



Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos



Existen varias topologías para filtros pasivos, pudiendo estos ser divididos en dos grupos: **filtros de bloqueo** que consisten en caminos de alta impedancia entre el alimentador y la carga; y **filtros de confinamiento** que consisten básicamente en la creación de caminos de baja impedancia para la circulación de las armónicas presentes, en conexión derivación (shunt) en relación a la carga.

Los filtros de confinamiento son constituidos de la asociación RLC serie, con pequeñas variaciones topológicas uno de otro, colocado en paralelo en la instalación, tienen una impedancia muy pequeña en su frecuencia de resonancia y actúa como un cortocircuito para la armónica en cuestión.

Pueden ser usados simultáneamente varios montajes, sintonizados en frecuencias diferentes, de modo a remover varias armónicas de diferente orden.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

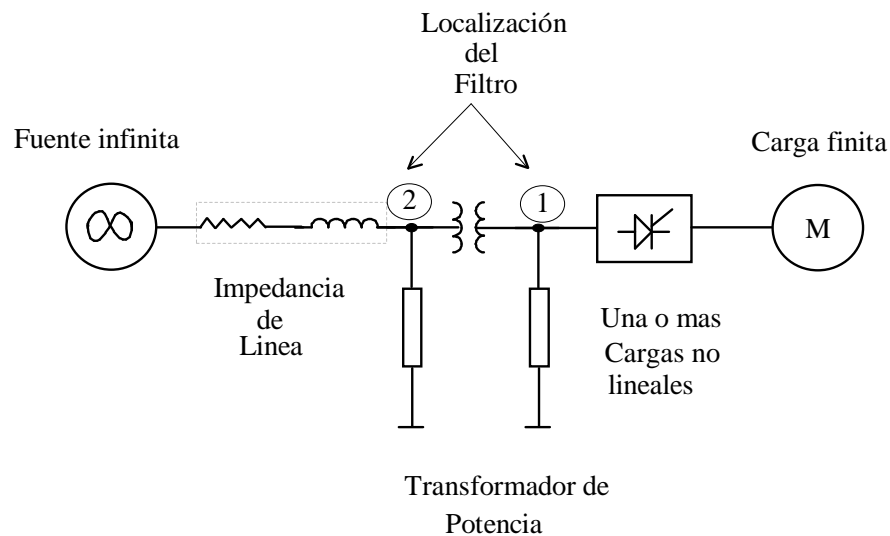


Fig. 4.1

Distorsión de tensión debido al filtro

Un problema que se presenta a menudo cuando se sintoniza un filtro en una frecuencia determinada, es que este puede plantear un camino de alta impedancia para alguna armónica en la vecindad de la calculada, esto implica como resultado una distorsión de tensión, debido a la caída de tensión que provoca esta armónica. Este problema es solucionado dimensionando correctamente la resistencia en serie con el filtro, de modo de atenuar los efectos resonantes no deseados.

Localización del filtro

Como muestra la Fig. 4.1 hay dos localizaciones prácticas donde el filtro puede ser aplicado la optima resulta en una reducción armónica eficaz y una minimización de costos y pérdidas. Localizando el filtro lo más cerca posible de la carga no lineal (preferiblemente en los terminales) resulta en una mayor atenuación de la distorsión armónica para un rango de potencia reactiva dada.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

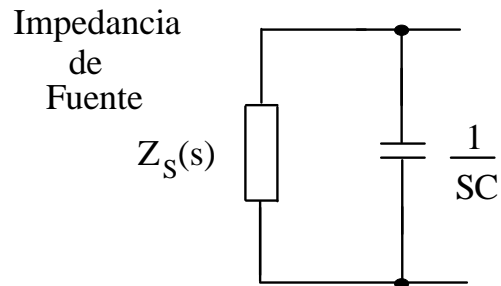


Fig. 4.2

Donde
 $Z_s(s) = sL_s$

4.1 - TIPOS DE FILTROS PASIVOS

4.1.1 - Filtro pasa altos de primer orden

Un filtro de primer orden consiste de un banco de condensadores directamente conectado a la barra del sistema de potencia y es típicamente proyectado para filtrar armónicas de altas frecuencias desde el sistema que causa interferencia telefónica (Fig. 4.2), donde la impedancia de fuente es dada por, $Z_s(s) = sL_s$. También están para reducir los hundimientos de voltaje (Notches) causados por la conmutación de los rectificadores controlados, así como proveer potencia reactiva.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

Impedancia
de
Fuente

$Z_s(s)$

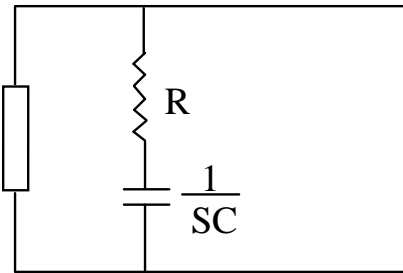


Fig. 4.3

Inductancia de dispersión
debido al transformador

Impedancia
de
Fuente

$Z_s(s)$

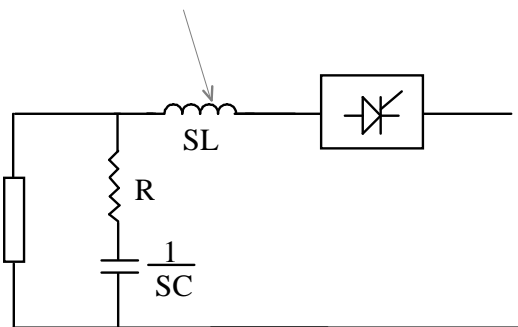


Fig. 4.4

4.1.2 - Filtro pasa altos amortiguado de primer orden

En ciertos casos, cuando la reactancia capacitiva del filtro pasa alto está cerca de una frecuencia armónica, una resistencia de amortiguamiento puede ser conectada en serie con el condensador (Fig. 4.3) para controlar y limitar la amplificación de corriente (posible resonancia). Tal resistencia, sin embargo, aumenta las pérdidas en la frecuencia fundamental (50Hz) y reduce la efectividad de atenuación para pasa altos sobre la frecuencia $1/RC$.

En algunas aplicaciones de compensación de reactivo, cuando un banco de condensadores es conectado antes de una inductancia serie y de una fuente generadora de armónicos, un circuito serie resonante se formará entre el filtro capacitivo y la inductancia serie (inductancia de dispersión del transformador de potencia por ejemplo) como muestra la Fig. 4.4.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

4.1.3 - Filtro serie resonante de segunda orden

Esta tal vez sea la topología de filtro más usada, consiste de la combinación serie de un condensador, una inductancia y una pequeña resistencia de amortiguamiento como muestra la Fig. 4.5.

Este filtro típicamente es usado para frecuencias armónicas discretas (sintonización) tales como la 3^{era}, 5^{ta}, 7^{ma}, 11^{ava} etc.

En bajas frecuencias, el filtro es predominantemente capacitivo, y por tanto, provee potencia reactiva al sistema. En altas frecuencias, el filtro es inductivo y provee pequeñas atenuaciones a las distorsiones de alta frecuencia.

En la frecuencia resonante, la reactancia capacitiva cancela la reactancia inductiva por tanto el filtro es enteramente resistivo.

Para **aplicaciones en media y alta tensión** con un rango de potencia reactiva de filtro dada, la corriente que fluye por el filtro es típicamente de bajo valor eficaz y no requiere de conductores de gran sección o de inductores con núcleo de hierro con entrehierro (gap's).

De hecho regularmente son usados inductores con núcleo de aire, en estos casos el factor de calidad del filtro está entre $50 \leq Q \leq 150$.

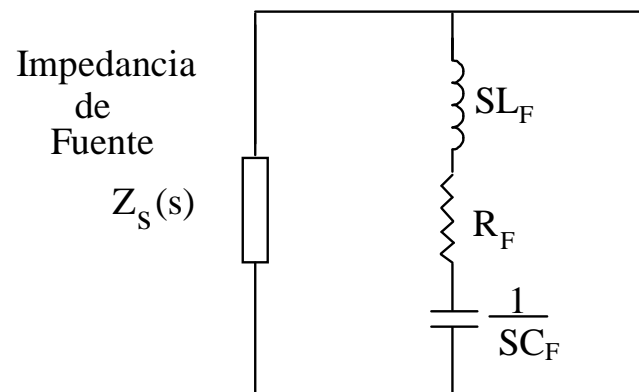


Fig. 4.5

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

Para **aplicaciones en baja tensión** por otro lado, usualmente se requieren inductores con núcleo de hierro con entreferro además de conductores que soporten altas corrientes.

El resultado de esto es altos I^2R y pérdidas en el núcleo con el implícito aumento del calentamiento y elevación de temperatura. Estos factores tienden a elevar la resistencia efectiva y bajos valores de factores de calidad tienen que ser usados. Luego, para aplicaciones en baja tensión, los factores de calidad deben estar entre $10 \leq Q \leq 50$.

Los filtros sintonizados de 2^{da} orden son comúnmente aplicados en prácticamente en todos los niveles del sistema de potencia como son: transmisión, distribución y aplicaciones en distribución.

La más común de las localizaciones, sin embargo, es en cargas no lineales solitarias que generalmente existen y que no justifican otro tipo de filtro más caro.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

4.1.4 - Filtro serie resonante amortiguado de segunda orden

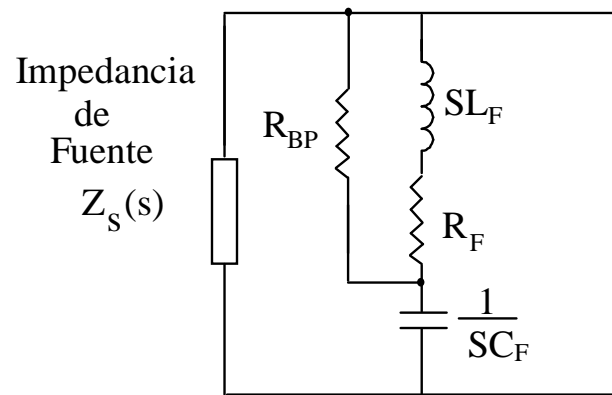


Fig. 4.6

Otra topología popular de filtro serie resonante es aquella a la cual se le ha adicionado una resistencia de 'bypass' (R_{BP}), tal como muestra la Fig 4.6.

La principal aplicación de este filtro es suministrar atenuación a frecuencias armónicas sobre un amplio rango.

La sintonización de este filtro es completamente similar al serie resonante de 2^{da} orden. La resistencia serie R_F es típicamente elegida basandose en los valores prácticos del factor de calidad Q del filtro serie resonante de 2^{da} orden y la resistencia de 'bypass' (R_{BP}) es elegida basandose en la respuesta pasa altos deseada y en la atenuación serie resonante, el rango del factor de calidad 'bypass' típico es de $0,5 \leq Q_{BP} \leq 2,0$. Factores de calidad, Q_{BP} , en este rango proveen menor atenuación serie resonante y mayor respuesta pasa altos.

Por tanto, debe haber un acuerdo entre las respuestas serie resonante y la respuesta pasa altos.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

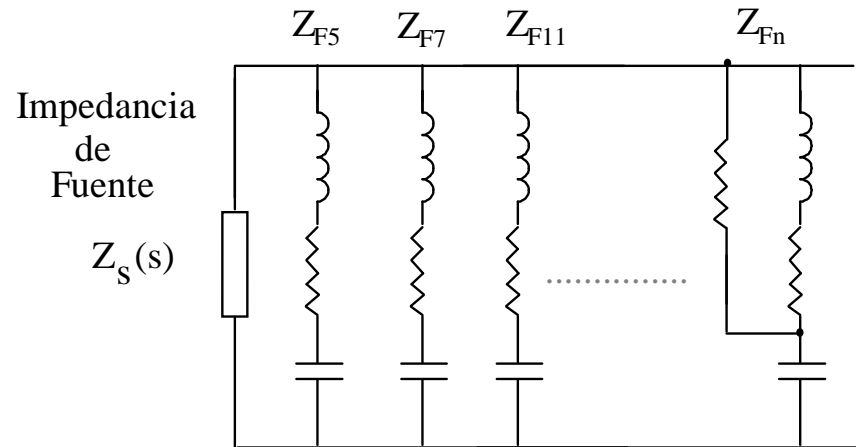


Fig. 4.7

4.1.4.1 - Conexión de varios filtros serie resonante de segunda orden

Como muestra la Fig. 4.7, diversos filtros serie resonantes de 2^{da} orden son conectados en paralelo e individualmente sintonizados a una frecuencia determinada para realizar un filtrado en un amplio rango de frecuencias.

El orden del filtro resultante es entonces tomado como el número total de elementos almacenadores de energía en el instalado.

Por ejemplo un sistema con filtros de 5^{ta}, 7^{ma}, 11^{ava}, 13^{era} y un sistema pasa altos puede ser considerado de 9^{no} orden.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

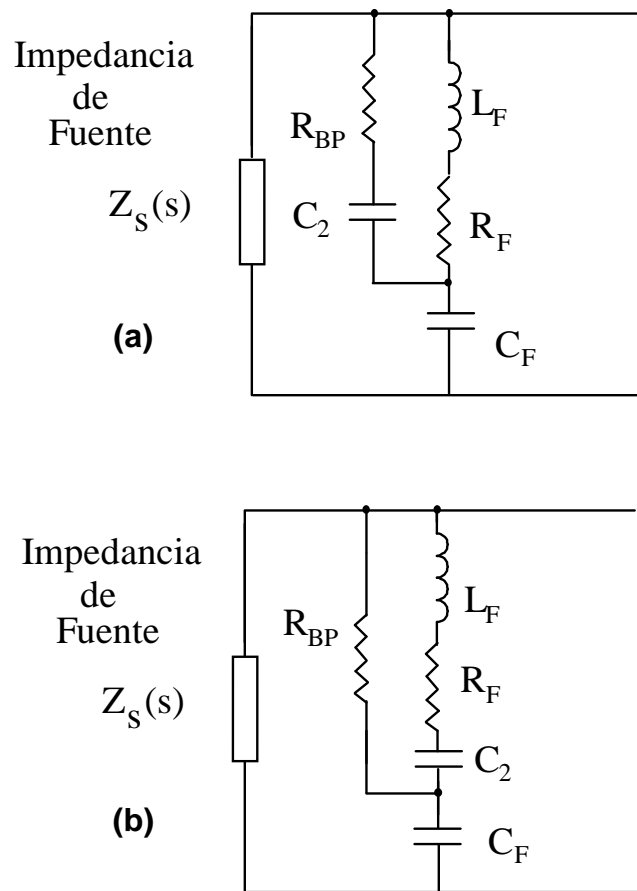


Fig. 4.8

4.1.5 - Filtros de orden superiores

Los filtros de orden más altos son usados donde la economía y la respuesta armónica deseada justifique su aplicación.

Como muestra la Fig. 4.8a, un filtro de 3^{era} orden puede ser realizado adicionando una capacitancia serie C_2 a la resistencia bypass, R_{BP} , para reducir las pérdidas en la frecuencia fundamental ó, como muestra la Fig. 4.8b, C_2 puede ser conectado en serie con L_F y dimensionado para formar una rama serie resonante en la frecuencia fundamental para reducir las pérdidas debidas a $I^2 R_{BP}$. Estos filtros son conocidos también como filtros tipo C.

Debe ser notado que este tipo de filtro no es comúnmente usado para aplicaciones en baja y medias tensiones debido a factores de costo, complejidad y confiabilidad.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

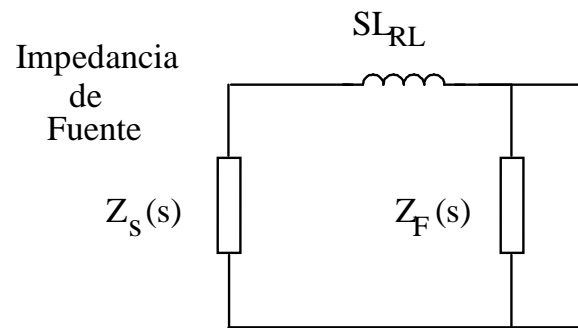


Fig. 4.9

4.1.6 - Reactores de línea y trampas de armónicas

Cuando reactores de línea externos son usados en combinación con filtros armónicos tipo derivación ($Z_F(s)$) (shunt) se le conoce comúnmente como una 'trampa armónica' (ver Fig. 4.9).

Una obvia desventaja para usar reactores de línea (L_{RL}) son los costos mayores ya que ellos son dimensionados para conducir la corriente total de línea de la carga.

Seleccionando transformadores con altas impedancias ($Z > 5\%$) el tamaño del filtro puede ser reducido y la onerosa inductancia de línea externa adicional puede ser eliminada.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

4.2 - CÁLCULO DE FILTROS SINTONIZADOS

La elección de la estructura del filtro, así como la forma de cálculo es variada, tal como se pudo apreciar en los ítems anteriores.

Sin embargo, debido a su simplicidad de cálculo y aplicación, el filtro escogido en este curso es el filtro serie resonante de 2^{da} orden más conocido como filtro sintonizado.

Se hace necesario explicar que el cálculo se trata de un procedimiento iterativo, en todo caso simple, que sirve como base para la definición de las secciones del filtro de armónicas.

Una vez dimensionado el filtro, deberán ser efectuadas simulaciones para verificar el cumplimiento a las normas referentes al contenido armónico y también para certificarse del funcionamiento adecuado de la planta bajo estudio (nivel de voltaje en el PCC en régimen permanente o debido a transitorios).

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

4.2.1 - Ajuste a las normas Chilenas

Tomando como referencia la norma debida a las corrientes armónicas, dada por la comisión nacional de energía (ver tabla 3.5) se procede al cálculo de los filtros, sin embargo es necesario comenzar con el cálculo de los indicadores en la norma, como son **la capacidad de corriente de corto circuito (I_{sc}) en el PCC, y la identificación de la corriente de carga de frecuencia fundamental en el PCC (I_L)**. Por tanto:

$$I_{SC} = \frac{V_{S_{ef1}}}{Z_{S1}} \quad (4.1)$$

$$Z_{S1} = \sqrt{R_S^2 + (\omega L_S)^2} \quad (4.2)$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (4.3)$$

Donde: $V_{S_{ef1}}$ = Voltaje eficaz fase en el PCC (usualmente es el voltaje del secundario del transformador de alimentación).

R_s, L_{s1} : Resistencia e inductancia serie equivalente de la fuente.

ω : Frecuencia angular fundamental del voltaje de la fuente en [Rad/seg]

f : Frecuencia fundamental del voltaje de la fuente en Hz.

El valor obtenido en (4.1) debe ser llevado a la tabla 3.3, para la lectura de los valores máximos permitidos K_{nmax} para las diferentes armónicas. Donde K_n se define como factor de proporción entre la enésima corriente armónica y la corriente fundamental.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

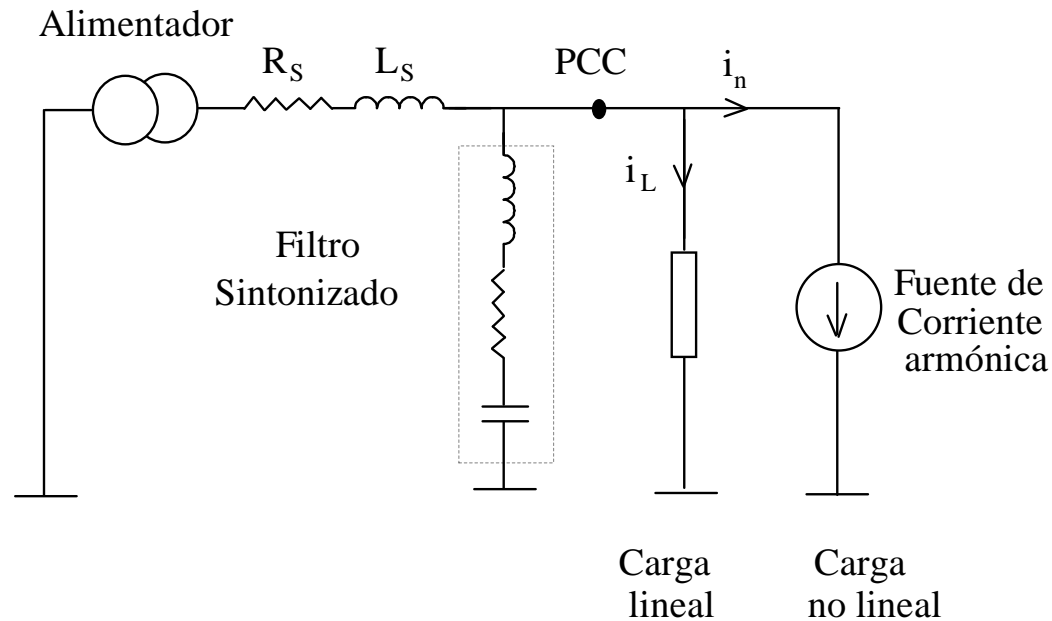


Fig. 4.10

4.2.2 - Diseño del filtro sintonizado

4.2.2.1 - Algoritmo de diseño del filtro sintonizado

A partir del conocimiento de la corriente solicitada a la fuente (fundamental y armónicas) y con el auxilio del diagrama dado en la Fig. 4.10, que describe en una forma simple una configuración típica de plantas industriales, es posible, haciendo un análisis convencional de circuitos eléctricos, la obtención de los parámetros R , L y C del filtro.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

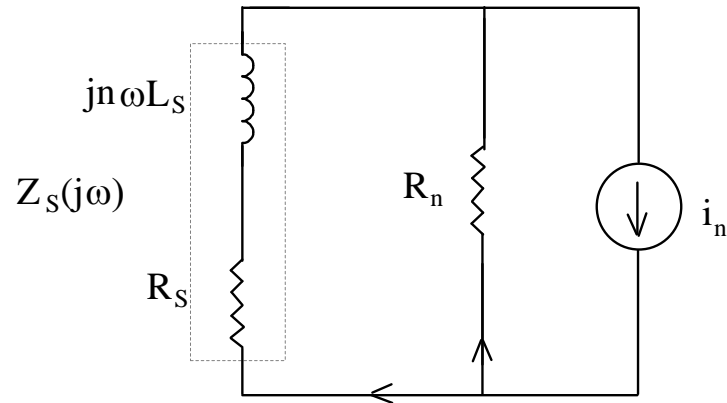


Fig. 4.11

Circuito equivalente en la frecuencia sintonizada.

En los casos reales de interés, el divisor de corriente formado por los diferentes componentes del circuito es tal que para el cálculo del filtro, la planta puede ser representada de una manera más simple, como muestra la Fig 4.11.

El brazo paralelo formado por la admitancia del alimentador tiene un valor mucho mayor que los demás brazos en paralelo (otras cargas), de modo que para efecto de la división de corrientes, puede ser tomado apenas el divisor constituido por la admitancia del alimentador y por la admitancia de la sección del filtro considerada.

Observando la Fig. 4.11, se tiene que en la resonancia la rama del filtro queda reducido a su componente resistiva R_n .

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

Del análisis de este circuito se obtiene la expresión (4.4) que define el valor de la resistencia serie equivalente del filtro para la armónica de orden n . Una vez calculado el valor de R_n , las expresiones (4.5) y (4.6) suministran el valor del inductor L_n y del condensador C_n completando así la especificación del filtro. Para el caso de varios filtros en paralelo el último deberá ser un filtro de segunda orden amortiguado, por lo tanto se especifica la resistencia de 'bypass' (R_{BP}), luego:

$$R_n = \frac{K_n \cdot I_{1ef}}{(I_{nef}^2 - K_n^2 \cdot I_{1ef}^2)} \cdot \left[R_S \cdot K_n \cdot I_{1ef} + \sqrt{(R_S \cdot I_{nef})^2 + (n \cdot \omega \cdot L_S)^2 \cdot (I_{nef}^2 - K_n^2 \cdot I_{1ef}^2)} \right] \quad (4.4)$$

$$L_n = \frac{R_n \cdot Q}{n \cdot \omega} \quad (4.5)$$

$$C_n = \frac{1}{n^2 \cdot \omega^2 \cdot L_n} \quad (4.6)$$

$$R_{BP} = \frac{Q_{BP} \cdot Q - 1}{\left(1 - \frac{Q_{BP}}{Q}\right)} \cdot R_n \quad (4.7)$$

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

Donde:

- R_n : Resistencia serie equivalente del filtro para la armónica n .
- R_{BP} : Resistencia bypass.
- K_n : Valor permitido para la armónica n , según la tabla 3.5.
- I_{1ef} : Valor eficaz de la componente fundamental de la corriente del alimentador
- I_{nef} : Valor eficaz de la componente armónica 'n' de la corriente del alimentador
- Q : Factor de calidad del filtro, usualmente $10 \leq Q \leq 50$ para esta aplicación.
- Q_{BP} : Factor de calidad bypass, usualmente $0,5 \leq Q_{BP} \leq 2$.
- R_S, L_S : Resistencia e inductancia serie equivalente del alimentador.
- n : Orden armónica
- ω : Frecuencia angular fundamental del voltaje [rad/seg]

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

4.2.2.2 - Resumen del algoritmo de diseño del filtro sintonizado

Luego deben seguirse la siguientes etapas:

i) Encuadrar según norma, para esto se debe calcular o asumir:

- i.1) Q , ω , V_S , R_S , L_S , Z_S y n
 - i.2) Obtener I_L (para simulación es la corriente eficaz fundamental (I_{1ef})) e I_{nef} (Corriente eficaz de orden n).
 - i.3) Determinar I_{SC} e I_{SC}/I_L
 - i.4) Con los datos de (i.3) determinar de la tabla 3.3, K_{nmax} , porcentaje permitido para la armónica ' n '.
- ii) Cálculo del filtro RLC para una determinada armónica de orden n , de los datos de la etapa anterior calcular:
- ii.1) R_n , L_n , C_n usando $K_n \leq K_{nmax}$.
- iii) Simulación y prueba del filtro.

Después de la determinación del filtro incluirlo en el sistema y realizar una nueva simulación. A través de los datos obtenidos de esta, verificar si los filtros están actuando. Dos situaciones se pueden dar:

- iii.1) La armónica esta dentro de lo permitido, por tanto se retoma el procedimiento (i) para el cálculo del filtro de la armónica siguiente.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

iii.2) La armónica está fuera de lo permitido, entonces se altera Q o K_n , de forma a obtener otros valores de R_n , L_n y C_n del filtro. Nuevas simulaciones deben ser hechas y se verifica el resultado, si es correcto se retoma a (i.2) para el cálculo de la próxima armónica, si no se retoma el ítem (iii.2).

iv) Verificación de distorsión de tensión en el PCC, de la profundidad y área de los hundimientos (Notches).

Se observa, una vez que los filtros fueron calculados, la distorsión del voltaje en el PCC. Si esta está fuera de la norma se deberá adicionarse un nuevo filtro.

También el voltaje en el PCC es verificado, con relación a los hundimientos y áreas, según las recomendaciones de la referida norma.

v) Análisis cualitativo del filtro en el dominio de la frecuencia. En esta última etapa, se verifica el comportamiento de los filtros elaborados, siendo probados en relación a sus frecuencias de resonancia.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

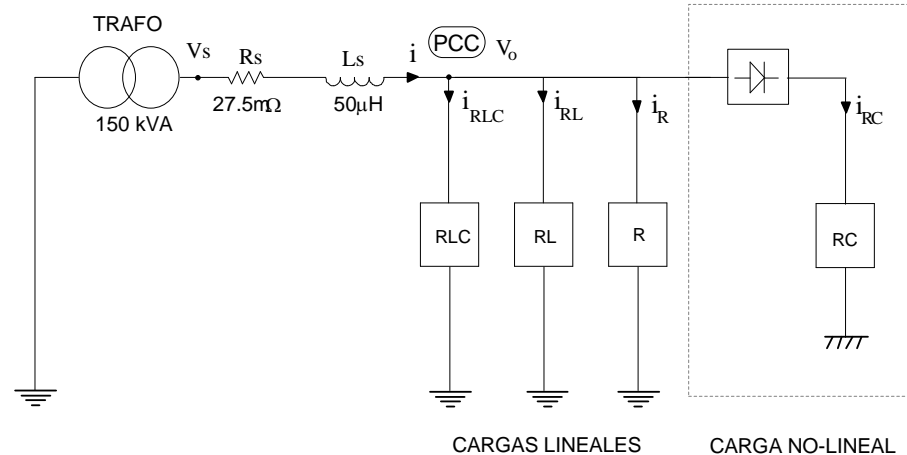


Fig. 4.12

4.2.2.3 - Ejemplo de diseño

La planta, de tipo comercial, para este ejemplo corresponde a dos laboratorios de universidad donde predominan las cargas monofásicas del tipo: iluminación a descarga, equipos de informática y acondicionadores de aire. En este caso las fuentes conmutadas de los microcomputadores son las principales cargas no lineales.

La Fig. 4.12 muestra un diagrama unifilar de la planta donde la carga lineal, del tipo RLC, representa el sistema de iluminación (las lámparas fluorescentes alimentadas a través de reactores convencionales con corrección del factor de potencia). La del tipo RL representa los acondicionadores de aire y la carga de tipo R representa cargas del tipo iluminación incandescente y equipos de característica lineal (calentamiento resistivo). La carga no lineal representa las fuentes de los microcomputadores.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

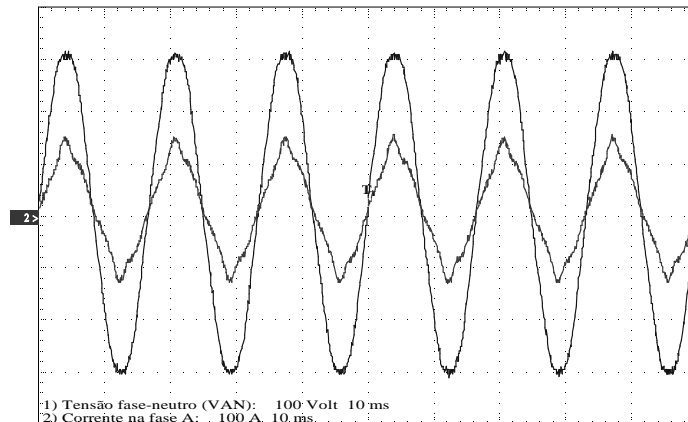


Fig. 4.13

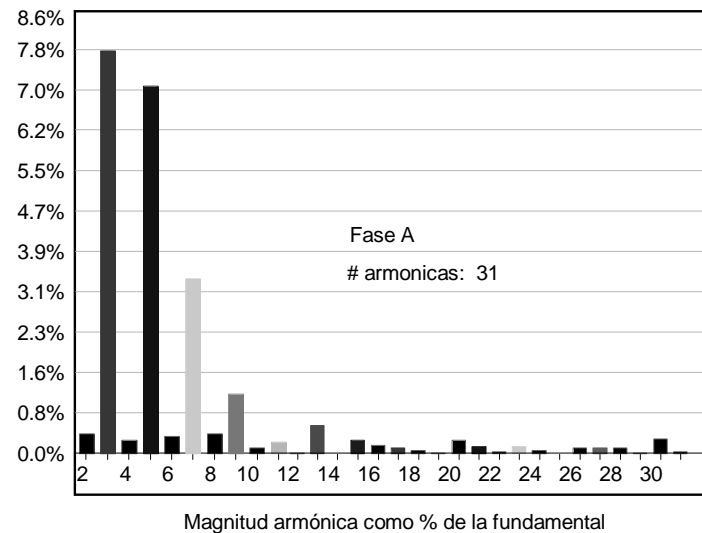


Fig. 4.14

La Fig. 4.13 muestra las formas de onda tensión, corriente para la **fase A**, con una escala de 100V/div y 100A/div en 10ms/div. Se observa que la corriente está distorsionada debido a la presencia de la carga no lineal y tiene un valor eficaz de 82A.

El achatamiento en el voltaje se debe justamente a la corriente drenada por las fuentes conmutadas.

Con el análisis obtenido fue obtenido un $THD_V = 2,37\%$ para el voltaje de entrada y un $THD_I = 11,24\%$ para la corriente de entrada.

Estos valores están muy próximos de los máximos permitidos por norma para este sistema, debido a que $50 < I_{sc}/I_L < 100$ (12%).

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

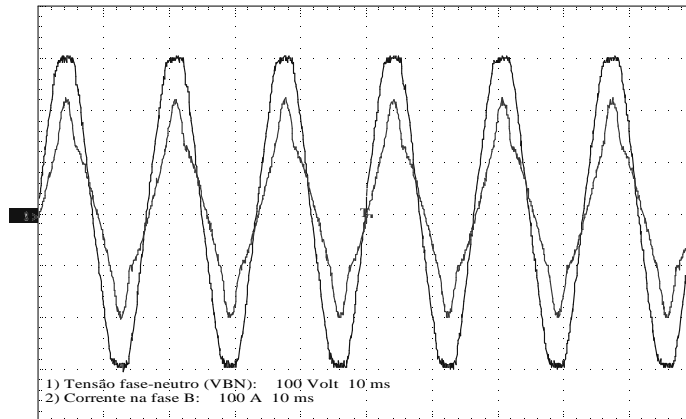


Fig. 4.15

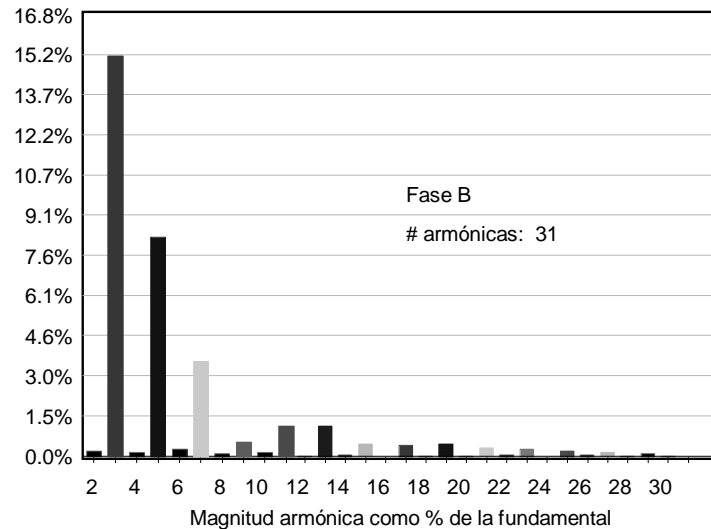


Fig. 4.16

En la Fig. 4.15 es posible observar una mayor amplitud en la corriente de entrada para la **fase B**, se tiene un valor eficaz de 166.8A, comparado con la corriente en la fase A mostrada en la Fig. 4.13. El sistema presenta un visible desequilibrio de carga, con una distorsión de tensión $THD_V=3,224\%$ y una distorsión de corriente $THD_I=17,89\%$.

Se observa que el THD_I y el contenido individual de la 3ª armónica son mayores que los límites especificados por la norma.

En la Fig. 4.16 puede ser observado que la 3ª armónica es muy alta (15,2%).

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

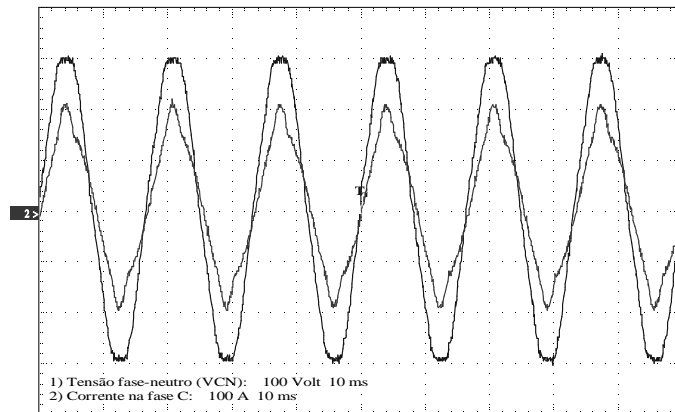


Fig. 4.17

La corriente en la **fase C** (Fig. 4.17) tiene la misma magnitud que la de fase B, lo que muestra que el desequilibrio de corriente esta relacionado a la fase A. La fase C tiene una distorsión de tensión $THD_V=3,22\%$ y de corriente $THD_I= 11,31\%$, estos valores están en concordancia con los dados por la norma.

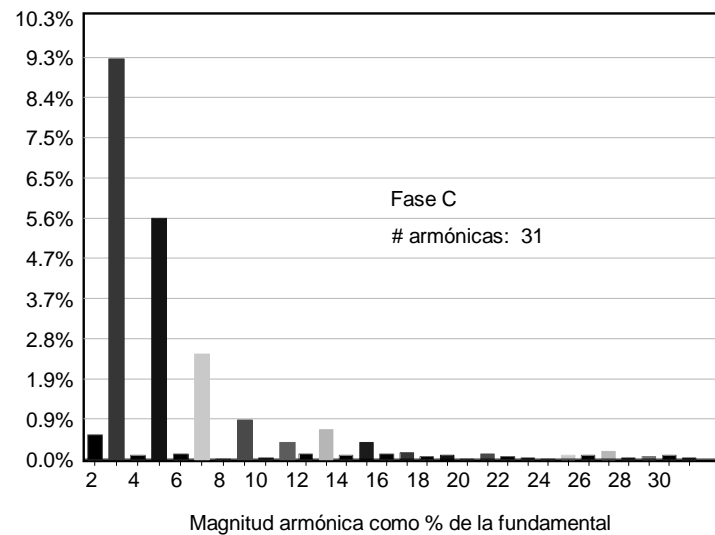


Fig. 4.18

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

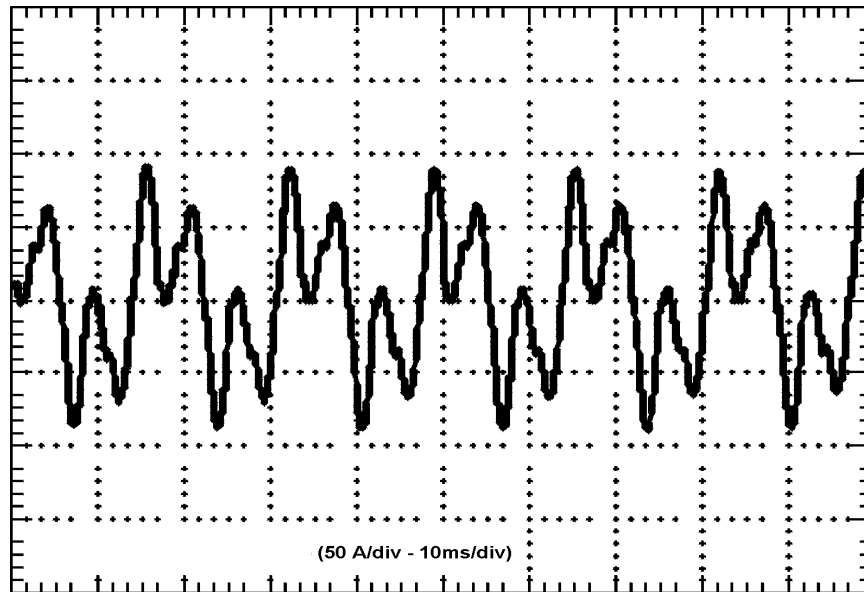


Fig. 4.19

Debido al desequilibrio una gran y distorsionada corriente de neutro aparece (47,2 [A] eficaces totales) demostrando que las componentes de sec. 0 de todas las componentes circulan por el neutro inclusive de la fundamental, tal como muestra la Fig. 4.19.

Es posible observar que aunque las corrientes tienen una clara distorsión en las 3 fases el factor de potencia es alto ($FP_A=0,985$, $FP_B=0,971$ y $FP_C=0,984$).

De las figuras se observa que las corrientes están casi en fase con los voltajes y consecuentemente el factor de desplazamiento es casi unitario.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

4.2.2.3.1 - Modelado de la planta

De acuerdo a las mediciones obtenidas de la planta se implemento el modelo mostrado por la Fig. 4.20, evidentemente se realizaron varias simulaciones para adecuar los resultados del modelo con aquellos obtenidos de la medición, por ejemplo se adicionaron fuentes de corrientes armónicas de modo a ajustar debidamente las magnitudes de estas.

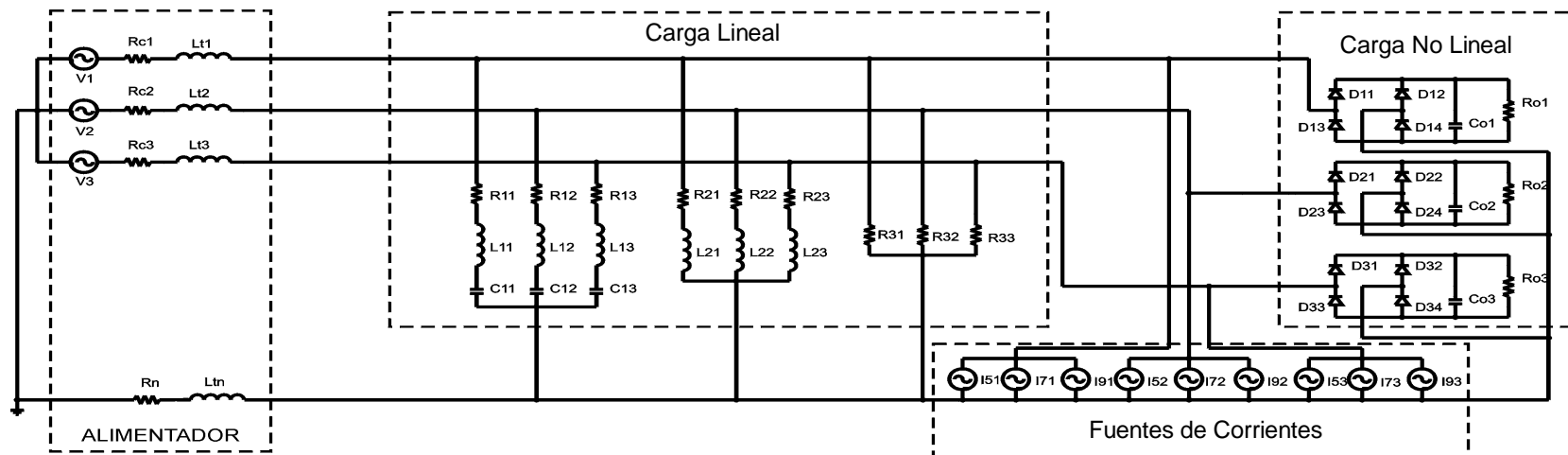


Fig. 4.20

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

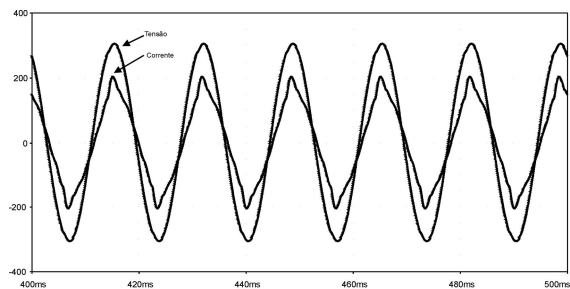
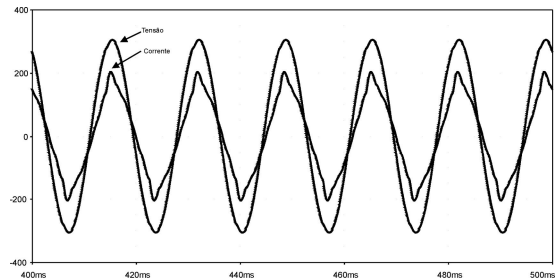
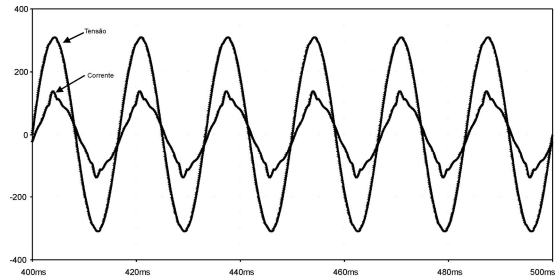


Fig. 4.21

La Fig. 4.21 muestra las formas de onda obtenidas de la simulación, si se comparan con las obtenidas experimentalmente se observa que son prácticamente iguales con una pequeña diferencia en los achatamientos en los voltajes, sin embargo esto no compromete el modelo.

La corriente de neutro (Fig. 4.22) obtenida por el modelo simulado es ligeramente mayor, pero con un formato de onda próximo del experimental. La corriente eficaz obtenida fue de 52,5A.

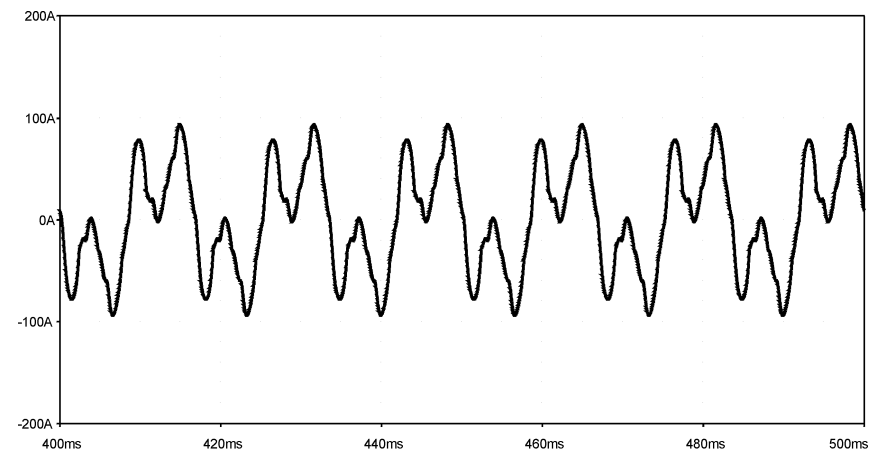


Fig. 4.22

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

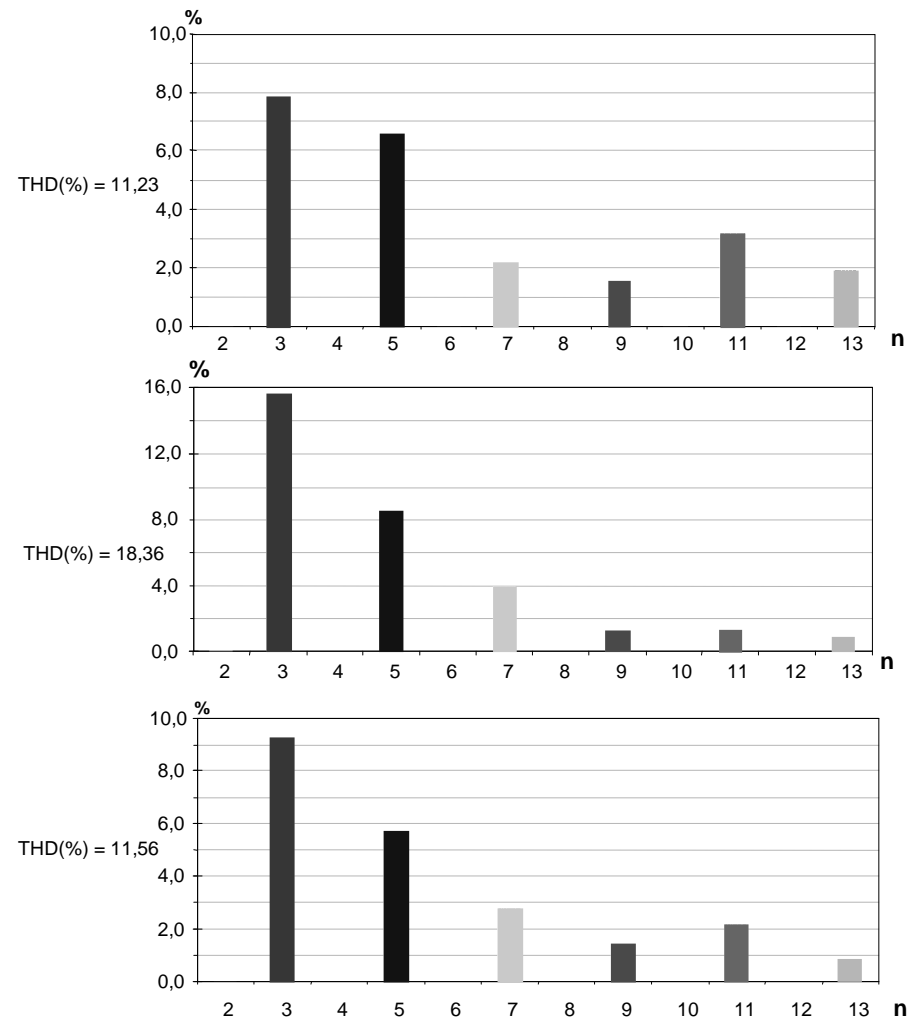


Fig. 4.23

A través de la Fig. 4.23 se verifica que el modelo implementado presenta un contenido armónico casi idéntico a la planta, inclusive los resultados de distorsión armónica total (THD).

A partir de los resultados obtenidos se procede a proyectar o diseñar los filtros pasivos para la reducción de las componentes armónicas más elevadas.

La 3^{era} armónica es la principal armónica a ser filtrada.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

4.2.2.3.2 - Proyecto de los filtros

Tal como fue discutido, la metodología de proyecto es iterativa envolviendo un proceso de dos etapas como son cálculo y simulación de forma a encontrar un resultado óptimo en la reducción de las armónicas.

a) Cálculo de los parámetros de la planta

$$f = 60\text{Hz}$$

$$\omega = 2\pi f \text{ [rad/seg]}$$

$$V_{\text{sef}} = 220\text{V}$$

$$L_S = 50[\mu\text{H}]$$

$$R_S = 27.5[\text{m}\Omega]$$

$$Z_S = 31,66[\text{m}\Omega]$$

Para el cálculo de la impedancia se consideran el alimentador y el transformador.

b) Cálculo de los filtros

i) Cálculo del filtro de 3^{era} armónica

El cálculo de este filtro es de banda estrecha debido a su proximidad a la frecuencia fundamental, por lo tanto se adopta un factor de calidad $Q=50$.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

ia) Cálculo para la fase A.

Corriente fundamental, $I_{1PA} = 116A$, luego $I_{1efA} = 82,02A$ eficaces.

Componente 3^{era} armónica, $I_{3PA} = 9,15A$, luego $I_{3efA} = 6,47A$.

Corriente de cortocircuito máxima en el PCC: $I_{SCA} = V_{1EF}/Z_S$, luego $I_{SCA} = 6,95kA$.

Obteniendo la relación I_{SC}/I_{1efA} , luego $I_{SC}/I_{1efA} = 84,71$.

A través de la tabla 3.5, se obtiene que $50 < I_{SC}/I_{1efA} < 100$, luego las distorsiones individuales menores que 11 ($n < 11$) tienen que ser no mayor que 10% (K_{nmax}) y cumplir un $THD_1 = 12\%$.

A partir de estos valores se escoge K_n para el proyecto del filtro de forma a atender los límites especificados.

- Orden de la armónica para la sintonía del filtro: $n=3$

Ocupando un $K_{3A} = 0,02$ (menor que K_{nmax}) se calculan los elementos del filtro obteniendo:

$R_{3A} = 92,23[m\Omega]$ con esto se obtienen: $L_{3A} = 4,08[mH]$ y $C_{3A} = 191,74[\mu F]$.

De estos valores se hace una adecuación a valores comerciales de los condensadores, ya que el reactor se puede hacer bajo encomienda, entonces:

$C_{3A} = 183,6[\mu F]$ (3 condensadores de $61,2 \mu F$ - 380V)

Recalculando $L_{3A} = 4,26[mH]$ y $R_{3A} = 96,32[m\Omega]$.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

lb) Cálculo para la fase B.

Corriente fundamental, $I_{1PB} = 166,8A$, luego $I_{1efB} = 117,95A$ eficaces.

Componente 3^{era} armónica, $I_{3PB} = 26,17A$, luego $I_{3efB} = 18,51A$.

Corriente de cortocircuito máxima en el PCC: $I_{SCB} = V_{1efB}/Z_S$, luego $I_{SCB} = 6,95kA$.

Obteniendo la relación I_{SC}/I_{1efB} , luego $I_{SC}/I_{1efB} = 58,91$.

A través de la tabla 3.5, se obtiene que $50 < I_{SC}/I_{1efB} < 100$, luego las distorsiones individuales menores que 11 ($n < 11$) tienen que ser no mayor que 10% (K_{nmax}) y cumplir un $THD_1 = 12\%$.

A partir de estos valores se escoge K_n para el proyecto del filtro de forma a atender los límites especificados.

- Orden de la armónica para la sintonía del filtro: $n=3$

Ocupando un $K_{3B} = 0,06$ (menor que K_{nmax}) se calculan los elementos del filtro obteniendo:

$R_{3B} = 82[m\Omega]$ con esto se obtienen: $L_{3B} = 3,63[mH]$ y $C_{3B} = 215,66[\mu F]$.

De estos valores se hace una adecuación a valores comerciales de los condensadores :

$C_{3B} = 244,8[\mu F]$ (4 condensadores de $61,2 \mu F$ - 380V)

Recalculando $L_{3B} = 3,19[mH]$ y $R_{3B} = 72,24[m\Omega]$.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

1c) Cálculo para la fase C.

Corriente fundamental, $I_{1PC} = 172,4A$, luego $I_{1efC} = 121,91A$ eficaces.

Componente 3^{era} armónica, $I_{3PC} = 16A$, luego $I_{3efC} = 11,31A$.

Corriente de cortocircuito máxima en el PCC: $I_{SCC} = V_{1efC}/Z_S$, luego $I_{SCC} = 6,95kA$.

Obteniendo la relación I_{SC}/I_{1efC} , luego $I_{SC}/I_{1efC} = 57$.

A través de la tabla 3.5, se obtiene que $50 < I_{SC}/I_{1efC} < 100$, luego las distorsiones individuales menores que 11 ($n < 11$) tienen que ser no mayor que 10% (K_{nmax}) y cumplir un $THD_1 = 12\%$.

A partir de estos valores se escoge K_n para el proyecto del filtro de forma a atender los límites especificados.

- Orden de la armónica para la sintonía del filtro: $n=3$

Ocupando un $K_{3C} = 0,02$ (menor que K_{nmax}) se calculan los elementos del filtro obteniendo:

$R_{3C} = 65,7[m\Omega]$ con esto se obtienen: $L_{3C} = 2,9[mH]$ y $C_{3C} = 269,17[\mu F]$.

De estos valores se hace una adecuación a valores comerciales de los condensadores :

$C_{3C} = 244,8[\mu F]$ (4 condensadores de $61,2 \mu F - 380V$)

Recalculando $L_{3C} = 3,19[mH]$ y $R_{3C} = 72,24[m\Omega]$.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

ii) Cálculo del filtro de 5^{ta} armónica

Se calcula para un $Q=50$ al igual que para la 3^{era} armónica.

ii a) Cálculo para la fase A.

Corriente fundamental, $I_{1PA} = 114,5$, luego $I_{1efA} = 80,96A$ eficaces.

Componente 5^{ta} armónica, $I_{5pA} = 7,55A$, luego $I_{5efA} = 5,34A$.

Corriente de cortocircuito máxima en el PCC: $I_{SCA} = V_{1ef}/Z_S$, luego $I_{SCA} = 6,95kA$.

Obteniendo la relación I_{SC}/I_{1efA} , luego $I_{SC}/I_{1efA} = 85,84$.

A través de la tabla 3.5, se obtiene que $50 < I_{SC}/I_{1efA} < 100$, luego las distorsiones individuales menores que 11 ($n < 11$) tienen que ser no mayor que 10% (K_{nmax}) y cumplir un $THD_1 = 12\%$.

A partir de estos valores se escoge K_n para el proyecto del filtro de forma a atender los límites especificados.

- Orden de la armónica para la sintonía del filtro: $n=5$

Ocupando un $K_{5A} = 0,015$ (menor que K_{nmax}) se calculan los elementos del filtro, donde los resultados aquí presentados son la mejor condición obtenida después de varias simulaciones, luego:

$R_{5A} = 98,31[m\Omega]$ con esto se obtienen: $L_{5A} = 2,6[mH]$ y $C_{5A} = 107,93[\mu F]$.

De estos valores se hace una adecuación a valores comerciales de los condensadores:

$C_{3A} = 107,4[\mu F]$ (3 condensadores de $30,7\mu F$ + 1 de $15,3\mu F$ - 380V)

Recalculando $L_{5A} = 2,6[mH]$ y $R_{5A} = 98,79[m\Omega]$.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

iiB) Cálculo para la fase B.

Corriente fundamental, $I_{1PB} = 165,9A$, luego $I_{1efB} = 117,31A$ eficaces.

Componente 5^{ta} armónica, $I_{5PB} = 14,4A$, luego $I_{5efB} = 10,18A$.

Corriente de cortocircuito máxima en el PCC: $I_{SCB} = V_{1efB}/Z_S$, luego $I_{SCB} = 6,95kA$.

Obteniendo la relación I_{SC}/I_{1efB} , luego $I_{SC}/I_{1efB} = 41,89$.

A través de la tabla 3.5, se obtiene que $20 < I_{SC}/I_{1efB} < 50$, luego las distorsiones individuales menores que 11 ($n < 11$) tienen que ser no mayor que 7% (K_{nmax}) y cumplir un $THD_I = 8\%$.

A partir de estos valores se escoge K_n para el proyecto del filtro de forma a atender los límites especificados.

- Orden de la armónica para la sintonía del filtro: $n=5$

Ocupando un $K_{5B} = 0,03$ (menor que K_{nmax}) se calculan los elementos del filtro obteniendo:

$R_{5B} = 125,72[m\Omega]$ con esto se obtienen: $L_{5B} = 3,33[mH]$ y $C_{5B} = 84,4[\mu F]$.

De estos resultados se hace una adecuación a valores comerciales de los condensadores :

$C_{5B} = 76,7[\mu F]$ (2 condensadores de $30,7\mu F$ + 1 de $15,3 \mu F$ - 380V)

Recalculando $L_{5B} = 3,67[mH]$ y $R_{5B} = 138,34[m\Omega]$.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

ii) Cálculo para la fase C.

Corriente fundamental, $I_{1PC} = 171,3A$, luego $I_{1efC} = 121,13A$ eficaces.

Componente 5^{ta} armónica, $I_{5PC} = 9,95A$, luego $I_{5efC} = 7,03A$.

Corriente de cortocircuito máxima en el PCC: $I_{SCC} = V_{1efC}/Z_S$, luego $I_{SCC} = 6,95kA$.

Obteniendo la relación I_{SC}/I_{1efC} , luego $I_{SC}/I_{1efC} = 40,57$.

A través de la tabla 3.5, se obtiene que $20 < I_{SC}/I_{1efC} < 50$, luego las distorsiones individuales menores que 11 ($n < 11$) tienen que ser no mayor que 7% (K_{nmax}) y cumplir un $THD_I = 8\%$.

A partir de estos valores se escoge K_n para el proyecto del filtro de forma a atender los límites especificados.

- Orden de la armónica para la sintonía del filtro: $n=5$

Ocupando un $K_{5C} = 0,015$ (menor que K_{nmax}) se calculan los elementos del filtro obteniendo:

$R_{5C} = 128,1[m\Omega]$ con esto se obtienen: $L_{5C} = 3,4[mH]$ y $C_{5C} = 82,8[\mu F]$.

De estos valores se hace una adecuación a valores comerciales de los condensadores :

$C_{5C} = 91,8[\mu F]$ (2 condensadores de $45,9 \mu F$ - 380V)

Recalculando $L_{5C} = 3,07[mH]$ y $R_{5C} = 115,58[m\Omega]$.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

Estos valores obtenidos fueron simulados a través del modelo obtenido. La Fig. 4.24 muestra el modelo con la adición de los filtros de 3^{era} y 5^{ta} armónicas calculados

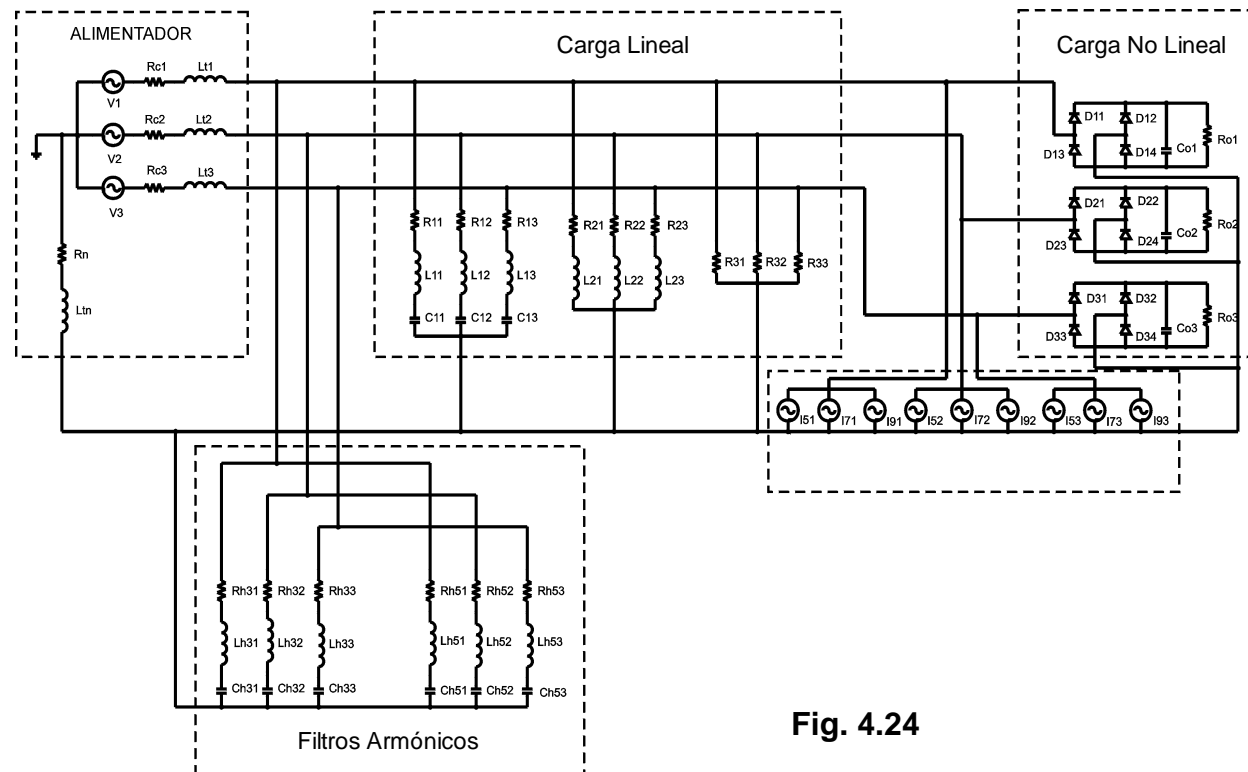


Fig. 4.24

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

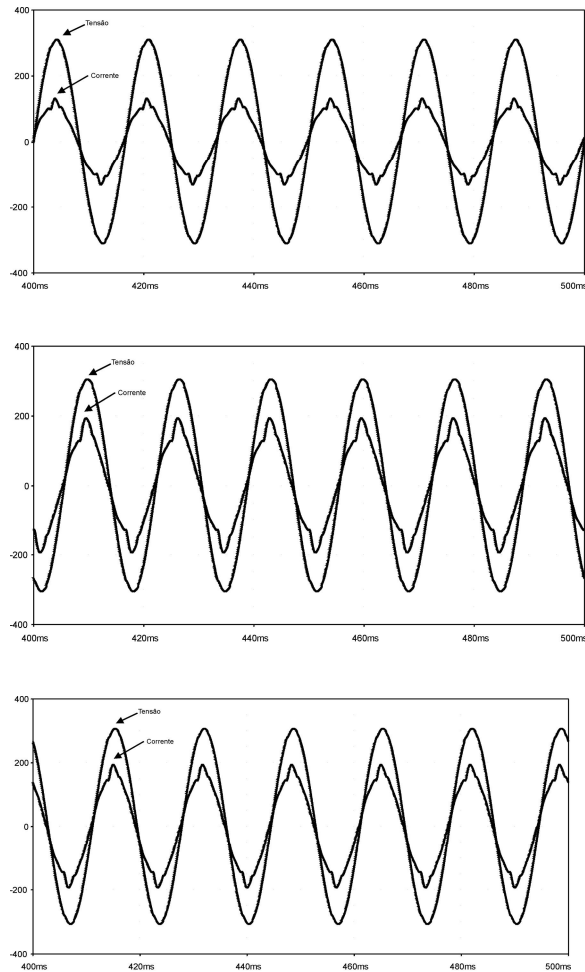
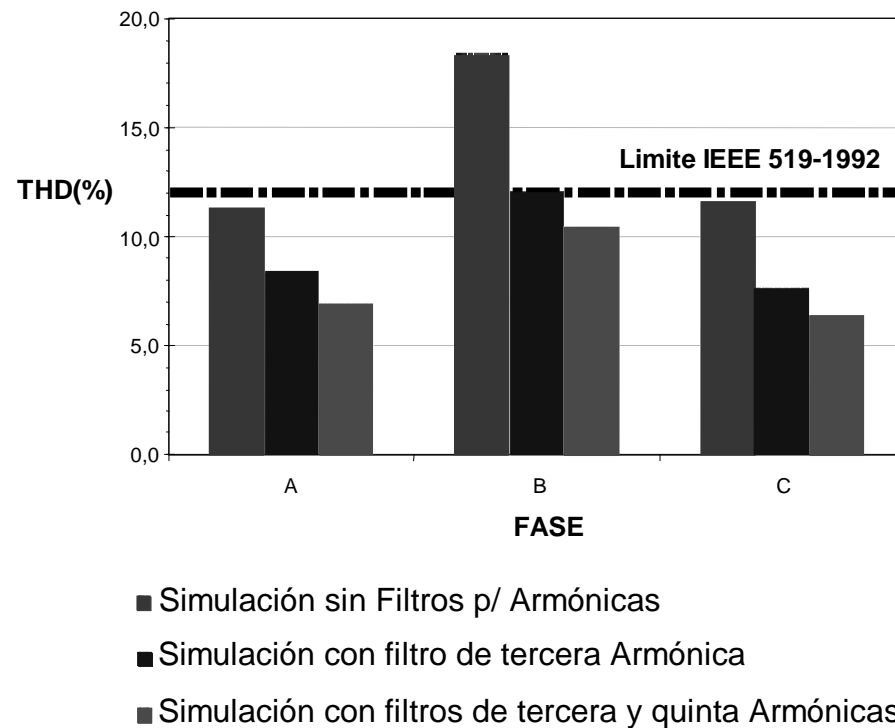


Fig. 4.25

La Fig. 4.25 muestra los resultados de simulación obtenidos donde se tiene las formas de onda de voltaje de fase y corriente obtenidos con la adición de los filtros de 3^{era} y 5^{ta} armónicas, se observa una leve mejoría respecto al circuito sin filtros, en todo caso esto se deberá confirmar a través de un análisis armónico.

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

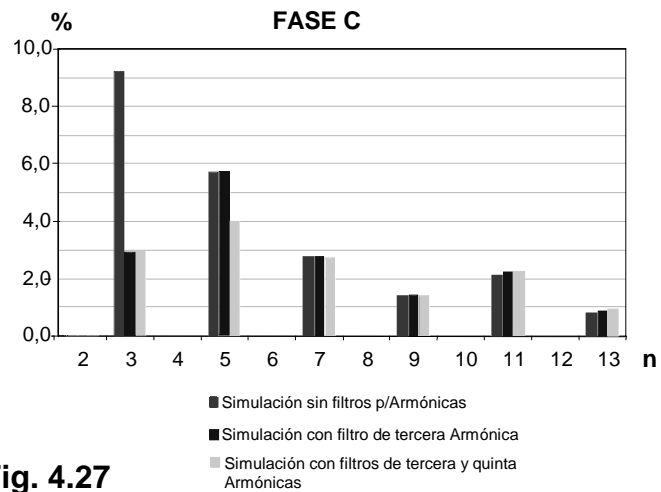
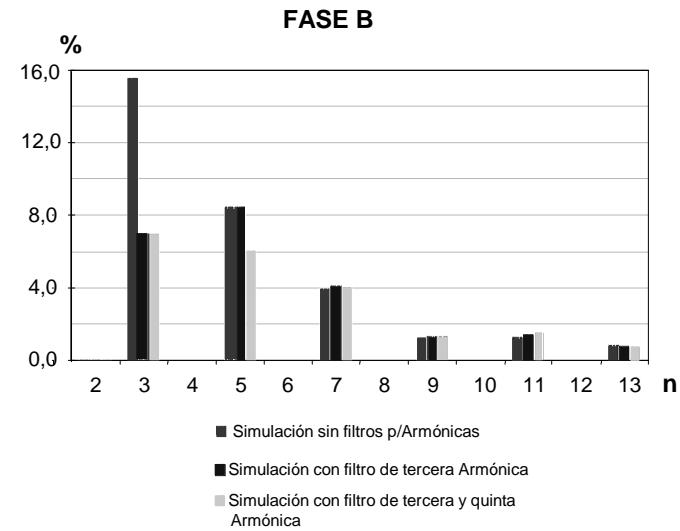
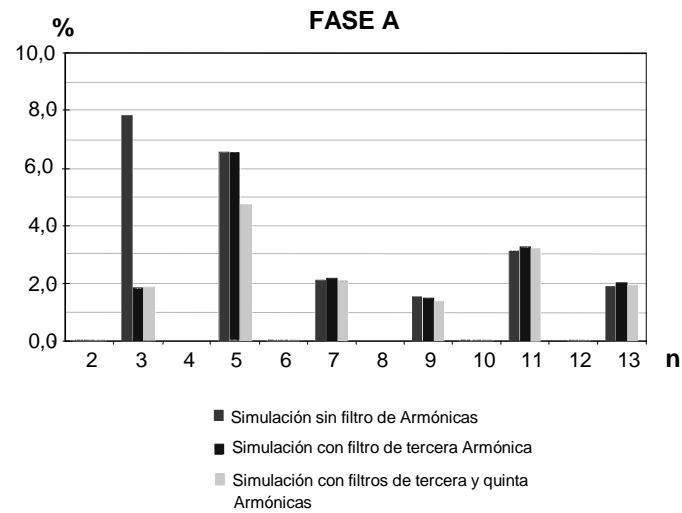


La Fig. 4.26, muestra una comparación entre los resultados para el THD_1 obtenido sin corrección, con corrección con solo filtro de 3era armónica y con corrección con filtros de 3^{era} y 5^{ta} armónicas.

Fig. 4.26

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos



Las figuras muestran las distorsiones de cada armónica en cada una de las fases de la planta.

Fig. 4.27

Capítulo 4

- Una solución a las armónicas a través de filtros pasivos

En plantas comerciales, como se pudo observar, se tiene al alimentador trifásico alimentando cargas monofásicas y de acuerdo a la distribución de estas, se puede verificar un desequilibrio de corriente considerable. Estas asimetrías de corriente dificultan la corrección pasiva de la distorsión armónica, una vez que en sistemas equilibrados muchas de las componentes de corriente se cancelan entre si.

Un factor desfavorable en el proyecto de los filtros, para el caso de tener un factor de desplazamiento próximo de la unidad, es la imposibilidad de adicionar, en demasía, condensadores, esto implica en la necesidad de utilización de inductancias elevadas que consecuentemente dificultan y encarecen la construcción del reactor.