 t + h\theta_h) \right) \quad (3.1)$$

con:

$V_h$  : Tensión eficaz de la armónica "h"

$\omega_0$  : Frecuencia fundamental

$\theta_h$  : Angulo de fase relativo del armónico "h"

H : orden armónico

se obtiene :

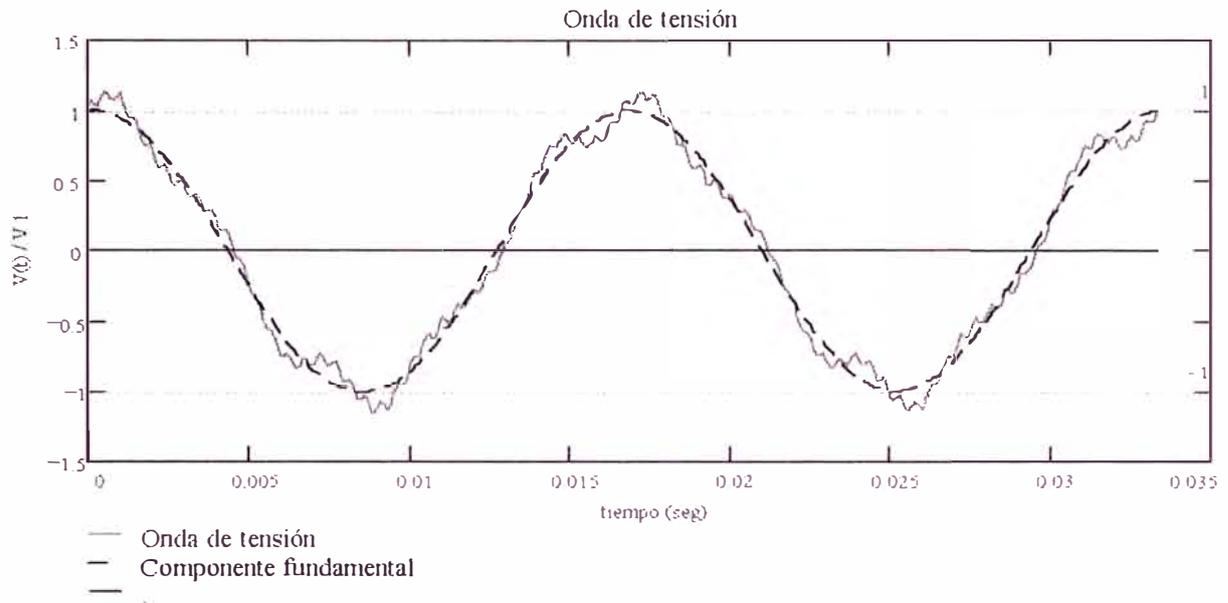


Fig. 3.16. Tensión en barra IND 2. Valores instantáneos respecto al valor pico de la componente fundamental.

### 3.1.5 Flujo de corrientes armónicas

Es posible establecer también la distribución de las corrientes a través de los diferentes elementos en la red para una determinada frecuencia, en el presente análisis se muestra en la tabla 3.2 la distribución de corrientes para la quinta armónica (cerca a una resonancia paralelo), donde se aprecian las elevadas magnitudes de corriente en los bancos PCF1 y PCF 2 (145.94 A y 110.21 A respectivamente), apreciándose la intervención del transformador TRF 1 en la resonancia al observar la corriente por el secundario (230.04 A).

Para analizar las corrientes en los bancos de condensadores se obtienen los espectros correspondientes para la corriente en PCF 1 y PCF 2 que se muestran en las figuras 3.14 y 3.15.

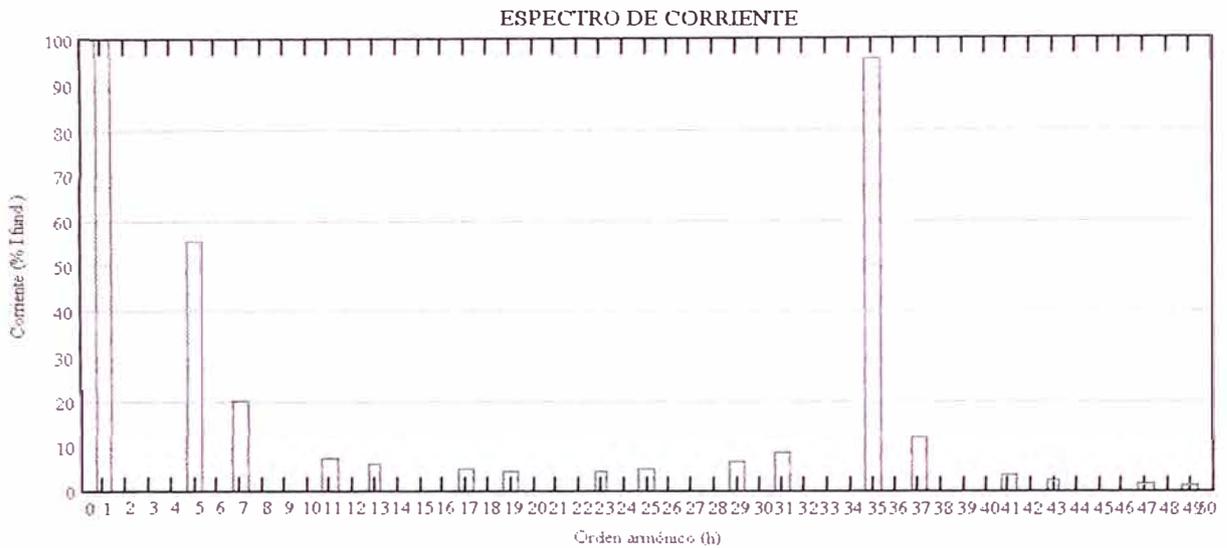


Fig. 3.17. Espectro de corrientes en PCF 1.

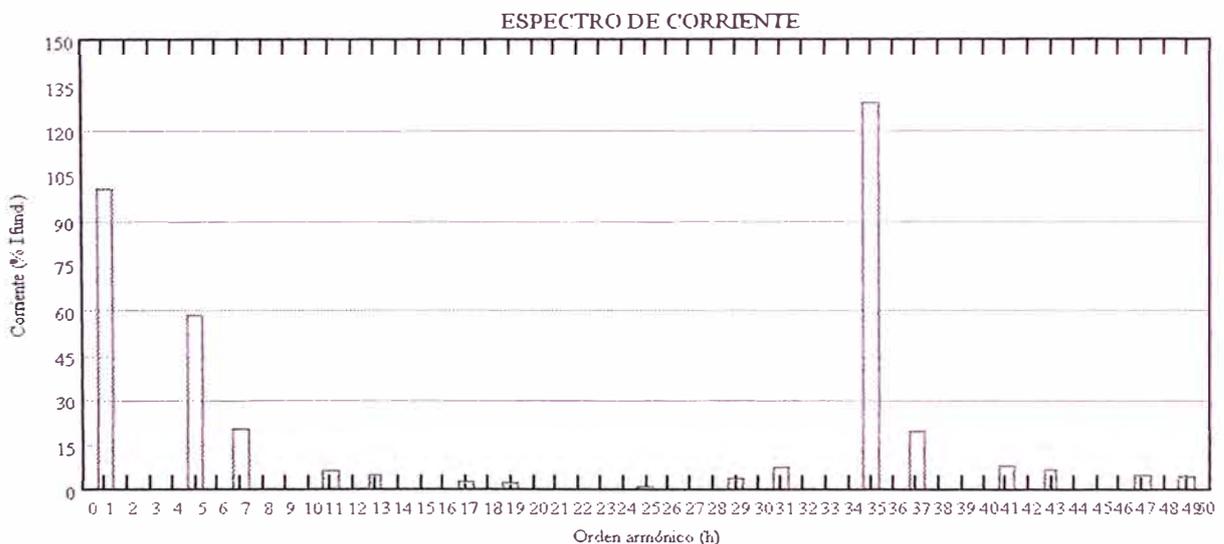


Fig. 3.18. Espectro de corrientes en PCF 2.

En el caso de PCF 1 se puede observar que se obtiene niveles muy altos de distorsión, con THD de 114% (IEEE) y 75% (IEC), lo que implica tener una corriente eficaz de 697 A, que comparado con los 265 A nominales

del banco, representa una sobrecarga del 51.6 %. Para PCF 2 los niveles de distorsión THD son del orden de 145% (IEEE) y 82.4% (IEC) con corrientes eficaces de 782 A, que representa sobrecargas del 76.2% en corriente.

Estos niveles altos de distorsión se originan al tener corrientes armónicas inyectadas por el rectificador muy cercanos a los puntos de resonancia del sistema (5ª y 35ª armónica), ocasionando corrientes mayores que las esperadas en una operación a frecuencia fundamental con el consecuente riesgo de falla, deterioro de los equipos, fusión de fusibles, activación de dispositivos de protección contra sobrecorrientes entre otros.

### **3.1.6 Influencia de los bancos de condensadores en la respuesta en frecuencia del sistema**

Se muestran las características de respuesta en frecuencia del sistema para diferentes casos, que contemplan la influencia de la variación tanto del banco PFC1 tanto como PFC2 en la impedancia propia de IND 2 y la impedancia de transferencia IND 1 - IND 2, que cuantifican el efecto de la corriente del rectificador sobre la tensión en la barra IND 2 e IND 1 respectivamente.

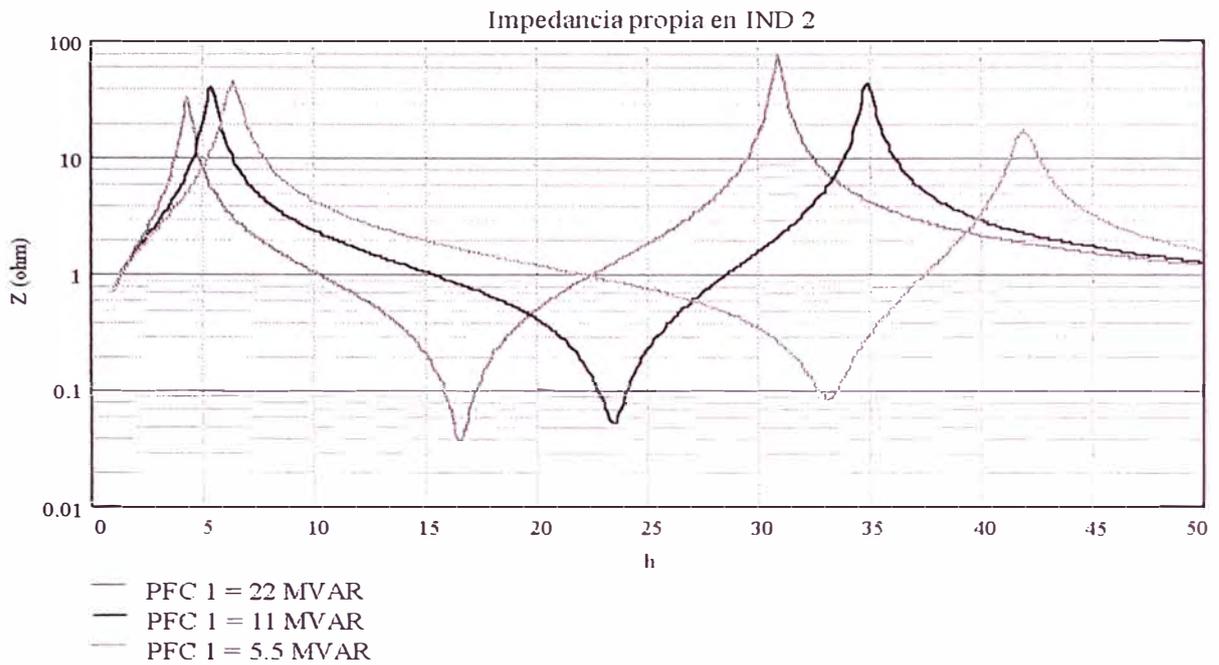


Fig. 3.19. Impedancia propia en IND 2 según variación de la compensación de PFC 1.

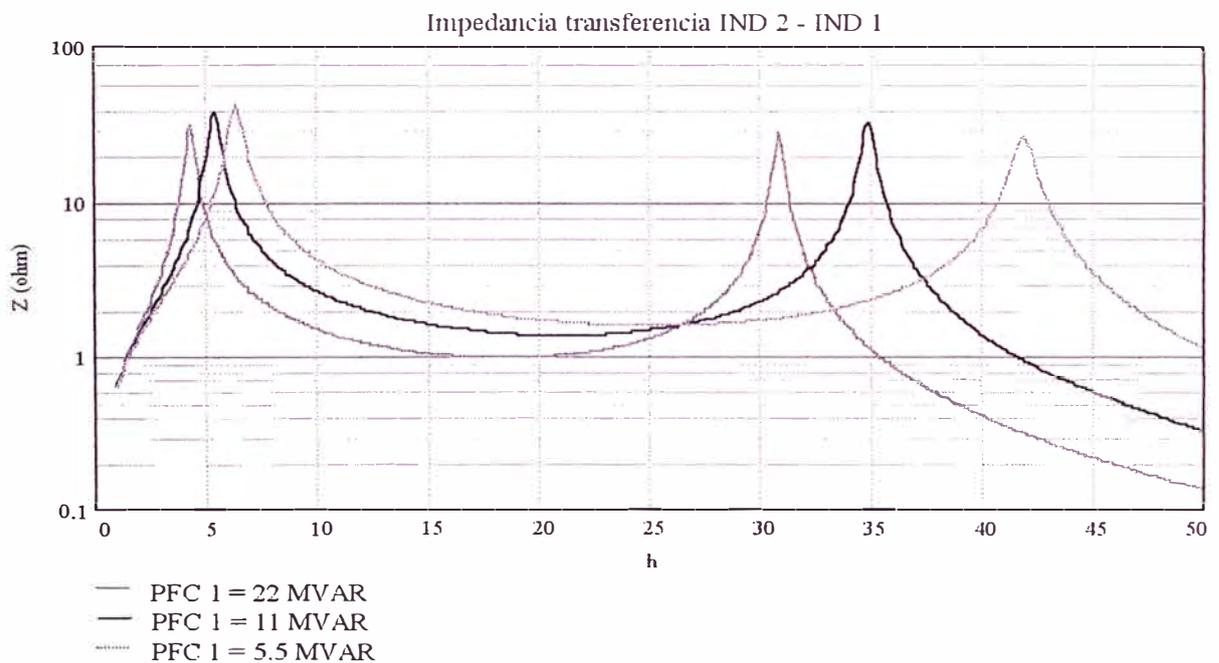


Fig. 3.20. Impedancia de transferencia entre IND 2 e IND 1 según variación de la compensación de PFC 1.

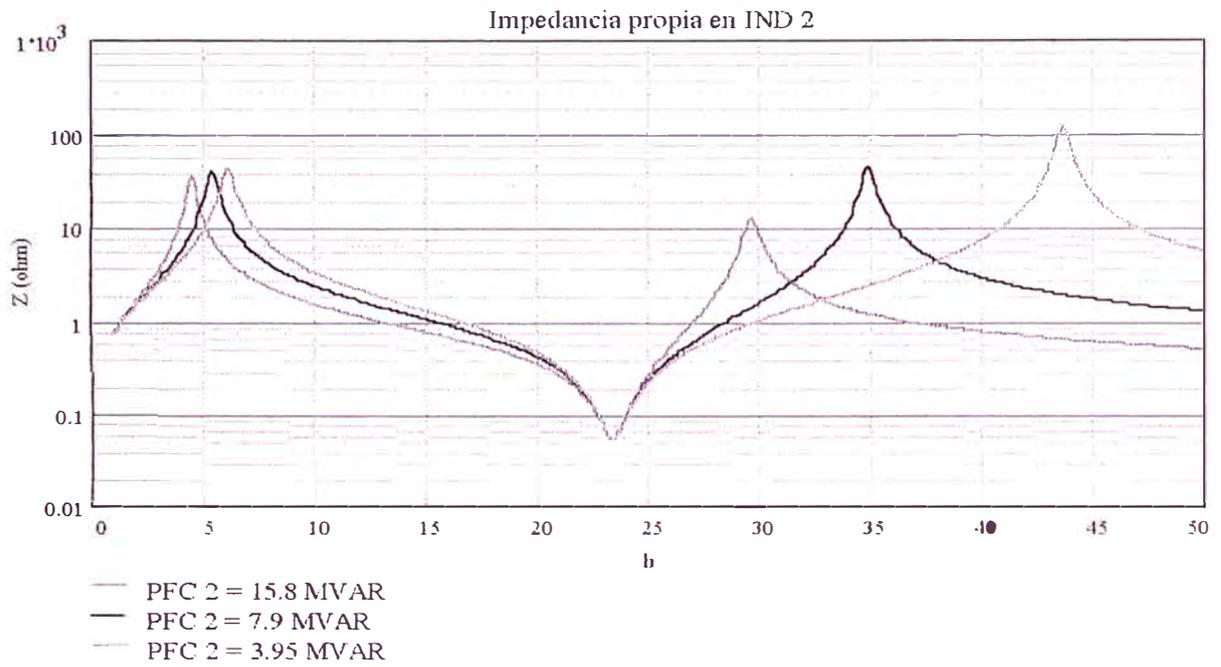


Fig. 3.21. Impedancia de propia IND 2 según variación de la compensación de PFC 2.

### 3.2 Análisis del sistema de 13 barras IEEE

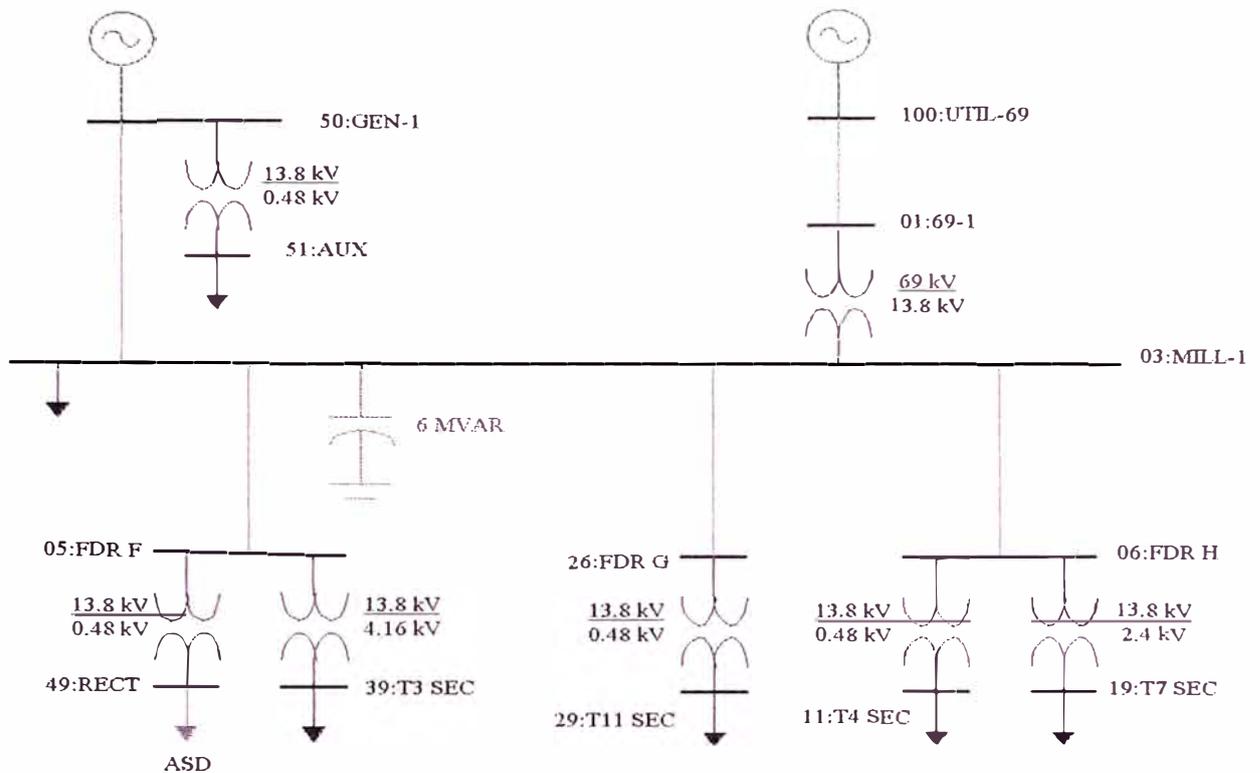


Fig. 3.22. IEEE 13 - Bus Balanced Industrial Distribution Test System

#### 3.2.1 Descripción del sistema

El sistema de prueba IEEE de 13 barras es un típico caso de una planta industrial de media tensión. La planta es alimentada desde un sistema de distribución a 69 kV y de un sistema de generación local a 13.8 kV, debido a la naturaleza equilibrada del sistema, sólo se necesitarán datos de la red en secuencia positiva, las capacitancias de la línea aérea corta y cables son ignorados.

Tabla 3.2. Datos de impedancia de línea y cable en por unidad  
(valores base: 13.8 kV, 10,000 kVA)

De barra	A barra	R	X
100: UTIL-69	01:69-1	0.00139	0.00296
03:MILL-1	50:GEN-1	0.00122	0.00243
03:MILL-1	05:FDR F	0.00075	0.00063
03:MILL-1	26:FDR G	0.00157	0.00131
03:MILL-1	06:FDR H	0.00109	0.00091

Tabla 3.3. Datos de impedancia de línea y cable en ohms

De barra	A barra	R	X
100: UTIL-69	01:69-1	0.02647	0.05637
03:MILL-1	50:GEN-1	0.02323	0.04628
03:MILL-1	05:FDR F	0.01428	0.01200
03:MILL-1	26:FDR G	0.02990	0.02495
03:MILL-1	06:FDR H	0.02076	0.01733

Tabla 3.4. Datos de Transformadores

De barra	A barra	Tensión kV	Tap	kVA	%R	%X
01:69-1	03:MILL-1	69:13.8	69.00	15000	0.4698	7.9862
50:GEN1	51:AUX	13.8:0.48	13.45	1500	0.9593	5.6694
05:FDR F	49:RECT	13.8:0.48	13.45	1250	0.7398	4.4388
05:FDR F	39:T3 SEC	13.8:4.16	13.11	1725	0.7442	5.9537
26:FDR G	29:T11 SEC	13.8:0.48	13.45	1500	0.8743	5.6831
06:FDR H	11:T4 SEC	13.8:0.48	13.80	1500	0.8363	5.4360
06:FDR H	19:T7 SEC	13.8:2.4	13.11	3750	0.4568	5.4810

Tabla 3.5. Datos de generación, carga, y tensiones en barra  
(resultados de un estudio de flujo de potencia)

Barra	V <sub>magnitud</sub> p.u.	$\delta$ grados	P <sub>generada</sub> kW	Q <sub>generada</sub> kvar	P <sub>carga</sub> kW	Q <sub>carga</sub> kvar
100:UTIL-69	1.000	0.00	7450	540	-	-
01:69-1	0.999	-0.13	-	-	-	-
03:MILL-1	0.994	-2.40	-	-	2240	2000
50:GEN1	0.995	-2.39	2000	1910	-	-
51:Aux	0.995	-3.53	-	-	600	530

Tabla 3.5. (Continuación)

Barra	$V_{\text{magnitud}}$ p.u.	$\delta$ grados	$P_{\text{generada}}$ kW	$Q_{\text{generada}}$ kvar	$P_{\text{carga}}$ kW	$Q_{\text{carga}}$ kvar
05:FDR F	0.994	-2.40	-	-	-	-
49:RECT	0.980	-4.72	-	-	1150	290
39:T3 SEC	0.996	-4.85	-	-	1310	1130
26:FDR G	0.994	-2.40	-	-	-	-
06:FDR H	0.994	-2.40	-	-	-	-
11:T4 SEC	0.979	-3.08	-	-	370	330
19: T7 SEC	1.001	-4.69	-	-	2800	2500
29:T11 SEC	0.981	-4.16	-	-	810	800

Tabla 3.6. Datos de fuente de corriente armónica

Orden de armónica h	Porcentaje %	Angulo relativo en grados
1	100.00	0.00
5	18.24	-55.68
7	11.90	-84.11
11	5.73	-143.56
13	4.01	-175.58
17	1.93	111.39
19	1.39	68.30
23	0.94	-24.61
25	0.86	-67.64
29	0.71	-145.46
31	0.62	176.83
35	0.44	97.40
37	0.38	54.36

Los datos adicionales de los componentes del sistema se encuentran en el anexo B. Para el presente estudio los datos en coordenadas de fase son obtenidos a partir de los datos en secuencia positiva, en forma análoga al caso analizado anteriormente.

### 3.2.2 Análisis de impedancia en barras

Un punto de interés para el análisis de impedancias es la barra de conexión del rectificador, cuyo diagrama se muestra en la fig. 3.23.

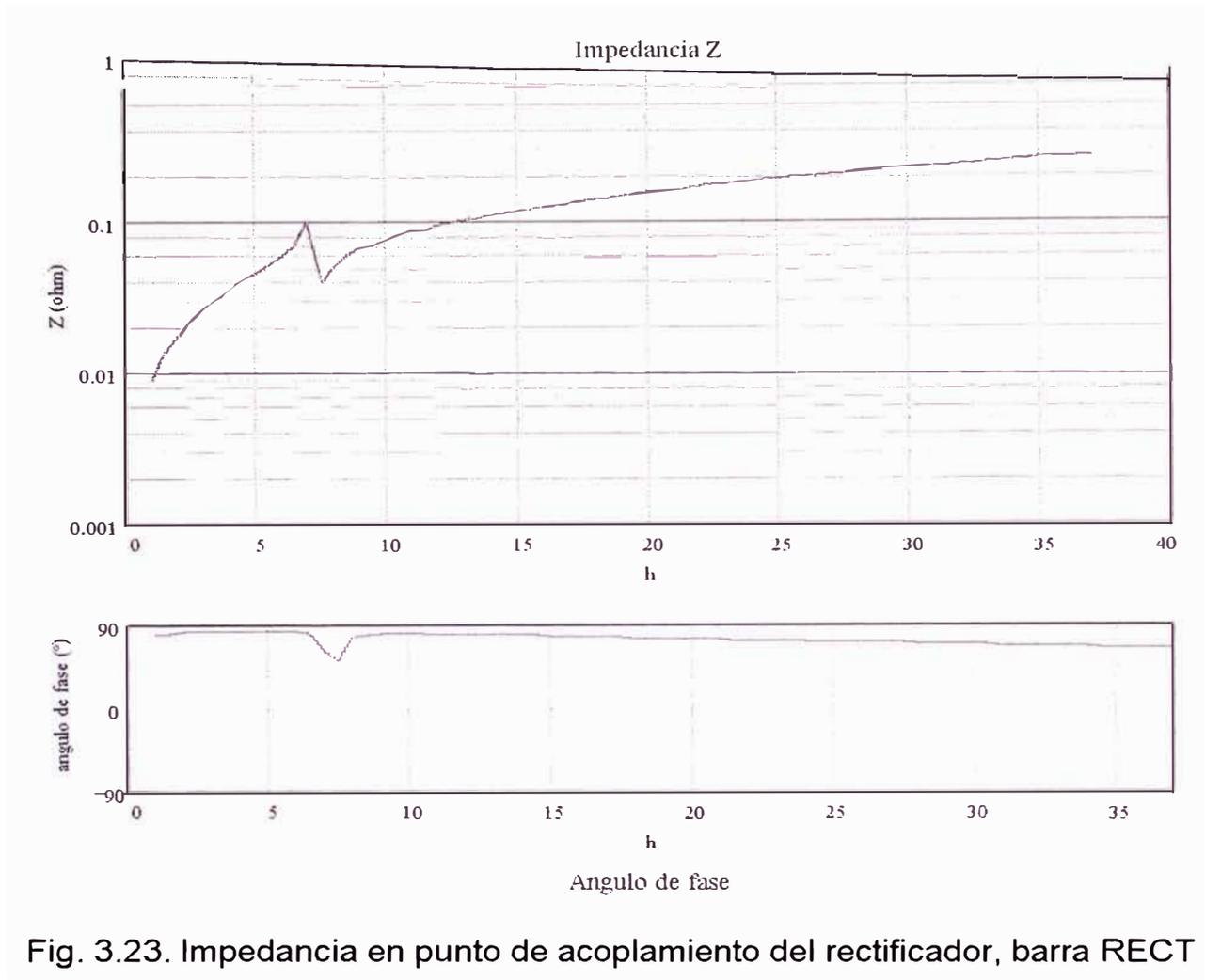


Fig. 3.23. Impedancia en punto de acoplamiento del rectificador, barra RECT

Esta figura muestra un punto resonante serie alrededor de la 7<sup>a</sup> armónica, por el efecto predominante de la inductancia del transformador, que proporciona la tendencia creciente de la magnitud de la impedancia.

A fin de analizar los efectos que originarán las corrientes inyectadas por el convertidor en la barra RECT sobre otras barras en el sistema, se dan los diagramas de impedancia de transferencia entre la barra RECT y las barras MILL-1 y T4\_SEC en las figuras 3.24. y 3.25., que ilustran los efectos en la barra de alimentación de los transformadores y en otra carga en baja tensión respectivamente.

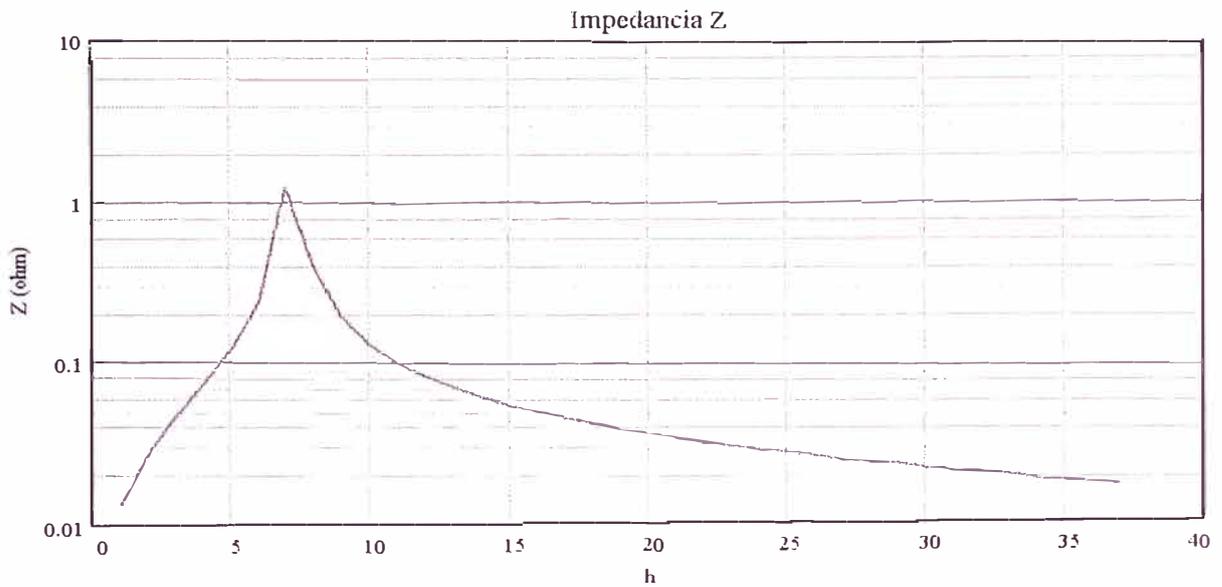


Fig. 3.24. Impedancia de transferencia entre barras RECT y MILL-1

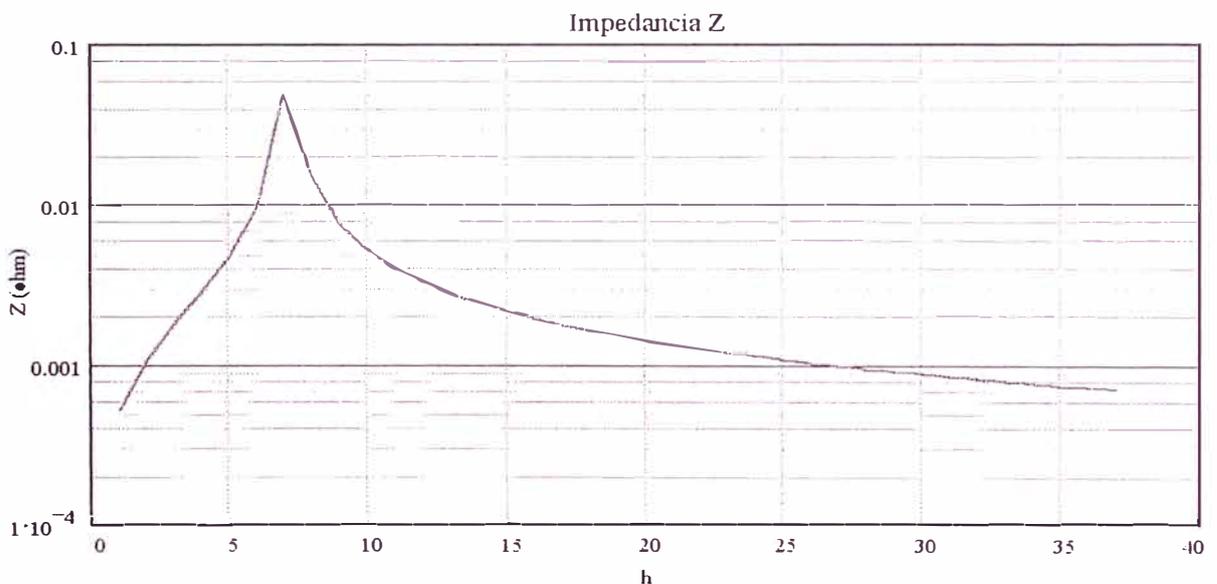


Fig. 3.25. Impedancia de transferencia entre barras RECT y T4\_SEC

De estos dos gráficos es posible observar la resonancia en la 7ª armónica, y teniendo en cuenta que la 7ª armónica se encuentra presente en el espectro de corrientes del rectificador, es posible afirmar que ocasionará distorsiones apreciables en ambas barras, lo que se puede apreciar con mas

detalle del espectro de tensiones en las barras MILL y T4\_SEC mostradas en la fig. 3.27 y fig. 3.28.

Un aspecto que no es posible apreciar en lo que se refiere a impedancias de transferencia, es el efecto de los grupos de conexión de los transformadores, especialmente conexiones que evitan la transferencia de corrientes armónicas de un lado del transformador a otro, como es el caso de los transformadores Delta - Estrella utilizados en este caso. Ejemplo de ello es el diagrama de impedancia de transferencia entre la barra del rectificador RECT y la barra MILL-1. Al observar el diagrama, se podría afirmar que existirá transferencia entre ambas barras de una armónica múltiplo de tres, hecho que no es posible en un sistema equilibrado con un transformador Delta - Estrella involucrado debido a que el devanado en delta atraparé las armónicas múltiplos de tres.

El obtener el diagrama de impedancia utilizando la representación del sistema por coordenadas de fase y considerando tres fuentes de corriente unitarias conectadas a cada fase de la barra donde se desee determinar la impedancia, hace posible obtener los términos de impedancia de transferencia incluyendo el efecto de las conexiones del transformador, es así que el diagrama de transferencia entre RECT y MILL-1 toma la forma mostrada en la fig. 3.26.

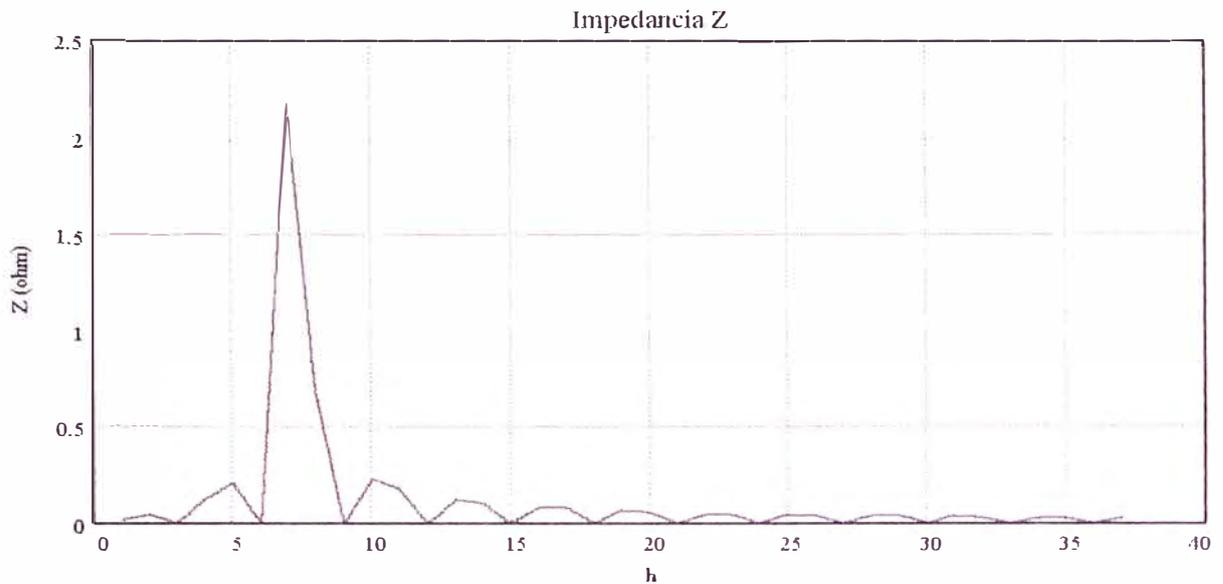


Fig. 3.26. Impedancia de transferencia entre barras RECT y T4\_SEC

### 3.2.3 Espectro de tensiones en barras

El efecto de la corriente del rectificador en la distorsión de la tensión en las barras se muestra en la forma de espectros para las barras MILL y T4\_SEC, se aprecia que las armónicas dominantes son la 5ª y 7ª, por lo que serán las que se consideren principalmente en este análisis.

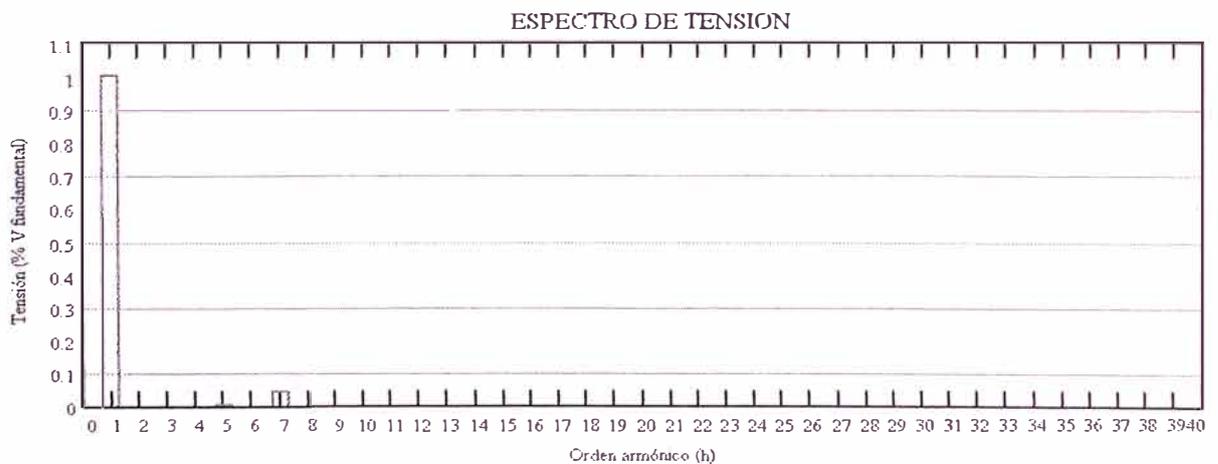


Fig. 3.27. Espectro de tensiones en barra MILL (THD = 4.7%)

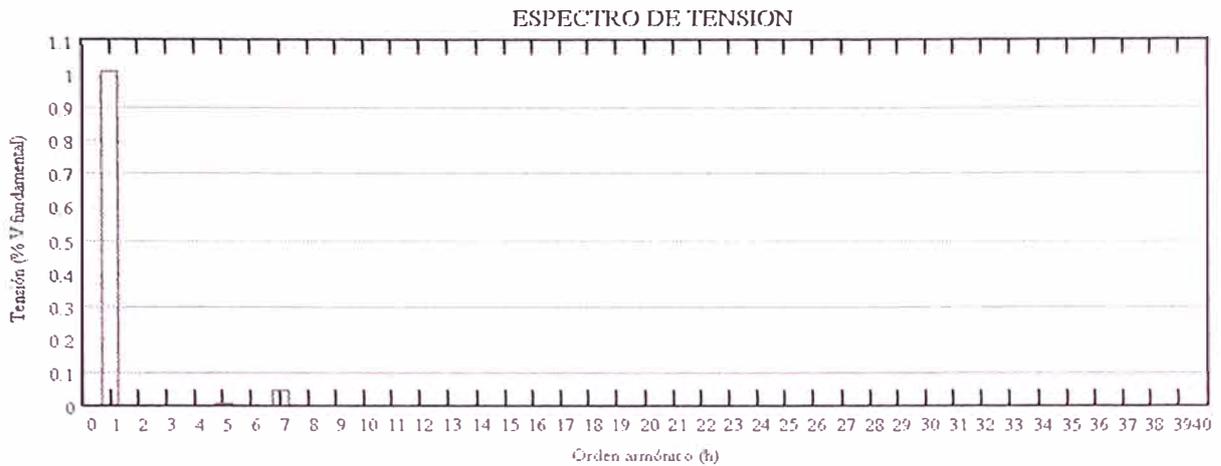


Fig. 3.28. Espectro de tensiones en barra T4\_SEC (THD = 4.8%)

A fin de comparar con los resultados referenciales del sistema de prueba del IEEE, se muestran en las tablas 3.3 y 3.4 las tensiones línea - neutro de las armónicas 5<sup>a</sup> y 7<sup>a</sup>.

Tabla 3.7. Tensiones en barras para la 5<sup>a</sup> armónica

TENSION ARMONICA EN BARRAS

ARMONICA : 5

FRECUENCIA : 300.0

Bar Name	Va (ang)	Vb (ang)	Vc (ang)
GEN	52.70052 ( 133.7)	52.70052 (-106.3)	52.70052 ( 13.7)
UTIL	43.02863 ( -73.3)	43.02863 ( 46.7)	43.02863 ( 166.7)
AUX	1.75536 ( -16.6)	1.75536 ( 103.4)	1.75536 (-136.6)
69-1	43.53902 ( -73.4)	43.53902 ( 46.6)	43.53902 ( 166.6)
MILL	54.50279 ( 133.5)	54.50279 (-106.5)	54.50279 ( 13.5)
FDR_F	55.04695 ( 133.5)	55.04695 (-106.5)	55.04695 ( 13.5)
FDR_G	54.49180 ( 133.5)	54.49180 (-106.5)	54.49180 ( 13.5)
FDR_H	54.47322 ( 133.5)	54.47322 (-106.5)	54.47322 ( 13.5)
RECT	12.56596 ( -16.7)	12.56596 ( 103.3)	12.56596 (-136.7)
T3_SEC	15.24832 ( -17.2)	15.24832 ( 102.8)	15.24832 (-137.2)
T11_SEC	1.78831 ( -16.8)	1.78831 ( 103.2)	1.78831 (-136.8)
T4_SEC	1.84645 ( -16.6)	1.84645 ( 103.4)	1.84645 (-136.6)
T7_SEC	8.77526 ( -17.1)	8.77526 ( 102.9)	8.77526 (-137.1)

Tabla 3.8. Tensiones en barras para la 7ª armónica

TENSION ARMONICA EN BARRAS			
ARMONICA : 7			
FRECUENCIA : 300.0			
Bar Name	Va (ang)	Vb (ang)	Vc (ang)
GEN	358.55254 (-159.9)	358.55254 ( 80.1)	358.55254 ( -39.9)
UTIL	293.28281 ( 54.3)	293.28281 ( -65.7)	293.28281 ( 174.3)
AUX	11.93431 ( -10.0)	11.93431 (-130.0)	11.93431 ( 110.0)
69-1	296.76021 ( 54.2)	296.76021 ( -65.8)	296.76021 ( 174.2)
MILL	370.81177 (-160.1)	370.81177 ( 79.9)	370.81177 ( -40.1)
FDR_F	371.14253 (-160.0)	371.14253 ( 80.0)	371.14253 ( -40.0)
FDR_G	370.73730 (-160.1)	370.73730 ( 79.9)	370.73730 ( -40.1)
FDR_H	370.61112 (-160.1)	370.61112 ( 79.9)	370.61112 ( -40.1)
RECT	21.08590 ( 8.2)	21.08590 (-111.8)	21.08590 ( 128.2)
T3_SEC	102.65636 ( -10.3)	102.65636 (-130.3)	102.65636 ( 109.7)
T11_SEC	12.15822 ( -10.2)	12.15822 (-130.2)	12.15822 ( 109.8)
T4_SEC	12.55708 ( -10.1)	12.55708 (-130.1)	12.55708 ( 109.9)
T7_SEC	59.62512 ( -10.3)	59.62512 (-130.3)	59.62512 ( 109.7)

Es de apreciar que en comparación a los resultados del sistema de prueba correspondientes a la 5ª armónica, la diferencia es muy pequeña, mas no ocurre lo mismo con la 7ª armónica. Esta divergencia ocurre principalmente por ser un punto de resonancia, alrededor del cual, cualquier pequeña variación en los modelos utilizados pueden desplazar el pico de resonancia ligeramente, y dado la característica pronunciada de la característica de impedancia cerca a la resonancia puede originar cambios muy grandes en la magnitud de ésta, introduciendo error en los cálculos para dicha armónica. Este error cerca a las frecuencias de resonancia es una característica muy propia del método directo por inyecciones de corriente.

### 3.2.4 Flujo de corrientes

En las tablas 3.7 y 3.8 se muestra el flujo de los corrientes a través de los diferentes elementos del sistema. Asimismo se aprecian los espectros de

corriente para el transformador que alimenta el rectificador T\_RECT y el banco de condensadores PCF en las figuras 3.29 y 3.30 respectivamente.

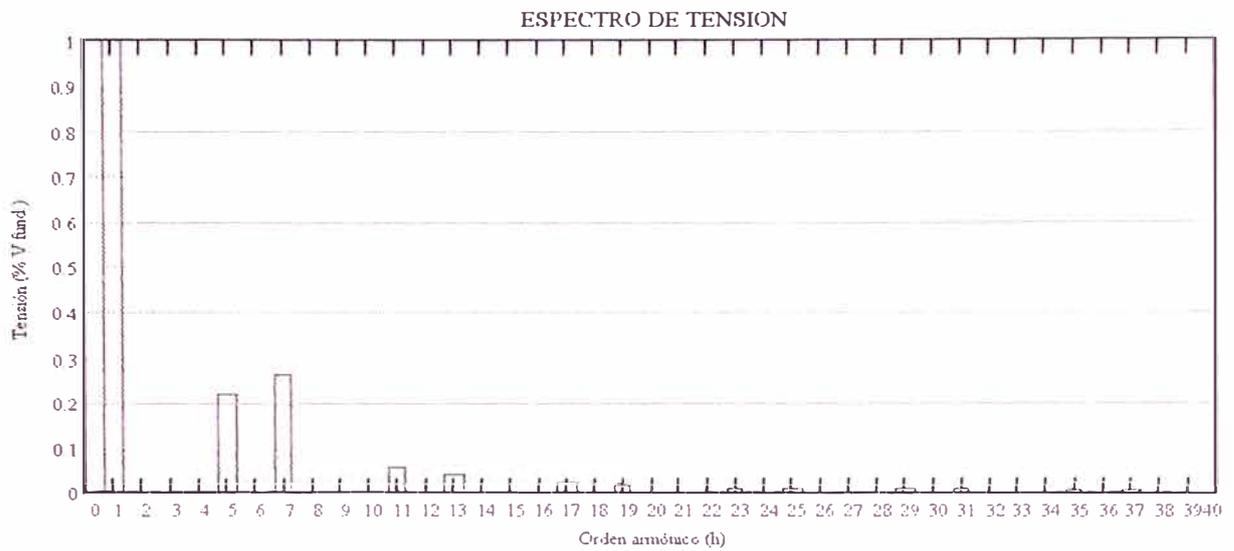


Fig. 3.29. Espectro de corrientes en secundario del transformador T\_RECT (THD = 34.5%)

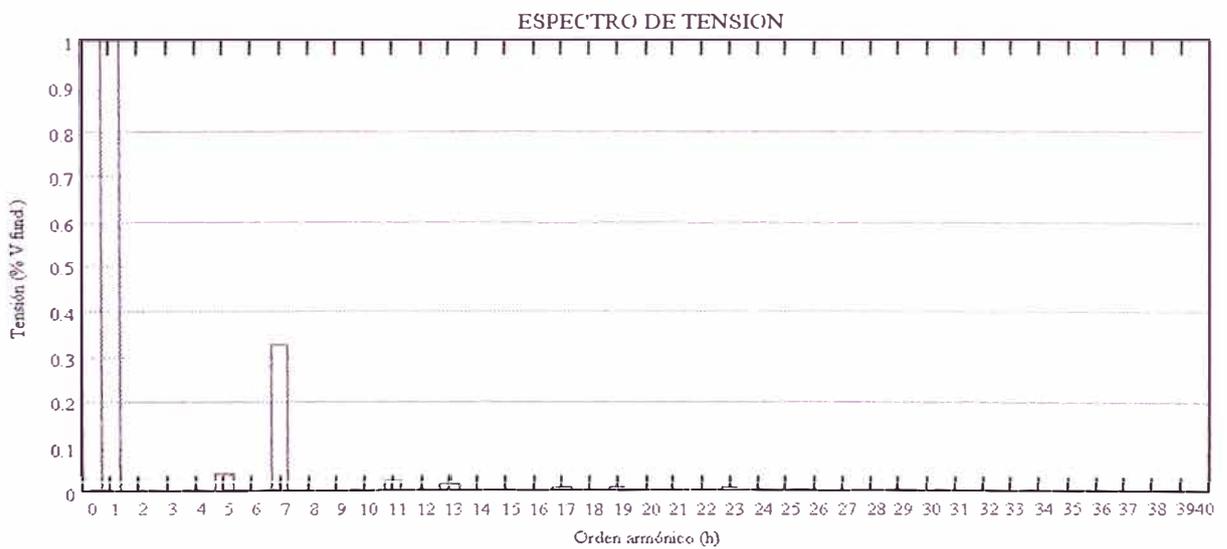


Fig. 3.30. Espectro de corrientes en banco de condensadores PCF (THD = 32%)

### 3.3 ANALISIS CON MULTIPLES FUENTES ARMONICAS

En sistemas eléctricos con múltiples fuentes armónicas, los ángulos de desfase entre las componentes armónicas de éstas son decisivos en el comportamiento de la red, teniendo muchas veces efectos aditivos en las corrientes armónicas en los ramales, como también pueden ocurrir efectos de cancelación total o atenuación de las mismas dependiendo de la diferencia de ángulos de fase en cada componente armónico.

Para ilustrar este caso y observar las ventajas del análisis en coordenadas de fase, se plantea una variante del caso anterior, pero en el que se consideran dos rectificadores idénticos conectados a la barra IND 2 a través de transformadores idénticos tal como se aprecia en la figura 3.31.

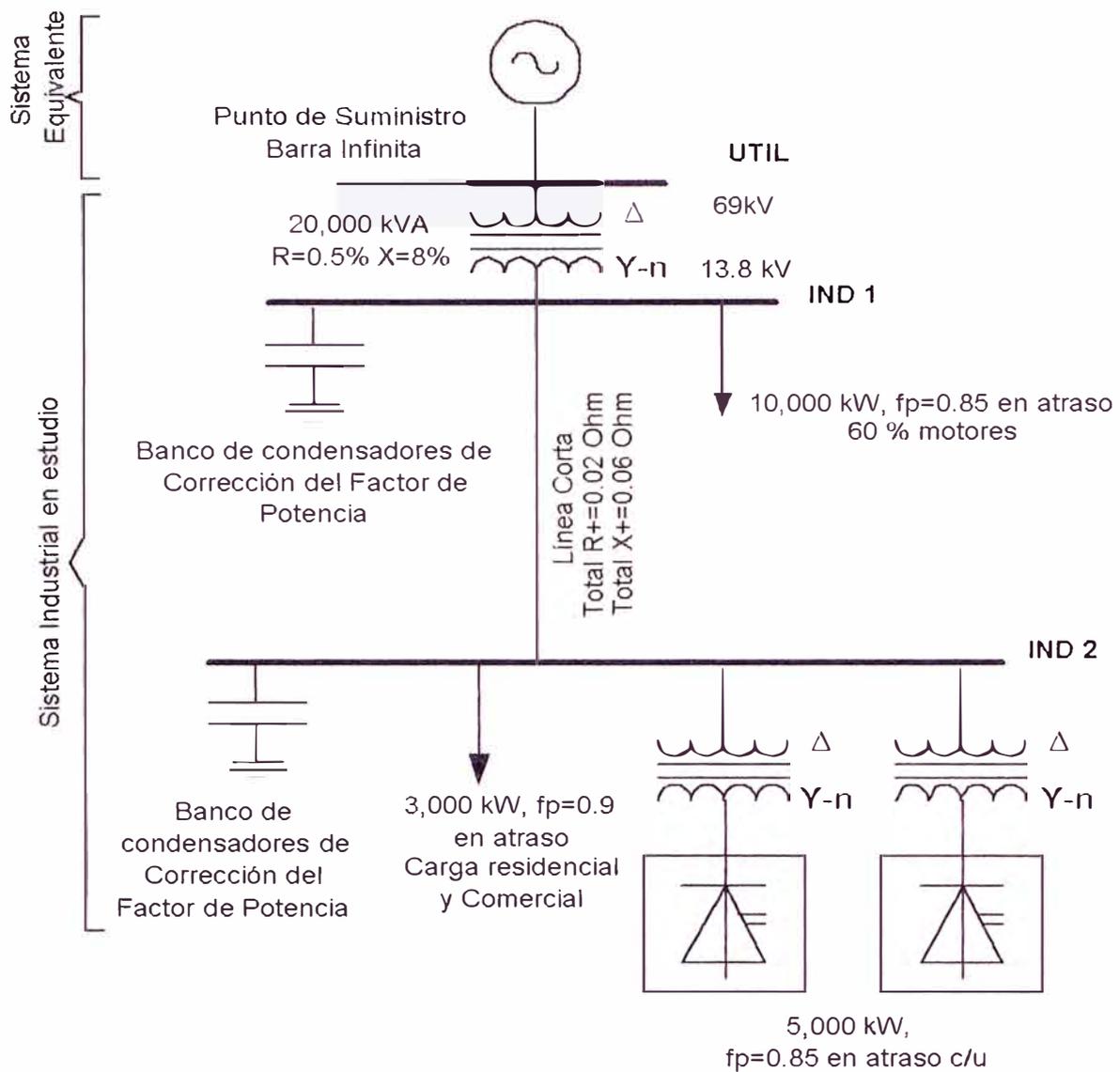
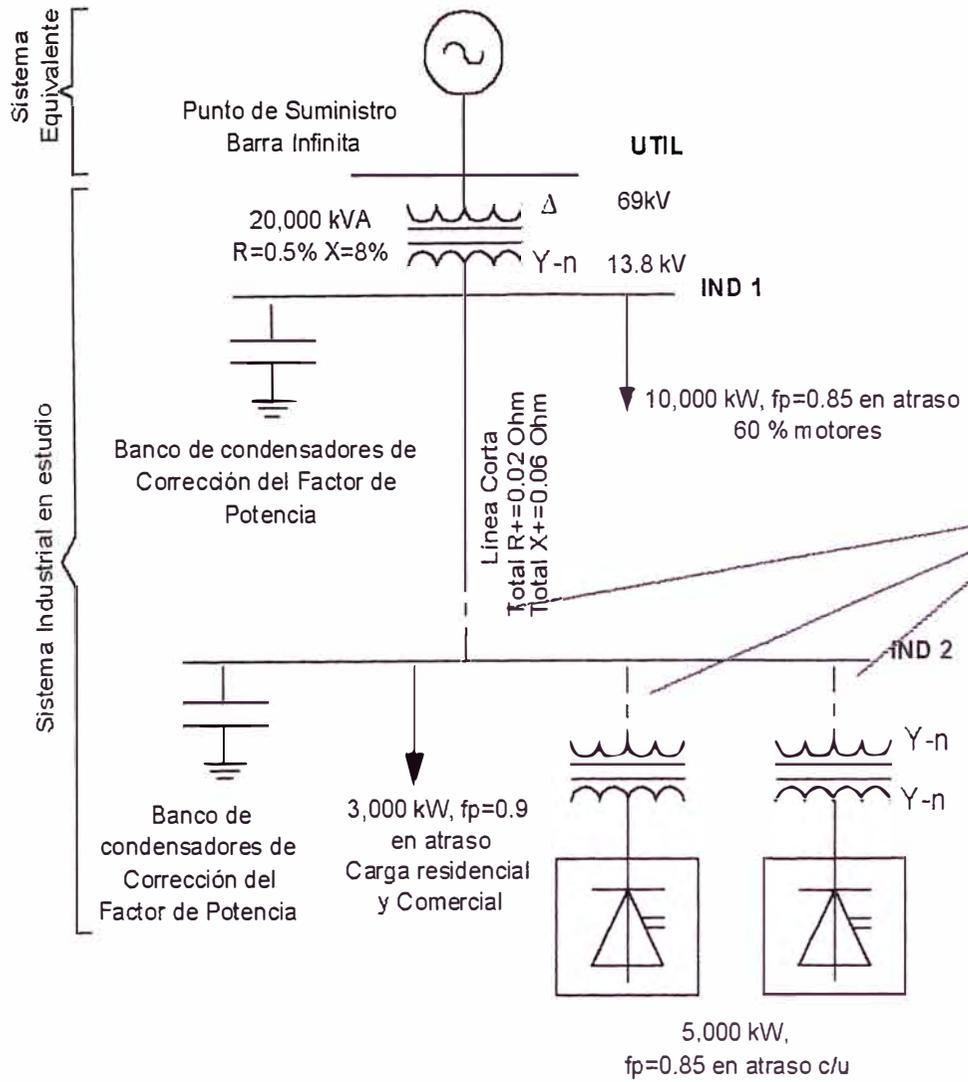


Fig. 3.31. Variante con dos convertidores idénticos.

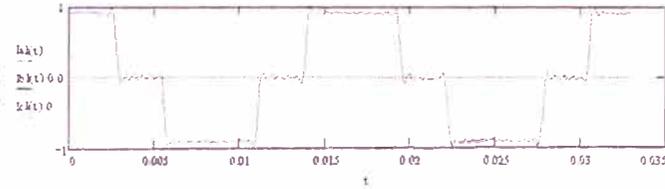
Consideremos los transformadores que alimentan a los convertidores idénticos, tanto en parámetros eléctricos así como en grupo de conexión, ambos YnYn0. Al ser los convertidores acoplados a IND 2 mediante transformadores iguales, la forma de onda de la corriente resultante de la suma de las corrientes de los convertidores no sufre alteración, manteniendo sus componentes



### Espectro característico del convertidor

H	5	7	11	13	17	19	23	25	29
%I <sub>c1</sub>	0.2	0.143	0.091	0.077	0.059	0.053	0.043	0.04	0.034
I <sub>ch</sub>	0.119	0.085	0.054	0.046	0.035	0.031	0.026	0.024	0.020
θ <sub>h</sub>	-π	0	-π	0	-π	0	-π	0	-π

h	31	35	37	41	43	47	49
%I <sub>c1</sub>	0.032	0.029	0.027	0.024	0.023	0.021	0.02
I <sub>ch</sub>	0.019	0.017	0.016	0.014	0.014	0.012	0.012
θ <sub>h</sub>	0	-π	0	-π	0	-π	0



6 MVA, 13.8 / 13.8

Fig. 3.32. Convertidores acoplados con transformadores idénticos.

armónicas, incluso duplicando su magnitud respecto al caso de un solo convertidor.

En este caso, la forma de onda de la corriente absorbida por los convertidores se muestra en la fig. 3.32. El espectro armónico de la tensión en IND 2 se muestra en la figura 3.33 así como la forma de onda correspondiente (fig. 3.34.), la cual posee un THD de 29.69% y un valor eficaz de 14.395 kV.

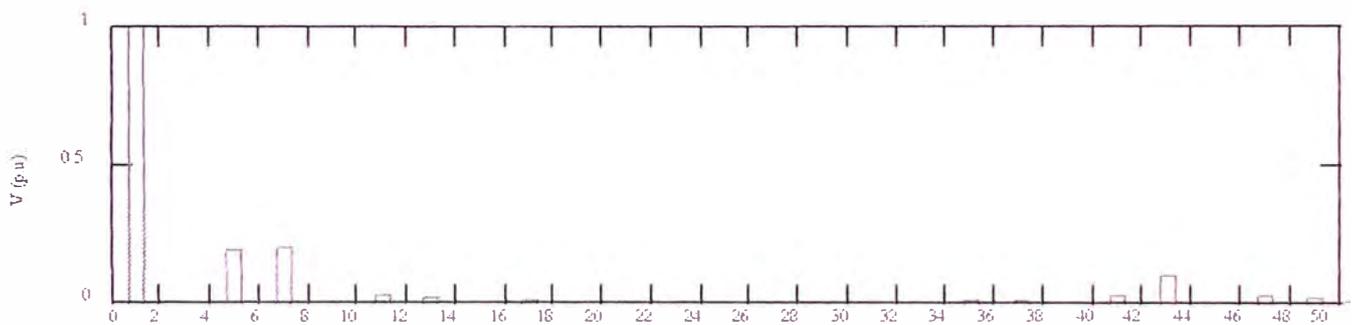


Fig. 3.33. Espectro de tensión en IND 2

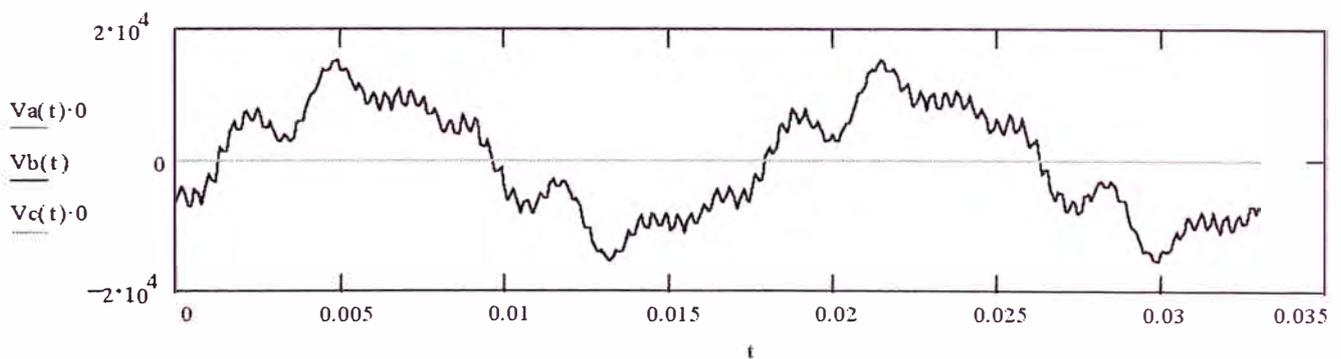


Fig. 3.34. Forma de onda de tensión en IND 2.

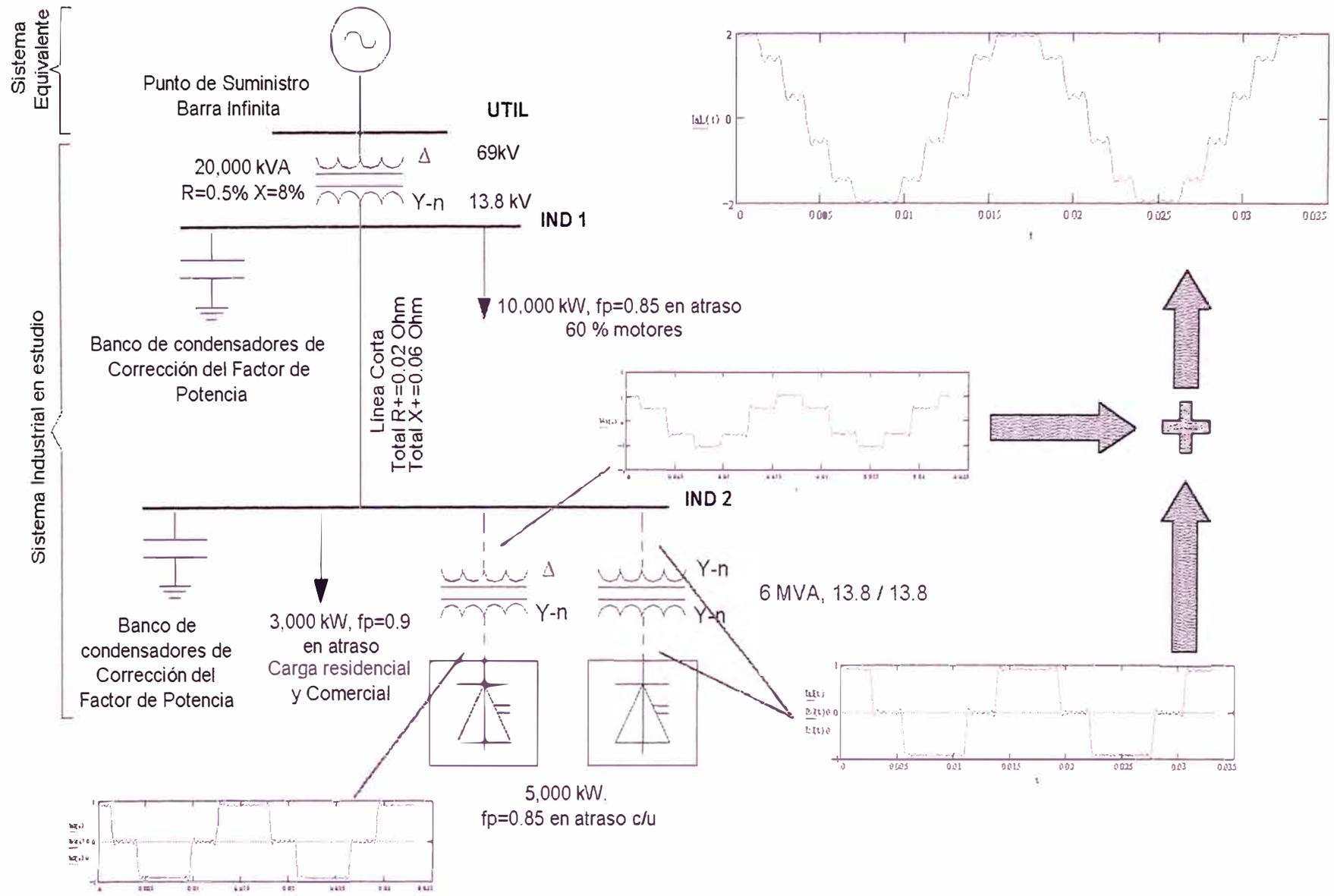


Fig. 3.35. Convertidores acoplados con transformadores idénticos.

Para ilustrar la importancia del modelo multifásico en el estudio de sistemas con múltiples fuentes armónicas, realizamos una variante en nuestro circuito, alimentando los dos convertidores con dos transformadores distintos en cuanto a grupo de conexión, uno del tipo YnYn y el otro Dyn. Estas conexiones alteran la forma de onda de las corrientes que se obtienen en los primarios de los transformadores. La forma de onda de la corriente resultante se acerca más a una forma de onda sinusoidal como se aprecia en la figura 3.35, lo que de antemano nos conlleva a una reducción de las armónicas.

A efectos de evaluar este tipo de conexión utilizando el programa desarrollado, se modifica el tipo de transformador y se efectúa un nuevo análisis en dominio de la frecuencia, obteniendo el espectro de tensión para esta nueva configuración, el cual se muestra en la fig. 3.36 y la forma de onda asociada en la fig. 3.37.

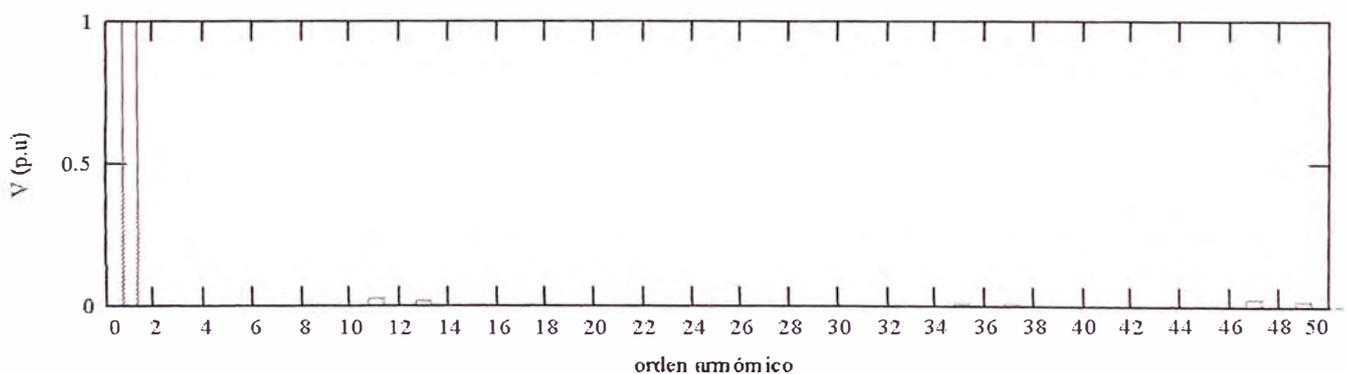


Fig. 3.36. Espectro de tensión en IND 2 con cancelación de armónicas

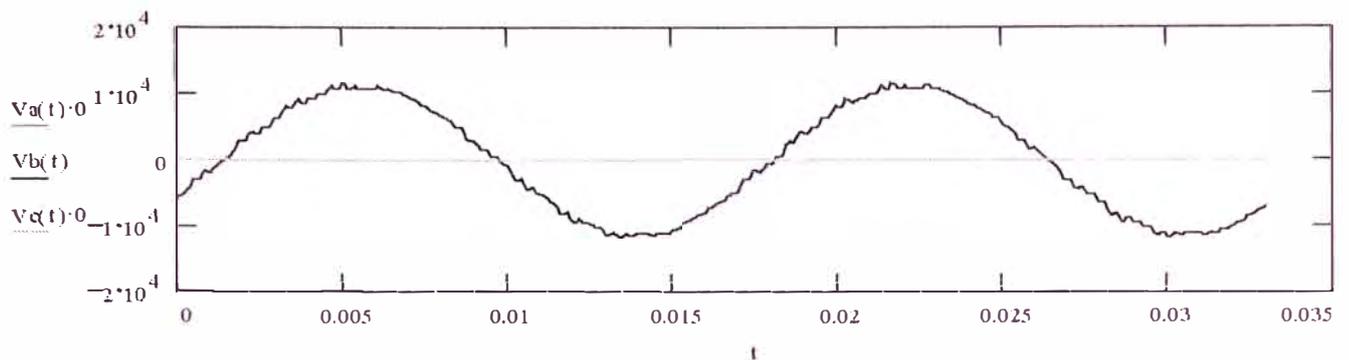


Fig. 3.37. Forma de onda de tensión en IND 2

En este caso se aprecia la cancelación de armónicas ( $5^{\circ}$  y  $7^{\circ}$ ) a consecuencia del desplazamiento de fase introducido por los transformadores de los convertidores en las corrientes armónicas inyectadas. Es por ello que la distorsión armónica total en este caso se reduce a un THD = 4.09% y valor eficaz de 13.81 kV.

## **CAPITULO IV CONCLUSIONES GENERALES**

Los resultados obtenidos mediante empleo del programa desarrollado comparados con los resultados de los sistemas de prueba dan resultados muy aproximados.

La metodología propuesta en coordenadas de fase permite considerar inyecciones armónicas desequilibradas ya que los modelos consideran los acoplamientos mutuos entre fases a una misma frecuencia.

Los resultados son muy sensibles a la exactitud de los modelos y parámetros considerados, influencia que es mucho mas notoria alrededor de los puntos de resonancia natural del sistema.

Es posible la obtención de diagramas de impedancia con transferencia nula de armónicos producidas entre los lados primario y secundario de transformadores que consideren conexiones, cuando la fuente armónica es trifásica equilibrada.

Se observa la amplificación del flujo de corrientes armónicas a frecuencias de resonancia en circuitos que comprenden bancos de condensadores y transformadores.

El conocimiento de las tensiones y corrientes armónicas en los elementos del sistema hace posible el cálculo del flujo de potencia reactiva

para cada orden armónico permitiendo la identificación de los circuitos involucrados en la resonancia.

Al utilizar operaciones matriciales directas para resolver el sistema hace posible considerar múltiples fuentes armónicas en el sistema.

La elección del método de bifactorización evita tener que calcular la inversa de toda la matriz de admitancia del sistema explícitamente, permitiendo el cálculo de los elementos que se requieran, disminuyendo los tiempos de solución.

Cualquier variaciones en la configuración y/o compensación reactiva de la red implica desplazamientos de las frecuencias naturales de resonancia del sistema, que pueden ser verificados mediante el uso del programa.

Un elevado índice de distorsión de tensión traducido en una forma de onda fuertemente distorsionada no implica una sobre - tensión en valores instantáneos.

El uso del método directo evita tener preocupación por problemas de convergencia al no necesitarse iteraciones.

El hecho modelar y resolver en dominio de la frecuencia, evita el uso de la transformada de Fourier para la obtención de la forma de onda de las señales, permitiendo utilizar simples series discretas de Fourier, evitando errores que pueden introducir estas transformaciones de rango continuo.

La utilización del método de coordenadas de fase permite modelar sistemas con neutro a tierra y con neutro aislado, con la precaución de evitar

la presencia de circuitos flotantes que llevarían a una singularidad al momento de obtener la matriz de impedancia nodal.

Las limitaciones principales de los modelos utilizados son:

Se asume que el régimen de operación del transformador es bajo condiciones nominales de tensión, por lo que no se considera las armónicas generadas en caso de saturación. Los modelos son no lineales en el dominio de la frecuencia, sin embargo para una determinada frecuencia todo el sistema se considera lineal. El modelo es válido para valores de frecuencia menores a la que corresponde a la primera resonancia del transformador a 7 kHz, a partir de la cual la capacidad parásita del transformador empieza a adquirir influencia.

No se considera al efecto de proximidad en conductores.

El sistema equivalente de redes, se modela como un circuito R - L simple, el cual no sería aplicable en caso que la red reemplazada tenga bancos de condensadores cercanos a la barra del sistema equivalente, en este caso es necesario una representación más detallada de la red externa.

Los modelos de las cargas y motores son consideradas como circuitos R - L lineales.

El método de inyección de corrientes utilizado no considera la interacción entre armónicas de diferentes ordenes.

El fundamento que permite la representación de un dispositivo no lineal como fuente ideal de corriente armónica ocurre cuando la tensión de alimentación al dispositivo, presenta distorsión entre el 5 % y 10 % [9], [22].

## REFERENCIAS

- [1] "Nonsinusoidal situations: Effects on the performance of meters and definitions of power," IEEE course tutorial 90 EH0237-7-PWR, IEEE, New York, 1990
- [2] IEEE working group on nonsinusoidal situations: Effects on meter performance and definitions on power, "Practical Definitions for Powers in Systems with Non sinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, pp.79-101, January 1996.
- [3] "Harmonics modeling and simulation," IEEE Tutorial Course, IEEE, New York, 1998.
- [4] "Harmonics in industrial networks", Cahier Technique Schneider N°152, Roccia P., Quillon N. 1994
- [5] Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems P519A/D7 Task Force of the Harmonics Working Group (IEEE PES T&D Committee) and SCC22 - Power Quality. July, 2000.
- [6] IEEE Std 399 - 1997, "IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis", IEEE, New York, 1997.

- [7] IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "The 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, pp. 452 - 465, January 1996.
- [8] Arrillaga, J., Smith, B. C., Watson, N. R, Watson, A. R, "Power System Harmonic Analysis," John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [9] IEEE Std 519 - 1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems," IEEE, New York, 1993.
- [10] Valcarcel, M., Mayordomo, J. G., "Harmonic Power Flow for Unbalanced Systems," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 8, N° 4, pp. 2052 - 2059, October 1993.
- [11] Mariños, Z., Pérez, L., "Análisis de Sistemas de Potencia en el Dominio de la Frecuencia y en Coordenadas de Fase. Parte 1: Modelos Matemáticos de los Componentes de la Red. Parte 2: Flujo de Armónicos en Sistemas de Potencia", sometido al X CONIMERAx, Lima Perú, October 1993.
- [12] Arrillaga, J., Bradley, D., and Boger, P. S., "Power Systems Harmonics," John Wiley & Sons, Ltd., England, 1985.
- [13] Berman, A., Xu, W., "Analysis of Faulted Power Systems by Phase Coordinates," IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 13, N° 2x, pp. 587 - 595, October 1993.

- [14] Mahmoud Aly A., Shultz Richard D., "A Method for Analyzing Harmonic Distribution in A.C. Power Systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS -101, N° 6, June 1982.
- [15] H.W. Dommel, "Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP Theory Book)", Prepared for Bonneville Power Administration, Dept. of Electrical Engineering, University of British Columbia, Vancouver, Aug. 1986.
- [16] Washington L. A., Neves, Hermann W. Dommel, Wilsun Xu, "Practical Distribution Transformer Models for Harmonic Studies", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, N° 2, pp. 906 - 912, April 1995.
- [17] Report of the IEEE Task Force on the Effects of Harmonic on Equipment, "Effects of Harmonics on Equipment", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, N° 2, April 1993.
- [18] Deri, A., Tevan, G., Semlyen, A., Castanheira, A., "The Complex Ground Return Plane. A Simplified Model for Homogeneous and Multi-layer Earth Return", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, N° 8, August 1981.
- [19] Semlyen, A., Deri, A., "Time Domain Modelling of Frequency Dependent Three-phase Transmission Line Impedance", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, N° 6 August 1985.

- [20] P. M. Anderson, "Analysis of Faulted Power Systems", IEEE PRESS Power System Engineering Series, 1995.
- [21] "Section 4: Power System Matrices and Matrix Operations" EE394J and EE369, W. Mack Grady The University of Texas at Austin. Austin, Texas 78712, fall 1998.
- [22] Dugan, R. C., McGranahan, F. M., and Beaty, H. W., "Electrical Power Systems Quality," New York: McGraw - Hill, 1996.
- [23] Modeling & Simulation of Power System Harmonics CD-ROM Edited by Aysen Arsoy, S. Mark Halpin, Yilu Liu, Paulo F. Ribeiro, IEEE No. EC102-QIA, ISBN 0-7803-4597-5, 1999.
- [24] Miller, T. J. E., "Reactive Power control in Electric Systems", General Electric Company Corporate Research and Development Center, Schenectady, New York, John Wiley & Sons 1982.
- [25] Handout 1, Handout 2,"Tutorial on Harmonics Modeling and Simulation", by IEEE Power Engineering Society, Task Force on harmonics Modeling and Simulation, 1998
- [26] IEEE Task Force on Harmonics Modeling and Simulation, "The Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks Part II: Concepts, Models and Simulation Techniques," IEEE transactions on Power Delivery, Vol. 11, N° 1, pp. 452 - 465, January 1996.

- [27] IEEE Distribution Planning working Group Report, "Radial Distribution Test System," IEEE Trans. On Power Systems, vol. 6, N° 3, pp. 975 - 985, Aug. 1991.
- [28] Arrillaga, J., Arnold C. P., Harker B. J., "Computer Modelling of Electrical Power Systems," John Wiley & Sons, Ltd., England, 1983.

## ANEXO A

### REFERENCIA DE COMANDOS

#### BUSBAR

---

**Descripción:** Definición de una barra del sistema (nodo).

**Sintaxis:**

BUSBAR [Nombre] [Desc]

Donde:

Nombre : Nombre de la barra  
Desc : Descripción corta

**Ejemplo:**

Barra denominada BAR\_1 con descripción "Barra 10 kV "

```
BUSBAR BAR_1 Barra 10 kV
```

#### SHUNT

---

**Descripción:** Definición de un componente conectado a una sola barra, que está conformado por una resistencia en serie con un elemento reactivo (Inductancia o capacidad).

**Terminales:** Uno.

**Sintaxis:**

SHUNT [Nombre] [Barra] [C/L] [Z/Y] [Valor Real] [Valor Imag] [fo]

Donde:

Nombre : Nombre del elemento  
Barra : Nombre de la barra a la que será conectado  
C/L : Especifica el tipo de elemento reactivo a ser conectado en serie con la resistencia. C: Condensador ; L: Inductancia.

- Z/Y : Indica si los valores introducidos a continuación [Valor Real] y [Valor Imaginario] representan una admitancia (Y) o una impedancia compleja (Z).
- Valor Real : Valor numérico correspondiente a la parte real de la admitancia o impedancia a frecuencia fo en ohms.
- Valor Imag : Valor numérico correspondiente a la parte imaginaria de la admitancia o impedancia a frecuencia fo en ohms.
- fo : frecuencia a la cual se han establecido los dos valores anteriores en Hz.

### Ejemplo:

Circuito en estrella R-L conectado a barra *BAR 3* con impedancia compleja  $52.3 + 24.833j$  ohms a 60 Hz.

```
SHUNT RL BAR 3 L Z 51.3 24.833 60
```

## SUPPLY

---

**Descripción:** Definición de equivalente R-L de sistemas externos en base a la potencia de cortocircuito en la barra de conexión.

**Terminales:** Uno.

### Sintaxis:

```
SUPPLY [Nombre] [Barra] [Vn] [MVAcc] [R/X] [Fo]
```

Donde:

- Nombre : Nombre del elemento.
- Barra : Nombre de la barra a la que será conectado..
- Vn : Tensión nominal de la barra [kV].
- MVAcc : Potencia de cortocircuito en la barra [MVA]
- R/X : Relación R/X de la impedancia equivalente de la red e base a la potencia de cortocircuito.
- Fo : frecuencia a la cual se han establecido los valores anteriores [Hz]

### Ejemplo:

Conexión con un sistema externo en barra *BAR\_3* de 10 kV con potencia de cortocircuito de 500 MVA y relación  $R/X = 0.1$  a 60 Hz.

```
SUPPLY EXT_SYS BAR_3 10 500 0.1 60
```

## TRAFOCIGRE

---

**Descripción:** Definición de modelo del transformador trifásico de dos devanados según recomendación de CIGRE

**Terminales:** Dos.

### Sintaxis:

```
TRAFOCIGRE [Nombre] [BarraP] [BarraS] [Sn] [Vp] [Vs] [Rcc] [Xcc] [fo] [Pcx]  
[Scx] [ind] [Rp]
```

Donde:

Nombre : Nombre del elemento.  
BarraP : Nombre de la barra a la que será conectado el primario.  
BarraS : Nombre de la barra a la que será conectado el secundario.  
Sn : Potencia nominal del transformador [MVA].  
Vp : Tensión nominal del primario [kV]  
Vs : Tensión nominal del secundario [kV]  
Rcc : Parte resistiva de la impedancia de cortocircuito [p.u].  
Xcc : Parte reactiva de la impedancia de cortocircuito [p.u].  
Fo : frecuencia a la cual se han establecido los valores anteriores [Hz]  
Pcx : Tipo de conexión del primario (Y, Yn, D)  
Scx : Tipo de conexión del secundario (Y, Yn, D)  
ind : Índice horario correspondiente a la conexión.  
Rp : Parámetro Rp del modelo CIGRE..

### Ejemplo:

Transformador trifásico conectado entre BAR\_1 y BAR\_2 de 20 MVA, relación 69 / 13.8 kV, 60 Hz, grupo Dyn11,  $Z_{cc} = 0.005 + 0.08 j$  p.u. y considerando parámetro  $R_p = 6.4$

```
TRAFOCIGRE Trafo1 BAR_1 BAR_2 20 69 13.8 0.005 0.08 60 D  
Yn 11 6.4
```

## SHORTLINE

---

**Descripción:** Definición de modelo de línea corta trifásica equilibrada en base a datos de secuencia positiva y negativa de la impedancia longitudinal. No incluye efectos de capacitancias.

**Terminales:** Dos.

### Sintaxis:

SHORTLINE [Nombre] [Barra1] [Barra2] [Zo\_Re] [Zo\_Im] [Z1\_Re] [Z1\_Im] [fo]

Donde:

Nombre : Nombre del elemento.  
Barra1 : Nombre de la barra a la que será conectado.  
Barra2 : Nombre de la barra a la que será conectado.  
Zo\_Re : Parte real del valor de la impedancia en secuencia cero de la línea (Ohm).  
Zo\_Im : Parte Imaginaria del valor de la impedancia en secuencia cero de la línea (Ohm).  
Z1\_Re : Parte real del valor de la impedancia en secuencia positiva de la línea (Ohm).  
Z1\_Im : Parte imaginaria del valor de la impedancia en secuencia positiva de la línea (Ohm).  
fo : frecuencia a la cual se han establecido los valores anteriores [Hz]

### Ejemplo:

Línea de transmisión corta con parámetros  $Z_0 = 0.02 + 0.0608j$  ;  $Z_1 = 0.02 + 0.0608j$  ;  $F = 60$  Hz entre barras BAR\_2 y BAR\_3

```
SHORTLINE Linea1 BAR_2 BAR_3 0.0 0.0608 0.0 0.0608 60
```

## HARMLoad

---

**Descripción:** Definición de modelo de línea corta trifásica equilibrada en base a datos de secuencia positiva y negativa de la impedancia longitudinal. No incluye efectos de capacitancias.

**Terminales:** Dos.

### Sintaxis:

HARMLOAD [Nombre] [Barra] [AmpBase] [Spec]

Donde:

Nombre : Nombre del elemento.  
Barra : Nombre de la barra a la que será conectado.  
AmpBase : Corriente correspondiente a 1 p.u. en el espectro de corrientes  
Spec : Ruta y nombre del archivo que contiene el espectro de corrientes inyectadas al sistema con datos de magnitud y ángulo para cada fase y para cada armónico.

**Nota:**

El archivo con los datos del espectro está formado por líneas con el siguiente formato:

[h] [mag\_a] [ang\_a] [mag\_b] [ang\_b] [mag\_c] [ang\_c]

que definen la inyección trifásica de cada armónico.

Donde:

h : Orden de la armónica  
mag\_x : Magnitud de la corriente inyectada en fase x [p.u.]  
ang\_x : Angulo de la corriente inyectada en fase x (°)

**Ejemplo:**

Fuente armónica en barra BAR\_3 con corriente fundamental 418 A (Base) y espectro según archivo d:Rect1.txt

```
HARMLOAD Harm1 BAR 3 418.0 d:\Rect1.txt
```

Contenido de Rect1.txt:

```
2 0.2 0 0.2 120 0.2 240
5 0.119 0 0.119 120 0.119 240
7 0.085 0 0.085 120 0.085 240
11 0.054 0 0.054 120 0.054 240
13 0.046 0 0.046 120 0.046 240
17 0.035 0 0.035 120 0.035 240
19 0.031 0 0.031 120 0.031 240
```

```
23 0.026 0 0.026 120 0.026 240
25 0.024 0 0.024 120 0.024 240
29 0.020 0 0.020 120 0.020 240
31 0.019 0 0.019 120 0.019 240
35 0.017 0 0.017 120 0.017 240
37 0.016 0 0.016 120 0.016 240
41 0.014 0 0.014 120 0.014 240
43 0.014 0 0.014 120 0.014 240
```

**#**

---

**Descripción:** Este símbolo antepuesto a cualquier comando ocasiona que el comando especificado se repita para los datos de las líneas siguientes hasta encontrar el comando #END, esto permite la creación de subsistemas del mismo tipo en bloque.

**Sintaxis:**

# [Comando] [Parámetros]

**/**

**Descripción:** Este símbolo antepuesto a cualquier línea de texto la convierte en un comentario y no es procesada por el módulo de creación de subsistemas, puede utilizarse para quitar temporalmente elementos del sistema

**Sintaxis:**

/ [Línea de texto}

# ANEXO B

## DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBA DE 2 BARRAS

Archivo texto con comandos para la definición del sistema de prueba de 2 barras (Base.txt).

```

/CASENAME Sistema de prueba 1
/CASECOMM Prueba simple

/-----
/ SISTEMA DE PRUEBA DE 2 BARRAS EQUILIBRADO
/ CASO BASE
/ -----

/ Definición de barras
#BUSBAR
/ ID      DESCRIPCION
/-----
  BAR_0   Barra Infinita
  BAR_1   Barra 1
  BAR_2   Barra 2
/-----
#END

/ BARRA INFINITA
/TYPE     Name  Barral  Vn   MVAcc  R/X   fo
/-----
Supply    Sup1  BAR_0   69   500000  0.1  60
/-----

/TYPE     Nombre Bar 1  Bar 2  Snom  Vp  Vs   Rcc   Xcc  fo Pcx Scx ind Rp
/-----
TrafoCIGRE Trafo1 BAR_0  BAR_1  20    69  13.8 0.005 0.08 60  D  Yn  5  6.4
/-----

/TYPE     Nombre Bar  Tipo Val  Real  Imag  fo
/-----
Shunt     PCF1    BAR_1  C    Z    0     -30   60
Shunt     ResPart BAR_1  L    Z    40.223 17.1  60
Shunt     MotPart BAR_1  L    Z    0.399  3.173 60
/-----

/TYPE     Nombre Bar 1  Bar 2  R+  X+  Ro  Xo  fo
/-----
ShortLine Lineal  BAR_1  BAR_2  0.02 0.06 0.02 0.06 60
/-----

/TYPE     Nombre Bar  Tipo Val  Real  Imag  fo
/-----
shunt     PCF2    BAR_2  C    Z    0     -41.75 60
shunt     RL     BAR_2  L    Z    51.3  24.833 60
/-----

Harmload  Harm1  BAR_2  -248.5 -31.78 d:\tesis\prog\Rect1.txt

```

Definición del espectro por unidad de corrientes armónicas de la carga Harm1 (archivo Rect1.txt)

5	0.200	-180	0.200	-300	0.200	-60
7	0.143	0	0.143	-120	0.143	120
11	0.091	-180	0.091	-300	0.091	-60
13	0.077	0	0.077	-120	0.077	120
17	0.059	-180	0.059	-300	0.059	-60
19	0.053	0	0.053	-120	0.053	120
23	0.043	-180	0.043	-300	0.043	-60
25	0.040	0	0.040	-120	0.040	120
29	0.034	-180	0.034	-300	0.034	-60
31	0.032	0	0.032	-120	0.032	120
35	0.029	-180	0.029	-300	0.029	-60
37	0.027	0	0.027	-120	0.027	120
41	0.024	-180	0.024	-300	0.024	-60
43	0.023	0	0.023	-120	0.023	120
47	0.021	-180	0.021	-300	0.021	-60
49	0.020	0	0.020	-120	0.020	120

## ANEXO C

### DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBA DE 13 BARRAS

Archivo texto con comandos para la definición del sistema de prueba IEEE de 13 barras (13Bus.txt).

```
/CASENAME Sistema de prueba de 13 barras equilibrado
/CASECOMM IEEE
```

```
#BUSBAR
```

```
/ ID      DESCRIPCION
/-----
GEN       Generador
UTIL      Punto de conexión a sistema
AUX       Auxiliar
69-1     Interconexión
MILL     Barra de S.E.
FDR_F    Fin de alimentador F
FDR_G    Fin de alimentador G
FDR_H    Fin de alimentador H
RECT     Conexión al rectificador
T3_SEC   Secundario de T3
T11_SEC  Secundario de T11
T4_SEC   Secundario de T4
T7_SEC   Secundario de T7
```

```
#END
```

```
/ SISTEMA EXTERNO
```

```
/TYPE      Name      Barral  Vn    MVAcc  R/X    fo
/-----
Supply     UTILITY  UTIL    69    1000   0.045  60
/-----
```

```
/PLANTA GENERADORA
```

```
/TYPE      Nombre  Bar    Tipo  Val    Real    Imag    fo
/-----
Shunt      INGEN   GEN    L     Z      0.0366  1.3651  60
/-----
```

```
/DATOS DE CABLES
```

```
#ShortLine
```

```
/Nombre  Bar 1  Bar 2  R+    X+    Ro    Xo    fo
/-----
L1       UTIL  69-1  0.02647 0.05637 0.02647 0.05637 60
L2       MILL  GEN    0.02323 0.04628 0.02323 0.04628 60
LF       MILL  FDR_F  0.01428 0.01200 0.01428 0.01200 60
LG       MILL  FDR_G  0.02990 0.02495 0.02990 0.02495 60
LH       MILL  FDR_H  0.02076 0.01733 0.02076 0.01733 60
/-----
```

```
#END
```

```
/TRANSFORMADORES
```

```
#TrafoCIGRE
```

```
/Nombre  Bar 1  Bar 2  Snom  Vp    Vs    Rcc    Xcc    fo  Pcx  Scx  ind  Rp
/-----
T69     69-1  MILL   15    69    13.8  0.004698 0.079862 60 D  Yn  5  6.38896
TAUX    GEN    AUX    1.5   13.80 0.48  0.009593 0.056694 60 D  Yn  5  4.53552
TRECT   FDR_F  RECT   1.25  13.80 0.48  0.007398 0.044388 60 D  Yn  5  3.55104
T3      FDR_F  T3_SEC 1.725 13.80 4.16  0.007442 0.059537 60 D  Yn  5  4.76296
T11     FDR_G  T11_SEC 1.5   13.80 0.48  0.008743 0.056831 60 D  Yn  5  4.54648
T4      FDR_H  T4_SEC 1.5   13.80 0.48  0.008363 0.054360 60 D  Yn  5  4.34880
T7      FDR_H  T7_SEC 3.75  13.80 2.4   0.004568 0.054810 60 D  Yn  5  4.38480
/-----
```

```
#END
```

/CARGAS OBTENIDAS DE FLUJO DE POTENCIA

#SHUNT

/Nombre	Bar	Tipo	Val	Real	Imag	fo
L_MILL	MILL	L	Z	47.30589	42.2374	60
L_AUX	AUX	L	Z	0.21570	0.19053	60
L_T3_SEC	T3_SEC	L	Z	7.57445	6.53369	60
L_T4_SEC	T4_SEC	L	Z	0.34682	0.30932	60
L_T7_SEC	T7_SEC	L	Z	1.14464	1.022	60
L_T11_SEC	T11_SEC	L	Z	0.14399	0.14221	60

#END

/CAPACITOR PARA COMPENSACION REACTIVA

/TYPE	Nombre	Bar	Tipo	Val	Real	Imag	fo
Shunt	PFC	MILL	C	Z	0	-31.74	60

harmload ASD RECT -1426.5 -14.06 D:\tesis\simula\13bus\rect.txt

Definición del espectro por unidad de corrientes armónicas de la carga Harm1 (archivo Rect.txt)

5	0.1824	-55.68	0.1824	-175.68	0.1824	64.32
7	0.1190	-84.11	0.1190	-204.11	0.1190	35.89
11	0.0573	-143.56	0.0573	-263.56	0.0573	-23.56
13	0.0401	-175.58	0.0401	-295.58	0.0401	-55.58
17	0.0193	111.39	0.0193	-8.61	0.0193	231.39
19	0.0139	68.30	0.0139	-51.70	0.0139	188.30
23	0.0094	-24.61	0.0094	-144.61	0.0094	95.39
25	0.0086	-67.64	0.0086	-187.64	0.0086	52.36
29	0.0071	-145.46	0.0071	-265.46	0.0071	-25.46
31	0.0062	176.83	0.0062	56.83	0.0062	296.83
35	0.0044	97.40	0.0044	-22.52	0.0044	217.48
37	0.0038	54.36	0.0038	-65.64	0.0038	174.36

# ANEXO D

## DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE PRUEBA CON 2 CONVERTIDORES

### D1. Con transformadores idénticos

Archivo texto con comandos para la definición del sistema de prueba de 2 convertidores (4bar.txt).

```

/CASENAME Sistema de prueba 1
/CASECOMM Prueba simple

/-----
/ SISTEMA DE PRUEBA DE 4 BARRAS EQUILIBRADO
/ EFECTO DE TRAFOS
/ Resultados Z4b_**
/ -----

/ Definición de barras
#BUSBAR
/ ID      DESCRIPCION
/-----
  BAR_0   Barra Infinita
  BAR_1   Barra 1
  BAR_2   Barra 2
  BAR_3   CONEXION CON CONVERTIDOR 1
  BAR_4   CONEXION CON CONVERTIDOR 2
/-----
#END

/ BARRA INFINITA
/TYPE      Name   Barral  Vn   MVAcc  R/X   fo
/-----
Supply     Sup1   BAR_0   69   500000  0.1   60
/-----

/TYPE      Nombre  Bar 1  Bar 2  Snom  Vp  Vs   Rcc   Xcc   fo  Pcx  Scx  ind  Rp
/-----
TrafoCIGRE Trafol  BAR_0  BAR_1  20    69  13.8  0.005  0.08  60  D   Yn   5   6.4
TrafoCIGRE Trafol  BAR_2  BAR_3   6    13.8  13.8  0.005  0.08  60  D   Yn   5   6.4
TrafoCIGRE Trafol  BAR_2  BAR_4   6    13.8  13.8  0.005  0.08  60  D   Yn   5   6.4
/-----

/TYPE      Nombre  Bar  Tipo  Val  Real  Imag  fo
/-----
Shunt      PCF1    BAR_1  C    Z    0     -30   60
Shunt      ResPart BAR_1  L    Z    40.223  17.1  60
Shunt      MotPart BAR_1  L    Z    0.399  3.173  60
/-----

/TYPE      Nombre  Bar 1  Bar 2  R+  X+  Ro  Xo  fo
/-----
ShortLine  Lineal  BAR_1  BAR_2  0.02  0.06  0.02  0.06  60
/-----

/TYPE      Nombre  Bar  Tipo  Val  Real  Imag  fo
/-----
shunt      PCF2    BAR_2  C    Z    0     -83.5  60
shunt      RL      BAR_2  L    Z    51.3  24.833  60
/-----

```

```
Harmload Harm1 BAR_3 418.0 0 d:\tesis\prog\Rect1.txt
Harmload Harm2 BAR_4 418.0 0 d:\tesis\prog\Rect1.txt
```

## D2. Con transformadores de diferente grupo de conexión

archivo 4barc.txt.

```
/CASENAME Sistema de prueba 1
/CASECOMM Prueba simple

/-----
/ SISTEMA DE PRUEBA DE 4 BARRAS EQUILIBRADO
/ EFECTO DE TRAFOS
/ PRUEBA DE CANCELACION DE ARMONNICAS
/ Resultados Z4b_**
/ -----

/ Definición de barras
#BUSBAR
/ ID      DESCRIPCION
/-----
  BAR_0   Barra Infinita
  BAR_1   Barra 1
  BAR_2   Barra 2
  BAR_3   CONEXION CON CONVERTIDOR 1
  BAR_4   CONEXION CON CONVERTIDOR 2
/-----
#END

/ BARRA INFINITA
/TYPE      Name  Barra1  Vn    MVAcc  R/X    fo
/-----
Supply     Sup1   BAR_0   69    500000  0.1    60
/-----

/TYPE      Nombre  Bar 1  Bar 2  Snom  Vp  Vs    Rcc    Xcc    fo  Pcx  Sex  ind  Rp
/-----
TrafoCIGRE Trafo1  BAR_0  BAR_1  20    69  13.8  0.005  0.08  60  D   Yn   5   6.4
TrafoCIGRE Trafo1  BAR_2  BAR_3  6     13.8 13.8  0.005  0.08  60  D   Yn   1   6.4
TrafoCIGRE Trafo1  BAR_2  BAR_4  6     13.8 13.8  0.005  0.08  60  Yn  Yn   0   6.4
/-----

/TYPE      Nombre  Bar  Tipo  Val  Real  Imag  fo
/-----
Shunt      PCF1    BAR_1  C     Z    0     -30    60
Shunt      ResPart BAR_1  L     Z    40.223 17.1   60
Shunt      MotPart BAR_1  L     Z    0.399 3.173  60
/-----

/TYPE      Nombre  Bar 1  Bar 2  R+  X+  Ro  Xo  fo
/-----
ShortLine  Lineal  BAR_1  BAR_2  0.02 0.06 0.02 0.06 60
/-----

/TYPE      Nombre  Bar  Tipo  Val  Real  Imag  fo
/-----
shunt      PCF2    BAR_2  C     Z    0     -83.5  60
shunt      RL      BAR_2  L     Z    51.3  24.833 60
/-----

Harmload Harm1 BAR_3 418.0 0 d:\tesis\prog\Rect1.txt
Harmload Harm2 BAR_4 418.0 -30 d:\tesis\prog\Rect1.txt
```

## ANEXO E

### HARMONIC CALCULATIONS ON A TWO BUS SYSTEM IEEE

Consider the industrial system of Figure 1. The system consists of two buses IND1 and IND2 connected through a short 3-phase, 4-wire line. The system is supplied by the utility through a 69kV/13.8 kV transformer. A line-commutated power-converter is connected on bus IND2. Calculate the harmonic voltage and THD on Buses IND1 and IND2.

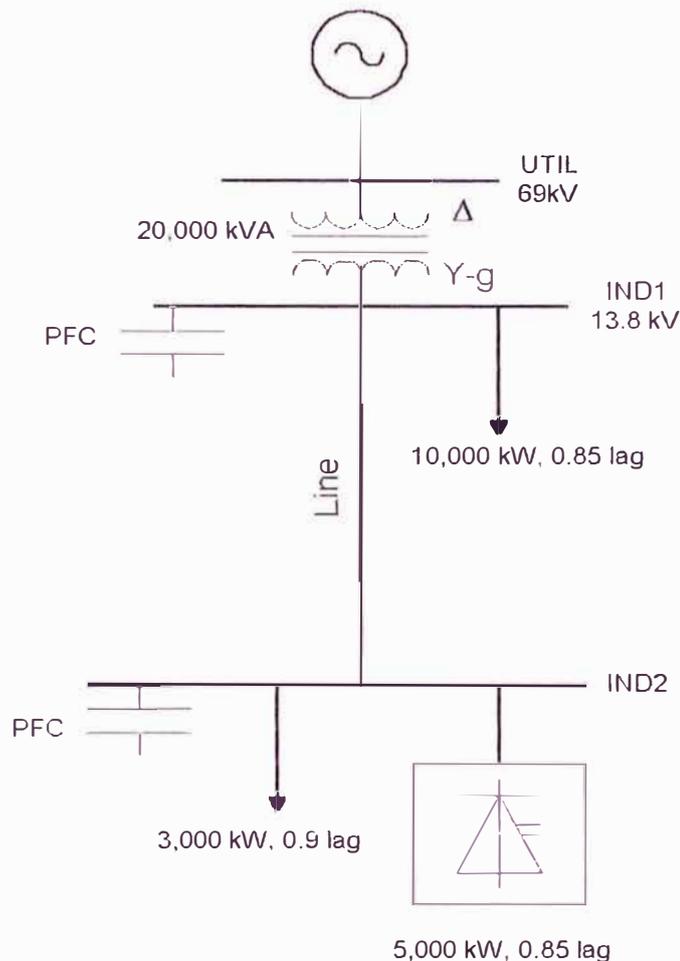


Fig. 1 Single line diagram of the example system.

The system data are as follows:

1. Utility: \_\_\_\_\_ 69 kV, infinite bus.
2. Transformer: \_\_\_\_\_ 69kV- $\Delta$ /13.8kV-Y-g, 20,000 kVA,  
R=0.5%, X=8%.
3. Line: \_\_\_\_\_ Short distribution line  
3-phase with ground wire:  
Total positive sequence R= 0.02  $\Omega$ ,  
Total positive sequence reactance X= 0.06  $\Omega$ .
4. Load on IND1: \_\_\_\_\_ 10,000 kW, 0.85 lag pf.

Of this load, 60% is motive.

5. Load on IND2: \_\_\_\_\_ 3,000 kW, 0.9 lag pf.

Largely residential and commercial.

6. Converter on IND2: \_\_\_\_\_ 3-phase line commutated rectifier .

5,000 kW, 0.85 lag pf.

The rectifier produces the full spectrum of its characteristic orders at their normal amplitude and phase. Non-characteristic harmonic orders are not produced.

7. Power factor correction

capacitors at IND1 and IND2: \_\_\_\_\_ Provide full compensation of the bus loads.

*A. Discussion:* The calculations will be done using the p.u. system equivalent. The base quantities are:

Power base=10,000 kVA

Impedance base (on the 13.8 kV side)=19Ω.

In this simple example, only positive and negative sequence harmonics will be considered. Thus, we will assume a symmetric and balanced system. Two methods of solution are presented and compared: Frequency domain using MatLab. Time domain using ATP. The associated files are available.

*B. Load-Flow Study:* The purpose of the load flow study is to obtain the fundamental frequency voltage magnitudes and phase angles. The former are used as basis to calculate THD. The latter are used to properly describe the phase-angle of the harmonic sources.

The system impedance is expressed in pu on the given basis. The system load-flow data are shown on Table 1. We assume that the utility voltage is 1 pu. The calculations to obtain the load-flow data including the pu system impedance are shown in the associated M-file. The load-flow solution is shown on Table 2. The load flow was solved using IPFLOW2.1.

Since in this system, only one harmonic source is present, the phase information from the load-flow solution is not critical. In addition, the system voltage is near 1.0 pu. Therefore we could have skipped the load-flow and proceeded to the harmonic calculations, using 1 pu as the base voltage for the THD calculation.

Table 1. Branch data.

From bus	To bus	R (pu)	X (pu)	Charging (pu)	Element Type
UTIL	IND1	0.0025	0.04	0	Transformer
IND1	IND2	0.0011	0.0032	0	Line

Table 2. Bus data.

Bus	P-gen	Q-gen	P-load	Q-load	Shunt	V	phase
UTIL	1.860	0.152	0	0	0	1.0	0.0
IND1	0	0	1.0	0.62	0.62	0.992	-4.16
IND2	0	0	0.8	0.455	0.455	0.991	-4.3

C. Harmonic Calculations in the Frequency Domain: The positive/negative sequence equivalent of the system harmonic impedance is shown in Figure 2 ( $h$  is the harmonic index). The system is balanced, therefore, the positive and negative sequence equivalents are identical. Thus, only one circuit is needed for the harmonic calculations.

The approach used for the system modeling is described in Chapter 3 of the tutorial. The detail calculations are shown here. With reference to Figure 2, each device is modeled as follows:

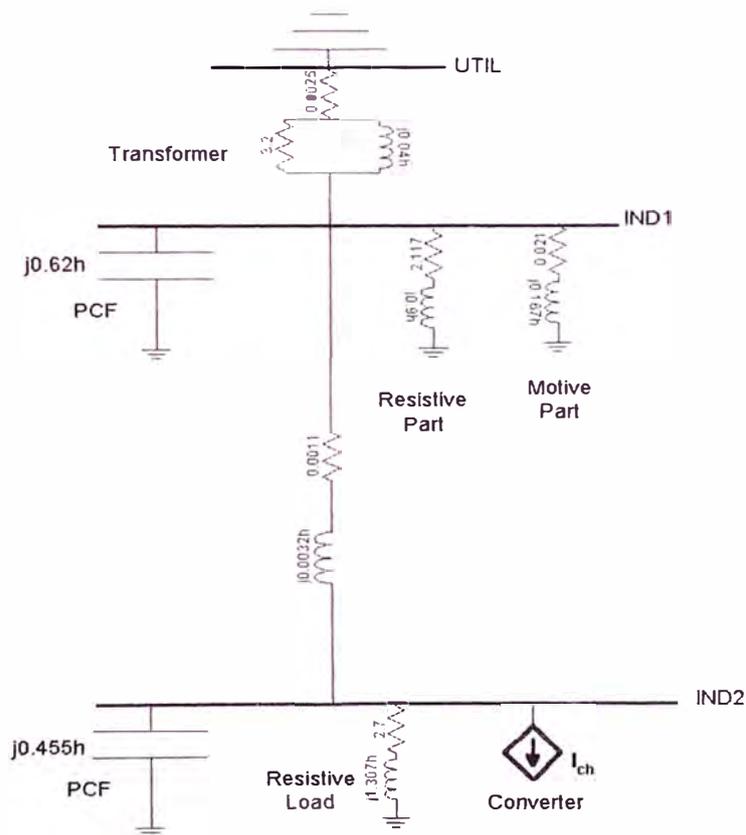


Fig. 2 Harmonic impedance diagram of the example system.

Utility system: The utility system is considered as infinite bus. Thus, it is a sinusoidal voltage source at fundamental frequency with zero impedance. At frequencies above the fundamental, the utility system is represented by a short circuit at Bus UTIL.

**Transformer:** The transformer is represented by a combination of series and parallel impedance between Buses UTIL and IND1. With reference to Figure 2, the values of these elements, at the  $h^{th}$  harmonic order, are calculated directly from the fundamental-frequency series-impedance of the transformer:

Transformer series-impedance at fundamental: \_\_\_\_\_  $Z_T=R_T+jX_T=0.0025+j0.04$  pu.  
 Series-resistance in the harmonic equivalent: \_\_\_\_\_  $R_s=R_T=0.0025$  pu.  
 Parallel reactance: \_\_\_\_\_  $X_p=hX_T=0.04h$ .  
 Parallel resistance: \_\_\_\_\_  $R_p=80X_T=3.2$  pu.

Thus, the equivalent harmonic impedance of the transformer between UTIL and IND1 is given by (1).

$$Z_{Th} = R_s + \frac{h^2 X_T^2 R_p}{R_p^2 + h^2 X_T^2} + j \frac{h X_T R_p^2}{R_p^2 + h^2 X_T^2} \quad h > 1 \quad (1)$$

**Transmission line:** With reference to Figure 2, a simple representation is used for the line harmonic impedance. Since the line is of short length, the charging capacitance is neglected and only the series impedance is used (2).

$$Z_{Lh} = R_L + jhX_L = 0.0011 + j0.0032h \quad h \geq 1 \quad (2)$$

Where,  $R_L$  and  $X_L$  are, respectively, the pu series resistance and reactance of the line at fundamental frequency.

Equation (2) neglects the skin effect. This can be included by modifying the resistive part of the line impedance according to (3).

$$R_{Lh} = R_L \left[ 1 + \frac{0.646h^2}{192 + 0.518h^2} \right] \quad (3)$$

**Load at IND1:** The load of IND1 consists of 60% induction motors and of 40% resistive load (including coupling transformer reactance).

1. The motive part is represented by a series R-X circuit associated with locked-rotor impedance of the motor. This part is computed as follows:

Assume 0.8 lag as aggregate power factor for the motors.

Motor real power: \_\_\_\_\_  $P_M=0.6P_{IND1}=0.6$  pu.  
 $P_{IND1}$  is the total load on the bus.

Motor installed power (apparent power): \_\_\_\_\_  $S_M=P_M/(0.8)=0.75$  pu.

Assume a severity factor  $K_f=8$ . The severity factor is the ratio between the starting and the rated current of the motor. From that, the combined pu locked-rotor reactance of the motive part at fundamental frequency is calculated (4):

$$X_M = \frac{V^2}{K_f S_M} = \frac{1}{8 S_M} = 0.167 \text{ pu} \quad (4)$$

In (4) we assume 1 pu operating voltage for the motor.

The pu resistive part of the locked-rotor impedance is found by assuming a quality factor of 8 for the rotor circuit:

$$R_M = X_M / 8 = 0.021 \text{ pu.}$$

Thus, the motor harmonic impedance in Figure 2 is given by (5).

$$Z_{Mh} = 0.021 + j0.167h \quad (5)$$

2. The resistive part at IND1 is represented by a series R-X impedance. The impedance elements are calculated from the power consumption of the load as follows:

Power of resistive load: \_\_\_\_\_  $P_R = 0.4 P_{IND1} = 0.4 \text{ pu.}$

Reactive power: \_\_\_\_\_  $Q_R = Q_{IND1} - Q_M = 0.62 - 0.6 S_M = 0.17 \text{ pu.}$

Installed power of resistive part: \_\_\_\_\_  $S_R = 0.435 \text{ pu at } 0.92 \text{ lag } (\phi_R = 23^\circ.03).$

The pu value of the fundamental impedance that produces the same power under 1 pu voltage is:

$$Z_R = 1 / S_R = 2.3 \text{ pu.}$$

$$X_R / R_R = \tan(\phi_R) = 0.425.$$

Therefore: \_\_\_\_\_  $R_R = 2.117 \text{ pu, } X_R = 0.9 \text{ pu.}$

The load harmonic impedance at Bus IND1 is:

$$Z_{Rh} = 2.117 + j0.9h \quad (6)$$

Resistive load at IND2: Following the same procedure as with the load at IND1, the pu harmonic impedance of the load at IND2 is calculated as follows:

Load power and power factor: \_\_\_\_\_  $P_R = 0.3 \text{ pu @ } 0.9 \text{ lag } (\phi_R = 25^\circ.84).$

Installed power: \_\_\_\_\_  $S_R = P_R / 0.9 = 0.333.$

PU fundamental impedance: \_\_\_\_\_  $Z_R = 1 / S_R = 3 \text{ pu.}$

$$X_R / R_R = \tan(25^\circ.84).$$

$$R_R = 2.7 \text{ pu, } X_R = 1.307 \text{ pu.}$$

The load harmonic impedance is, therefore:

$$Z_{R2h} = 2.7 + j1.307h \quad (7)$$

**Power factor correction capacitors:** With reference to Figure 2, the PFCs are represented by their harmonic susceptance. The capacitor fundamental susceptance is found from the load flow data, since each capacitor fully compensates for the bus load.

**Line commutated converter at IND2:** With reference to Figure 2, the power converter is represented as a harmonic current source ejected from IND2. The converter produces the characteristic harmonic spectrum. Its fundamental current is found as follows:

Installed power: \_\_\_\_\_  $S_c = P_c / 0.85 = 0.588$  pu.  
 Fundamental current: \_\_\_\_\_  $I_{c1} = S_c / V_{IND2} = 0.594$  pu  
 (from load-flow  $V_{IND2} = 0.991$  pu).

The pu harmonic current of the converter is given in the following Table.

Table 3. Harmonic Currents of the line commutated converter.

h	5	7	11	13	17	19	23	25	29
% $I_{c1}$	0.2	0.143	0.091	0.077	0.059	0.053	0.043	0.04	0.034
$I_{ch}$	0.119	0.085	0.054	0.046	0.035	0.031	0.026	0.024	0.020
$\theta_h$	$-\pi$	0	$-\pi$	0	$-\pi$	0	$-\pi$	0	$-\pi$

Table 3 (continued)

h	31	35	37	41	43	47	49
% $I_{c1}$	0.032	0.029	0.027	0.024	0.023	0.021	0.02
$I_{ch}$	0.019	0.017	0.016	0.014	0.014	0.012	0.012
$\theta_h$	0	$-\pi$	0	$-\pi$	0	$-\pi$	0

**C.1 Method of Calculation.** The Nodal admittance matrix is used for the calculation of the system harmonic voltage. With reference to the circuit topology in Figure 2, at each frequency of the converter harmonic orders, this matrix is computed according to (8).

$$Y_h = \begin{bmatrix} \frac{1}{Z_{Th}} + \frac{1}{Z_{Lh}} + \frac{1}{Z_{Mh}} + \frac{1}{Z_{Rh}} + j0.62h & -\frac{1}{Z_{Lh}} \\ -\frac{1}{Z_{Lh}} & \frac{1}{Z_{Lh}} + \frac{1}{Z_{R2h}} + j0.455h \end{bmatrix} \quad (8)$$

Inverting the nodal admittance matrix we obtain the nodal impedance matrix at each harmonic order.

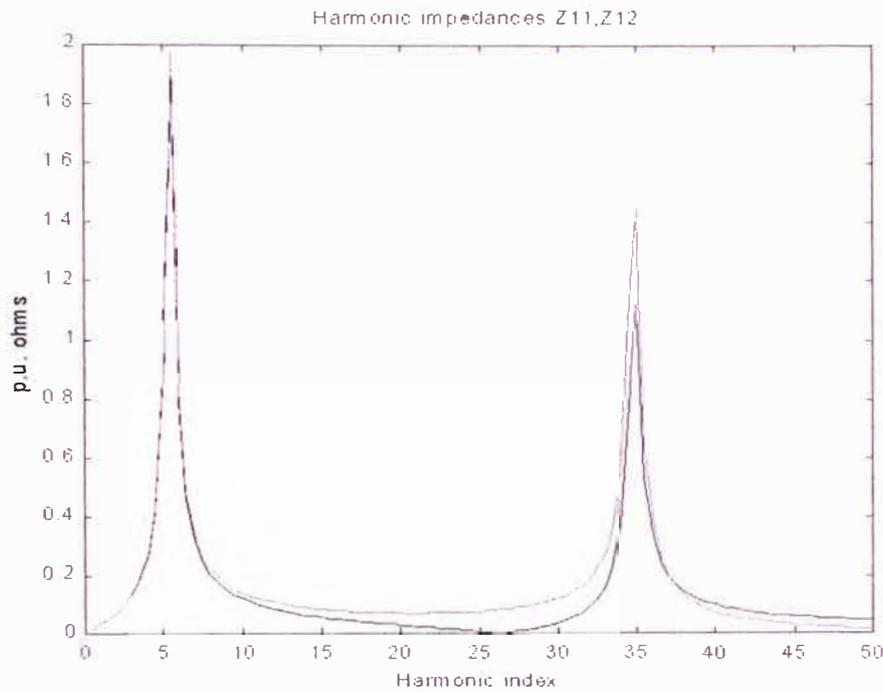
$$Z_h = Y_h^{-1} \quad (9)$$

Subsequently, the harmonic voltage at Bus IND1 (corresponding to row and column 1 of the matrices) is found using the transfer impedance,  $Z_h(1,2)$ , between Buses 2 and 1 (IND2 and IND1). The harmonic voltage at Bus IND2 (corresponding to row and column 2 of the matrices) is found using the driving point impedance,  $Z_h(2,2)$ , at Bus 2.

$$\begin{aligned}
 V_{IND1,h} &= Z_h(1,2)I_{ch} \\
 V_{IND2,h} &= Z_h(2,2)I_{ch}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

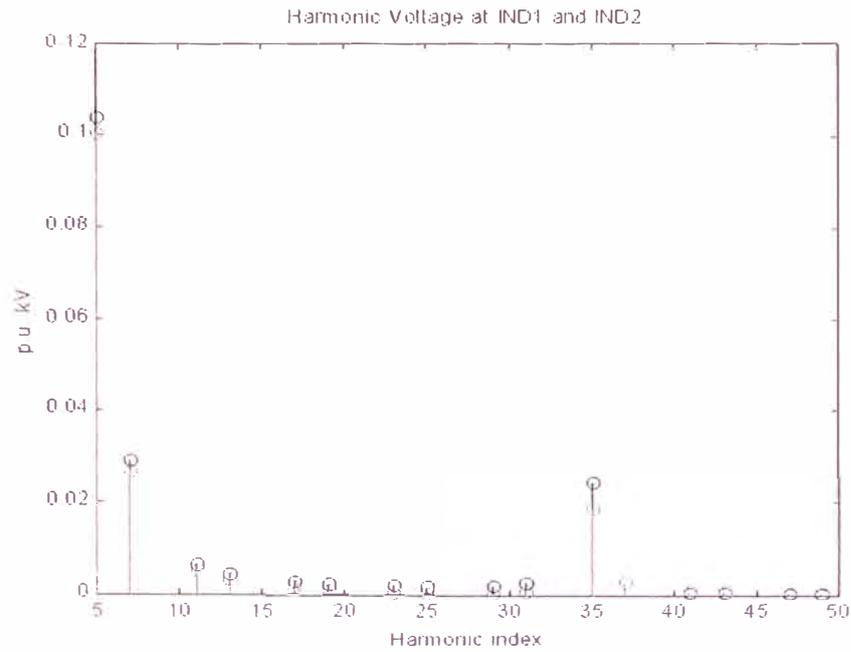
Note that the converter current represents an injection at node 2 of the network.

Figure 3 shows the driving point and transfer impedance in (10). As it can be seen from the figure, the system forms two resonance frequency, one around the 5<sup>th</sup> harmonic and one around the 35<sup>th</sup> harmonic.



**Fig. 3 System harmonic impedance.**

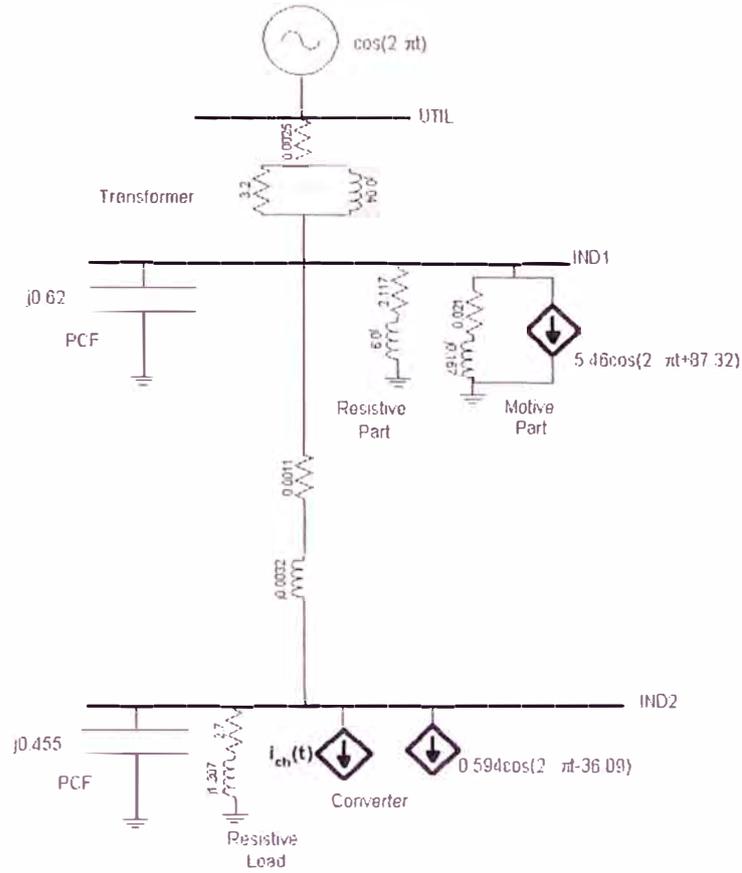
Figure 4 shows the harmonic voltage at the two system buses. It can be seen from this figure that the harmonic voltage of both buses at the 5<sup>th</sup> and the 35<sup>th</sup> orders is amplified due to the impedance resonance.



**Fig. 4 System harmonic voltage.**

*D. EMTP-ATP Time-Domain Modeling.* The purpose of the following calculations is to show how our harmonic problem can be solved using ATP modeling and simulation.

The positive/negative sequence equivalent-circuit used for the ATP simulation is shown in Figure 5. With reference to this figure, the circuit has identical topology as the circuit used for the frequency domain calculations.



**Fig. 5 ATP model of the example system (One phase simulation).**

The circuit data are expressed in terms of inductance and capacitance. A harmonic current source is connected at the converter bus. Additional sources of fundamental frequency are included for the derivation and plotting of the system waveforms. It should be noted that the inclusion of these fundamental sources is not necessary for this example, since the circuit is linear. That is, the same response for the harmonic voltage would be obtained, if these sources were absent. Fundamental frequency sources are necessary, if accurate system waveforms are desired for demonstration purpose or if the circuit is non-linear. The calculation of the system data is as follows:

*D.1. Calculation of Inductance and Capacitance.* This would require converting the known pu values of the fundamental impedance to corresponding H or F. However, we have the alternative option of entering inductance and capacitance in pu. PU calculation of inductance and capacitance uses pu time. Here for convenience, the time base is set to 1/60 Hz. That is 1 pu time is equivalent to 1 fundamental period. The inductance and capacitance pu calculations are as follows:

$$v(t) = L \frac{di}{dt} = L \frac{di}{dt' t_B} = fL \frac{di}{dt'} = X'_B \frac{X'_L}{2\pi} \frac{di}{dt'} \Rightarrow v'(t') = \frac{X'_L}{2\pi} \frac{di'}{dt'} \quad (11)$$

$$i(t) = C \frac{dv}{dt} = fC \frac{dv}{dt'} = B'_B \frac{B'_C}{2\pi} \frac{dv}{dt'} \Rightarrow i'(t') = \frac{B'_C}{2\pi} \frac{dv'}{dt'} \quad (12)$$

Where:  $t_B=1/f$  is the time base.

$t'$  is the time in pu.

$X_B, B_B$  are respectively the base of reactance and susceptance.

$X_L', B_C'$  are respectively the pu fundamental reactance and susceptance of the inductor and capacitor respectively.

Thus, the pu inductance and capacitance are found from the pu fundamental reactance and susceptance respectively dividing by  $2\pi$ . ATP data entry permits further simplification of these conversions. Setting the options  $XOPTION=COPTION=1.0$  Hz tells ATP to accept the branch data as pu fundamental reactance or susceptance. This choice facilitates data entry, since no conversion of any sort is needed (ATP will perform the conversions from (11) and (12) internally.) Figure 5 shows the pu fundamental reactance and susceptance of the system as they were entered in the ATP data file. These values are retrieved directly from the previous frequency domain data.

*D.2. Source Modeling.* To obtain the accurate waveform of the voltage, the fundamental as well as the harmonic sources must be described with their correct angle. With reference to Figure 5, the external utility is modeled as a voltage source at UTIL with unity amplitude and zero angle. Note that the  $\cos$  function is used for describing the sources. This is consistent with the ATP source modeling and also makes the calculation of harmonic phase angles easier.

The induction motor at Bus IND1 must be properly augmented by a fundamental current source, because the series R-X representation alone does not account for the motor's full fundamental current. Equation (13) is the current of the motor drawn at fundamental frequency as it is calculated from the load flow. Equation (14) is the current of the motor drawn at fundamental frequency as it is calculated by the circuit representation of the motor in Figure 5.

$$\bar{I}_1 = S_M^* / \bar{V}_M^* \approx 0.75^{\angle -36.87} / 1^{\angle 4.16} = 0.75^{\angle -41.03} \text{ puA} \quad (13)$$

$$\bar{I}_1' = \bar{V}_M / (R + jX) + \bar{I}_M = 1^{\angle -4.16} / (0.021 + j0.167) + \bar{I}_M = 5.95^{\angle -87} + \bar{I}_M \quad (14)$$

Where:  $I_M$  is the augmented current source. The phase angles are obtained from the load flow solution and the power factor. Equating (13) and (14) we obtain the value of the augmented current source in Figure 5.

$$\bar{I}_M = \bar{I}_1' - \bar{I}_1 = 5.46^{\angle 87.32}$$

The converter at Bus IND2 is modeled as a combination of a fundamental and a harmonic current source. The fundamental current of the converter in Figure 5 is calculated from the load flow solution, the phase angle of the bus voltage and the power factor of the converter. The value of the harmonic source is calculated using Table 3. Thus, the phase angle of the  $n^{\text{th}}$  harmonic is found according to (15).

$$\psi_n = \psi_1 + n\theta_n \quad (15)$$

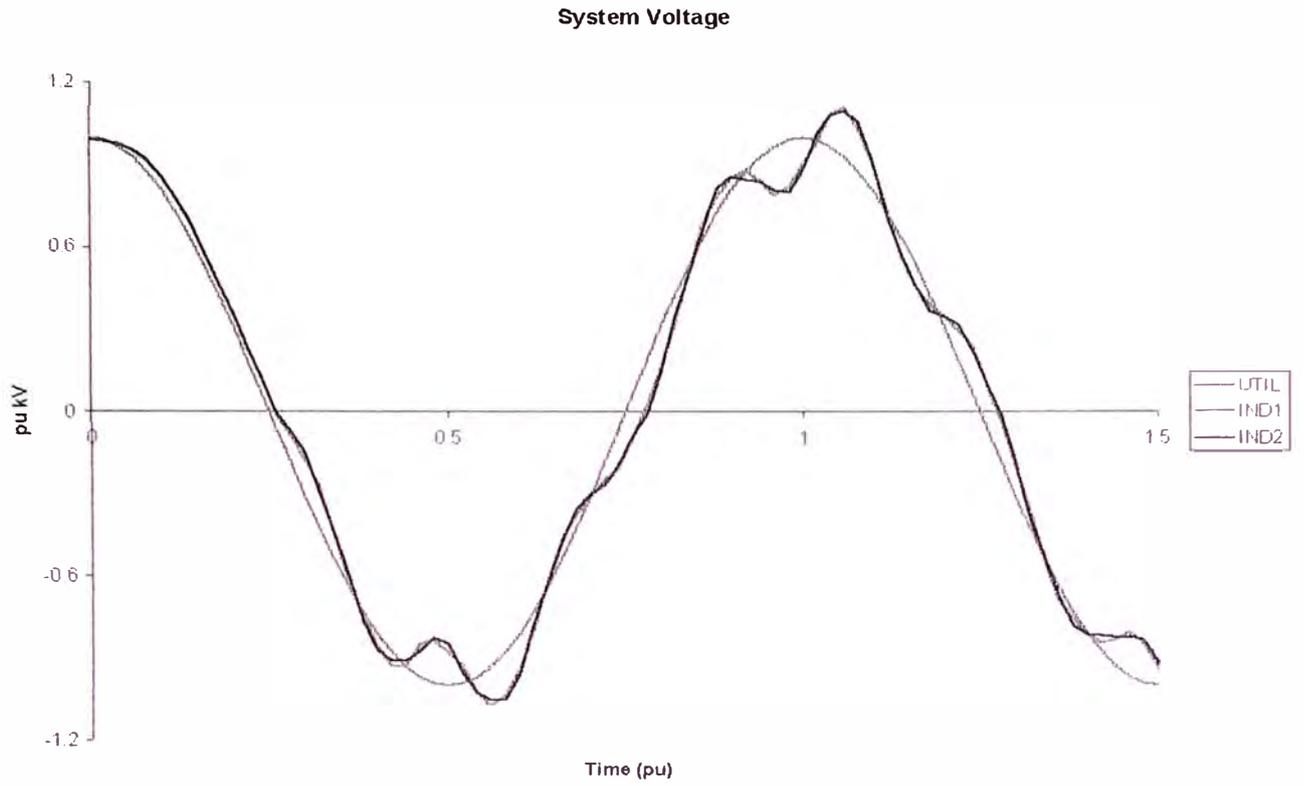
Where:  $\psi_1$  is the phase angle of the fundamental current,  
 $\theta_n$  is the harmonic angle relative to the fundamental current from Table 3.

Table 4 shows the description of the equivalent harmonic current sources as they are included in the ATP file. (Note: time is in pu.)

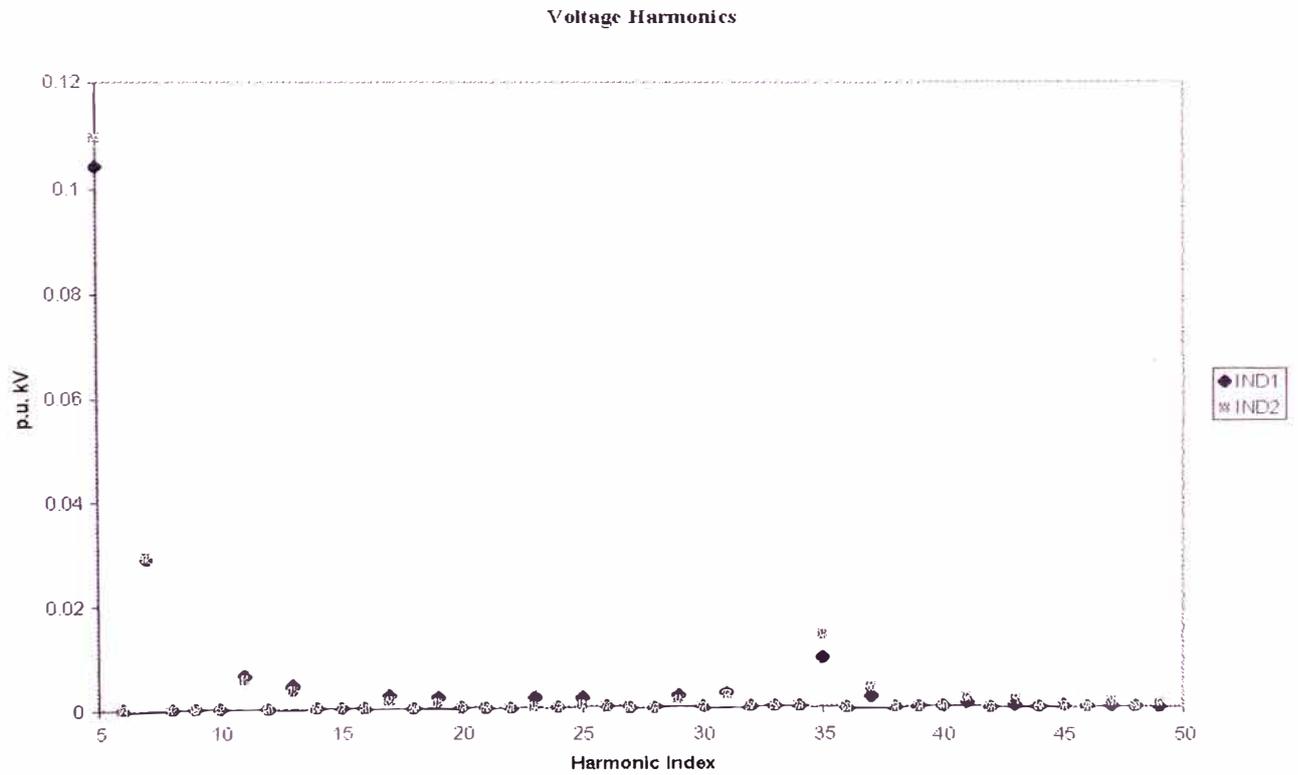
Table 4 Equivalent current sources at IND2.

Harmonic Order	Description
5	$0.119\cos(5t-0.45)$
7	$0.085\cos(7t+107.37)$
11	$0.054\cos(11t+143)$
13	$0.046\cos(13t-109.17)$
17	$0.035\cos(17t-73.53)$
19	$0.031\cos(19t+34.29)$
23	$0.026\cos(23t+69.93)$
25	$0.024\cos(25t-112.32)$
29	$0.020\cos(29t-146.61)$
31	$0.019\cos(31t-38.70)$
35	$0.017\cos(35t-3.15)$
37	$0.016\cos(37t+104.67)$
41	$0.014\cos(41t+140.31)$
43	$0.014\cos(43t-111.87)$
47	$0.012\cos(47t-76.23)$
49	$0.012\cos(49t+31.59)$

Figure-6 shows the waveform of the system voltage. Figure-7 shows the harmonic content of that voltage.



**Fig. 6 Wave form of harmonic voltage.**



**Fig. 7 Harmonic content of system voltage.**

7 - BUS BALANCED INDUSTRIAL DISTRIBUTION SYSTEM IEEE

Test System No.3

A 13-Bus Balanced Industrial Distribution System

This test case consists of 13 buses and is representative of a medium-sized industrial plant. The system is extracted from a common system that is being used in many of the calculations and examples in the IEEE Color Book series. The plant is fed from a utility supply at 115 kV and the local plant distribution system operates at 13.8 kV. The system is shown in Figure 3.1 and described by the data in Tables 3.1-4. Due to the balanced nature of this example, only positive sequence data is provided. Capacitance of the short overhead line and all cables are neglected.

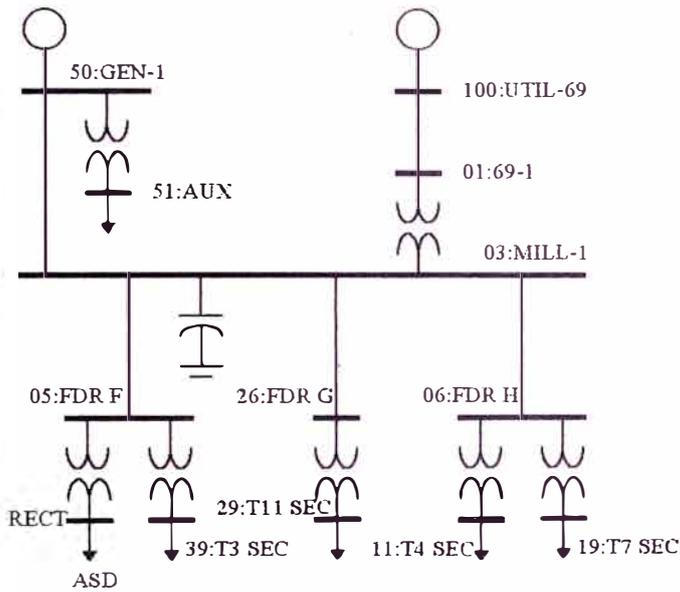


Figure 3.1. Test System 3 - A balanced industrial system.

Table 3.1. Per-Unit Line and Cable Impedance Data (base values: 13.8 kV, 10,000 kVA)

From	To	R	X
100:UTIL-69	01:69-1	0.00139	0.00296
03:MILL-1	50:GEN-1	0.00122	0.00243
03:MILL-1	05:FDR F	0.00075	0.00063
03:MILL-1	26:FDR G	0.00157	0.00131
03:MILL-1	06:FDR H	0.00109	0.00091

Table 3.2. Transformer Data

From	To	Voltage	Tap	kVA	%R	%X
01:69-1	03:MILL-1	69:13.8	69	15000	0.4698	7.9862
50:GEN1	51:AUX	13.8:0.48	13.45	1500	0.9593	5.6694
05:FDR F	49:RECT	13.8:0.48	13.45	1250	0.7398	4.4388
05:FDR F	39:T3 SEC	13.8:4.16	13.11	1725	0.7442	5.9537
26:FDR G	29:T11 SEC	13.8:0.48	13.45	1500	0.8743	5.6831
06:FDR H	11:T4 SEC	13.8:0.48	13.8	1500	0.8363	5.4360
06:FDR H	19:T7 SEC	13.8:2.4	13.11	3750	0.4568	5.4810

Table 3.3. Generation, Load, and Bus Voltage Data (from power flow study results)

Bus	V <sub>mag</sub> (p.u.)	δ (deg)	P <sub>gen</sub> kW	Q <sub>gen</sub> kvar	P <sub>load</sub> kW	Q <sub>load</sub> kvar
100:UTIL-69	1.000	0.00	7450	540	-	-
01:69-1	0.999	-0.13	-	-	-	-
03:MILL-1	0.994	-2.40	-	-	2240	2000
50:GEN1	0.995	-2.39	2000	1910	-	-
51:AUX	0.995	-3.53	-	-	600	530
05:FDR F	0.994	-2.40	-	-	-	-
49:RECT	0.980	-4.72	-	-	1150	290
39:T3 SEC	0.996	-4.85	-	-	1310	1130
26:FDR G	0.994	-2.40	-	-	-	-
06:FDR H	0.994	-2.40	-	-	-	-
11:T4 SEC	0.979	-3.08	-	-	370	330
19:T7 SEC	1.001	-4.69	-	-	2800	2500
29:T11 SEC	0.981	-4.16	-	-	810	800

Harmonic #	Percent	Relative Angle
1	100.00	0.00
5	18.24	-55.68
7	11.90	-84.11
11	5.73	-143.56
13	4.01	-175.58
17	1.93	111.39
19	1.39	68.30
23	0.94	-24.61
25	0.86	-67.64
29	0.71	-145.46
31	0.62	176.83
35	0.44	97.40
37	0.38	54.36

Table 3.4. Harmonic Source Data

Additional data used to conduct a harmonic analysis of the example industrial system include the following:

1. System equivalent impedance. For this study, the system impedance was determined from the fault MVA and X/R ratio at the utility connection point. These values are 1000 MVA and 22.2, respectively. Driving point impedance at the connection point was not available, but should be used whenever possible.
2. The local (in-plant) generator was represented as a simple Thevenin equivalent. The internal voltage, determined from the converged power flow solution, is 13.98/-1.52° kV. The equivalent impedance is the sub-transient impedance which is 0.0366+j1.3651Ω.
3. The plant power factor correction capacitors are rated at 6000 kvar. As is typically done, leakage and series resistance of the bank are neglected in this study.
4. The displacement power factor for the drive load is 0.97 lagging. This high power factor is typical of drives operated at or near full load.

Specific issues related to modeling for harmonic analysis must also be considered if the results presented here are to be obtained using different analysis programs. Modeling considerations applicable to this example include:

1. All loads are modeled as series RL circuits. This approach is taken instead of parallel RL modeling to more accurately represent the limited harmonic damping offered by typical induction motors without resorting to extremely detailed motor models.
2. Frequency dependence of model resistance is neglected. This is done mainly because of the significant discrepancies that exist among various programs available. In addition, neglecting frequency effects on resistance leads to over-conservative results (which are often preferred).
3. Transformer magnetizing branch effects are neglected. In addition, increasing winding losses as a function of frequency are also neglected. As discussed in 2 previously, this is done to avoid problems when comparing the results presented here with those obtained using other analysis programs.

The results of a harmonic analysis of the system of Figure 3.1 are given in Table 3.5. Fundamental, fifth, and seventh voltage harmonic amplitudes and  $THD_V$  are given for each of the system buses. These results, along with those obtained from a fundamental frequency power flow (shown in Table 3.3), give an accurate description of the voltage profiles in the plant.

Table 3.5 Plant Voltage Harmonic Summary

Bus	$V_1$ ( $V_{LN}$ )	$V_5$ ( $V_{LN}$ )	$V_7$ ( $V_{LN}$ )	$THD_V$ (%)
00:UTIL-69	39645.70	40.37	104.23	0.28
01:69-1	39538.00	52.36	135.14	0.37
03:MILL-1	7712.77	53.51	138.13	1.93
50:GEN1	7726.55	51.72	133.51	1.87
51:Aux	262.74	1.72	4.40	1.81
05:FDR F	7709.24	54.07	138.35	1.94
49:RECT	269.89	12.79	12.83	8.02
09:T3 SEC	2240.05	14.83	37.21	1.80
26:FDR G	7709.07	53.48	138.04	1.93
06:FDR H	7703.35	53.43	137.91	1.93
11:T4 SEC	260.40	1.78	4.59	1.90
09:T7 SEC	1302.74	8.58	21.78	1.81
09:T11 SEC	256.29	1.71	4.36	1.84

## ANEXO G

### GUIA DE TAREAS COMUNES PARA ANALISIS CON HNET

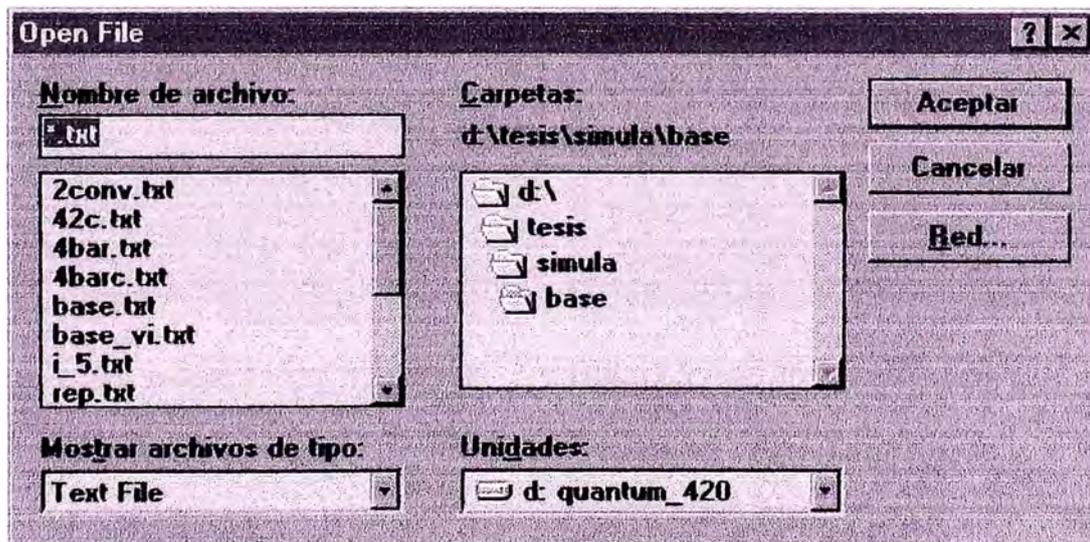
#### 1. APERTURA DE ARCHIVO CON DATOS DEL SISTEMA A ANALIZAR

Solo es posible la apertura de una archivo de datos a la vez. Una vez seleccionado el archivo, este se carga en memoria y será el objeto de cualquier cálculo posterior hasta finalizar el programa.



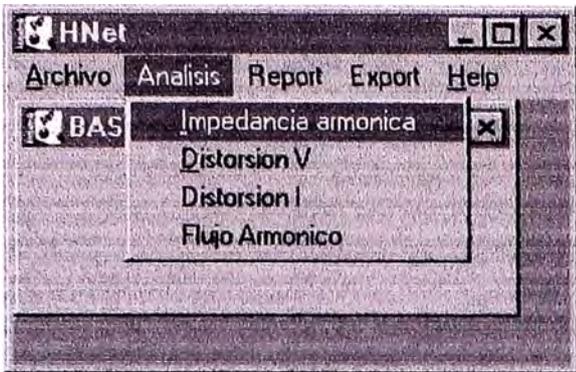
Ventana principal del programa HNET

Opción para apertura de archivo de datos.

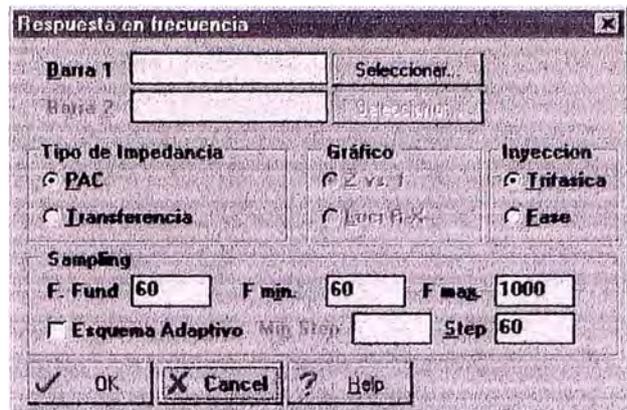


Selección de archivo con datos del sistema a analizar. Seleccionar archivos del tipo TXT.

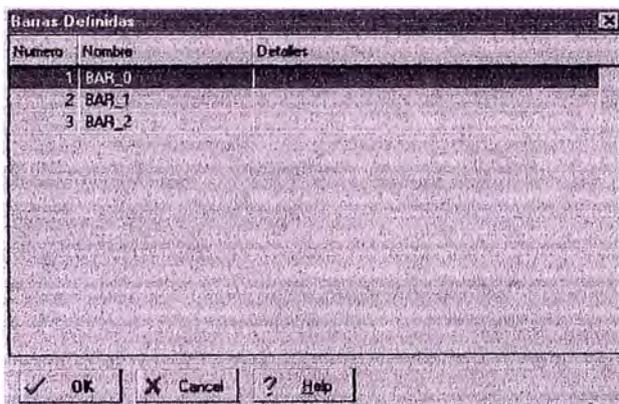
## 2. Obtención de la característica de impedancia en función de la frecuencia.



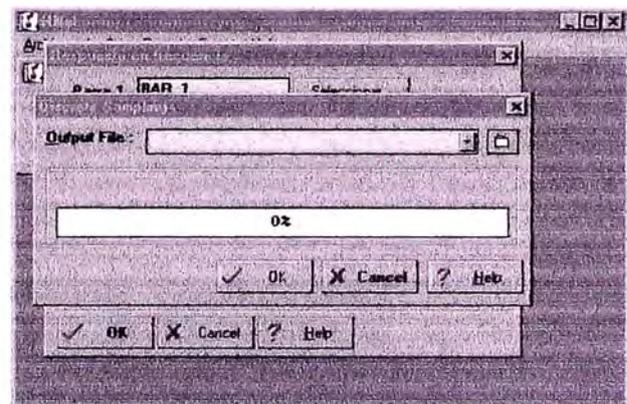
Selección de cálculo de impedancia armónica



Ingreso de parámetros para selección de frecuencia inicial y final del barrido en frecuencia, incremento en frecuencia, barras a analizar y tipo de impedancia (PAC: Propia y Transferencia). Esquema Adaptivo no implementado todavía.



Diálogo para seleccionar barras a analizar.

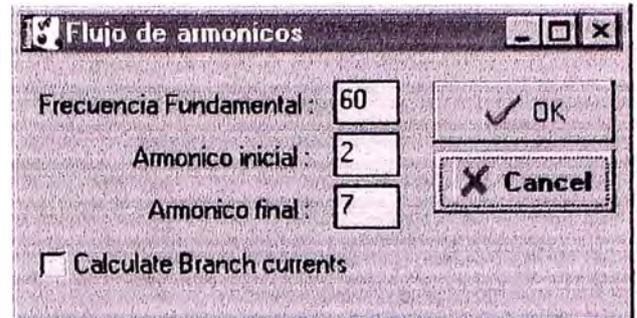


Seleccionar archivo donde se guardaran los puntos de impedancia obtenidos. Utilizar el boton con el folder para explorar. Presionar OK para iniciar el calculo.

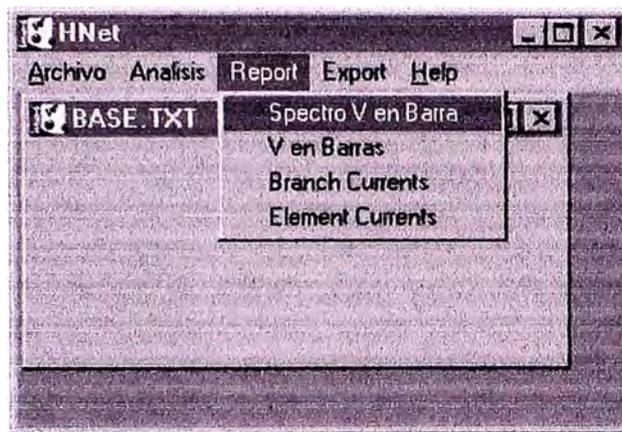
### 3. Obtención del espectro de tensiones en una barra.



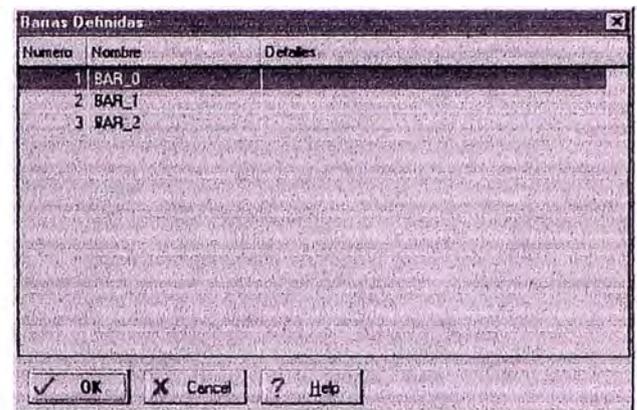
Seleccionar la opción de flujo armónico



Ingresar los armónicos de interés para el flujo



Seleccionar la opción de Spectro de tensiones en barra

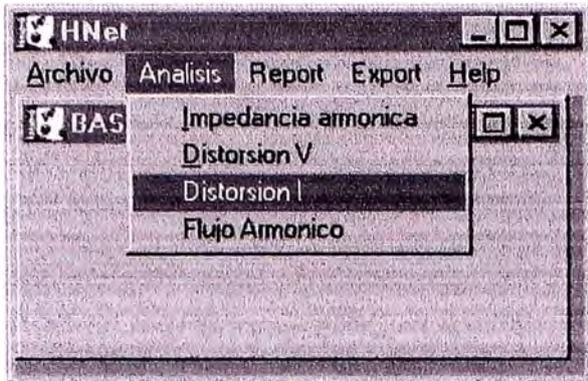


Seleccionar barra objeto del cálculo

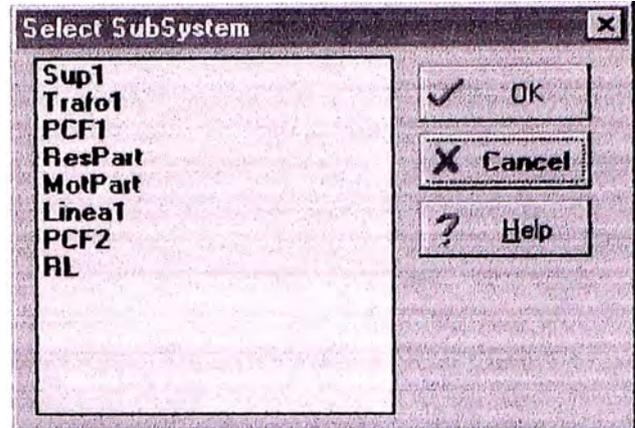
h	f (Hz)	Va (ang)	Vb (ang)	Vc (ang)
2	120.0	0.00 ( 0.0)	0.00 ( 0.0)	0.00 ( 0.0)
3	180.0	0.00 ( 0.0)	0.00 ( 0.0)	0.00 ( 0.0)
4	240.0	0.00 ( 0.0)	0.00 ( 0.0)	0.00 ( 0.0)
5	300.0	920.22 ( -98.5)	920.22 ( 21.5)	920.22 ( 141.5)
6	360.0	0.00 ( 0.0)	0.00 ( 0.0)	0.00 ( 0.0)
7	420.0	225.55 ( -124.1)	225.55 ( 115.9)	225.55 ( -4.1)
8	480.0	0.00 ( 0.0)	0.00 ( 0.0)	0.00 ( 0.0)
9	540.0	0.00 ( 0.0)	0.00 ( 0.0)	0.00 ( 0.0)
10	600.0	0.00 ( 0.0)	0.00 ( 0.0)	0.00 ( 0.0)
11	660.0	44.43 ( -76.5)	44.43 ( 43.5)	44.43 ( 163.5)
12	720.0	0.00 ( 0.0)	0.00 ( 0.0)	0.00 ( 0.0)
13	780.0	27.08 ( 39.6)	27.08 ( -80.4)	27.08 ( 159.6)

El espectro de tensiones para la barra seleccionada se muestra en una tabla por fase (magnitud y ángulo), se puede exportar a un archivo texto.

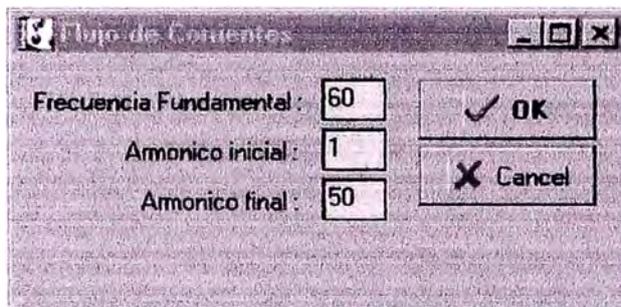
#### 4. Obtención del espectro de corrientes en terminales de un subsistema.



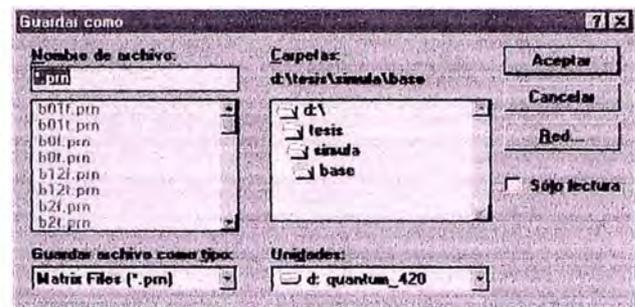
Seleccionar la opción de análisis de distorsión de corriente.



Seleccionar subsistema a analizar



Seleccionar las armónicas de interés

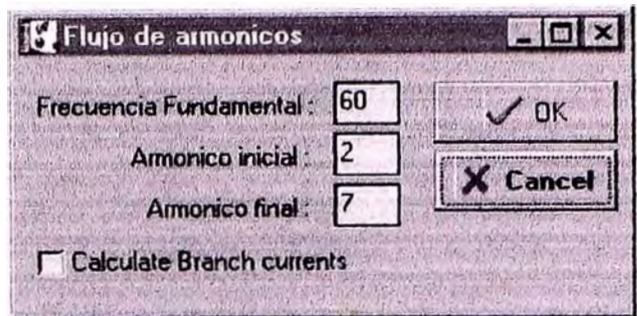


Seleccionar archivo donde se guardarán los resultados.

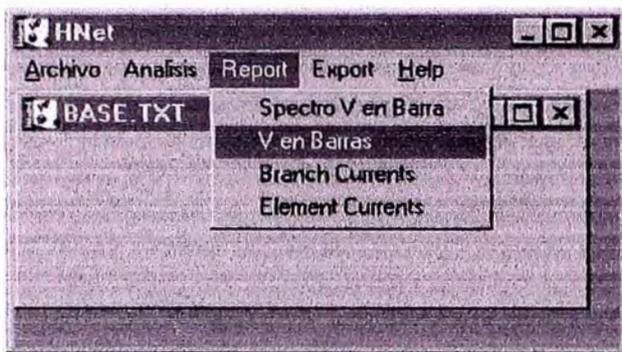
**5. Evaluación de las tensiones originadas por una armónica en particular en todas las barras de la red.**



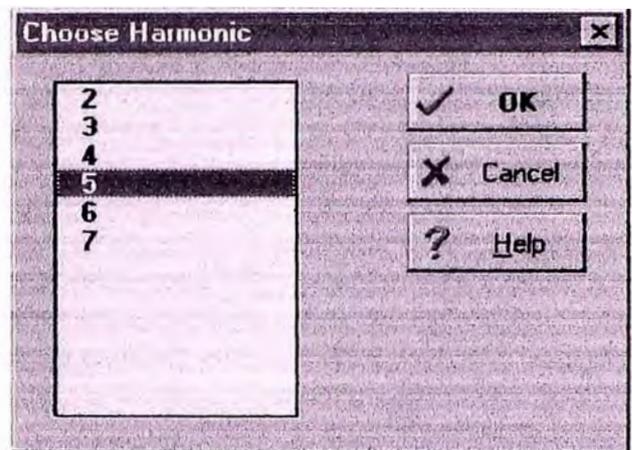
Seleccionar la opción de flujo armónico



Ingresar los armónicos de interés para el flujo



Seleccionar la opción de Tensión armónica en barra



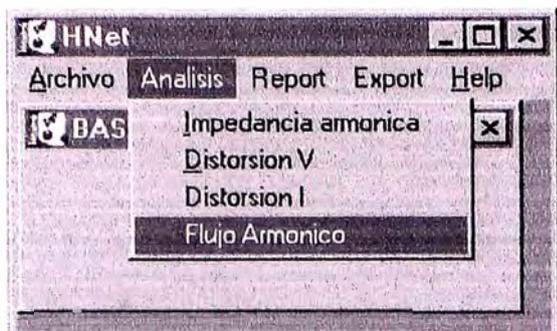
Seleccionar armónico de interés

BUS BAR HARMONIC VOLTAGE  
 Harmonic : 5  
 Frequency: 300.0

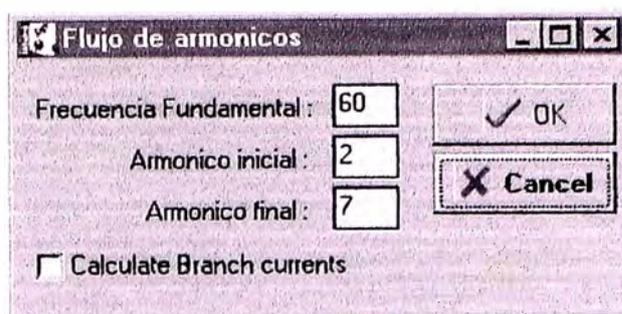
Bar Name	Va (ang)	Vb (ang)	Vc (ang)
BAR 0	2.18001 ( -54.4)	2.18001 ( 174.4)	2.18001 ( -65.6)
BAR 1	875.65781 ( -98.7)	875.65781 ( 21.3)	875.65781 ( 141.3)
BAR 2	920.21592 ( -98.5)	920.21592 ( 21.5)	920.21592 ( 141.5)

La tensión armónica producida por el armónico seleccionado se evalúa en todas las barras y se muestra por fase.

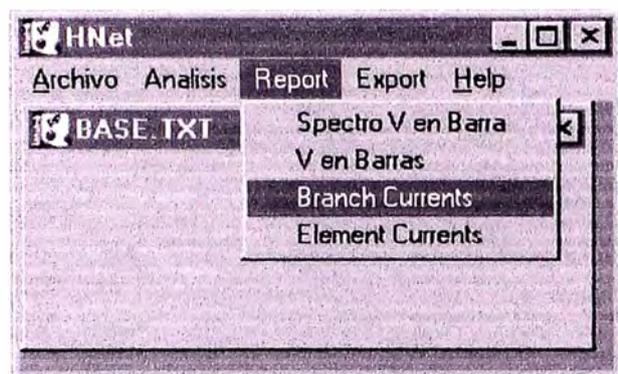
## 6. Evaluación de las corrientes originadas por un armónica en particular en los terminales de los elementos de la red.



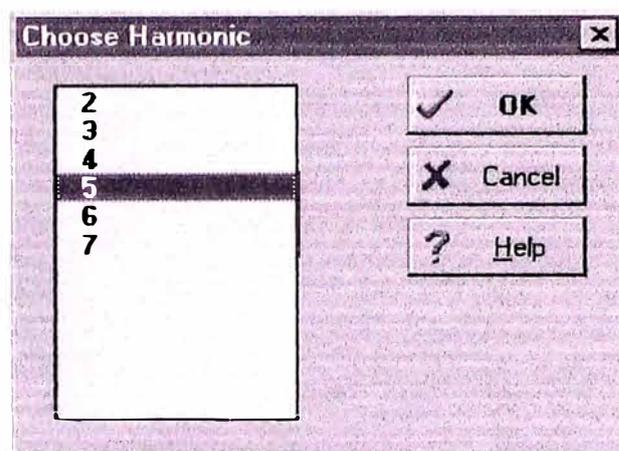
Seleccionar la opción de flujo armónico



Ingresar los armónicos de interés para el flujo



Seleccionar la opción de Tensión armónica en barra



Seleccionar armónico de interés

Name	Ia0 (ang)	Ib0 (ang)	Ic0 (ang)	Ia1 (ang)	Ib1 (ang)	Ic1 (ang)	S1 (KW)	S1 KVAR	S2 (KW)	S2 KVAR	DS (I)
Sup1	46.01	46.01	46.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.30	0.00	0.00	0
Trefol	46.01	46.01	46.01	230.04	230.04	230.04	-0.01	-0.30	45.21	602.62	45
PCF1	145.94	145.94	145.94	0.00	0.00	0.00	0.00	-383.39	0.00	0.00	0
ResPart	9.27	9.27	9.27	0.00	0.00	0.00	10.36	22.03	0.00	0.00	10
HotPart	55.18	55.18	55.18	0.00	0.00	0.00	3.64	144.90	0.00	0.00	3
Linea1	148.72	148.72	148.72	148.72	148.72	148.72	-59.22	-386.16	60.54	406.06	1
PCF2	110.21	110.21	110.21	0.00	0.00	0.00	0.00	-304.24	0.00	0.00	0
RL	6.85	6.85	6.85	0.00	0.00	0.00	7.22	17.48	0.00	0.00	7

Se obtiene un listado de todas las corrientes correspondientes a la armónica seleccionada en los terminales de los subsistemas (elementos) de la red, conjuntamente con las potencias asociadas.