



## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos



### 3.2.2 - Cargas no lineales convencionales

#### 3.2.2.1 - Dispositivos Ferromagnéticos

Ferromagnetismo es la capacidad de ciertos materiales ferrosos para producir flujo magnético en presencia de un campo magnético. Este tipo de fenómeno es el principio bajo el cual transformadores y motores operan.

La característica magnética de estos dispositivos es no lineal, esto es más pronunciado en transformadores que en motores, debido al entrehierro presente entre estator y rotor en los motores.

Los modernos transformadores y máquinas rotativas bajo condiciones de operación en estado estacionario no causan una significativa distorsión en la red. Sin embargo durante disturbios transitorios y cuando operan fuera de su rango normal (sobrecarga o vacío) pueden aumentar considerablemente su contribución armónica.

## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos

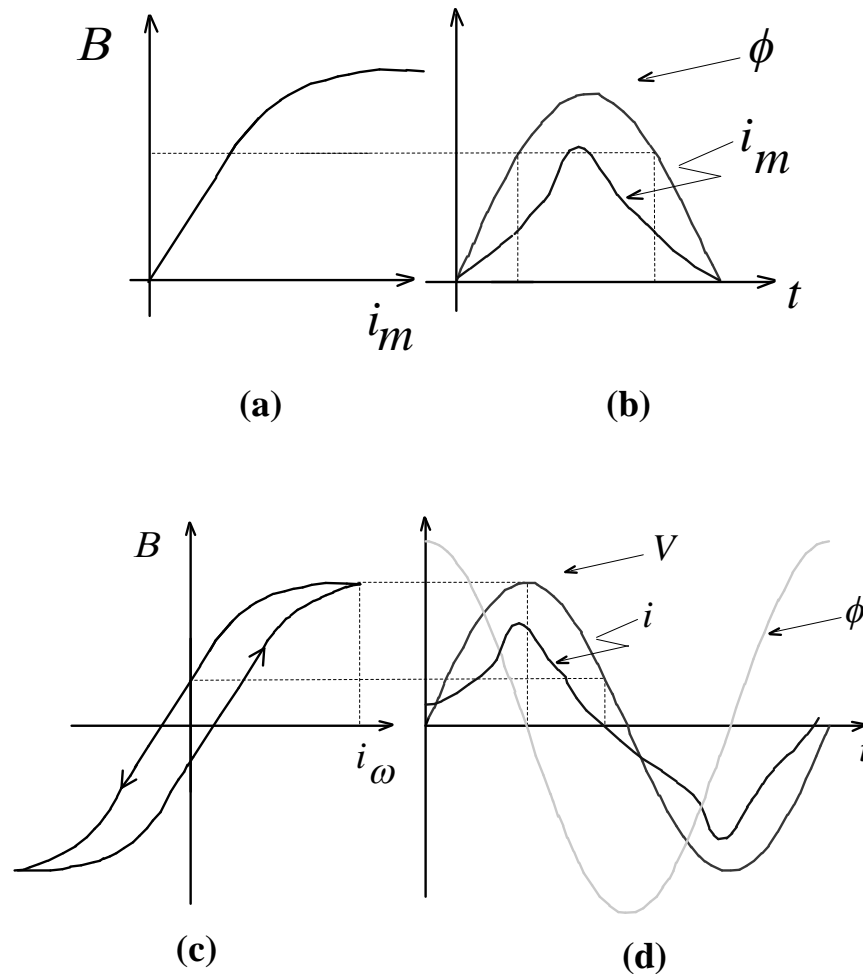


Fig. 3.26

### a) Transformador

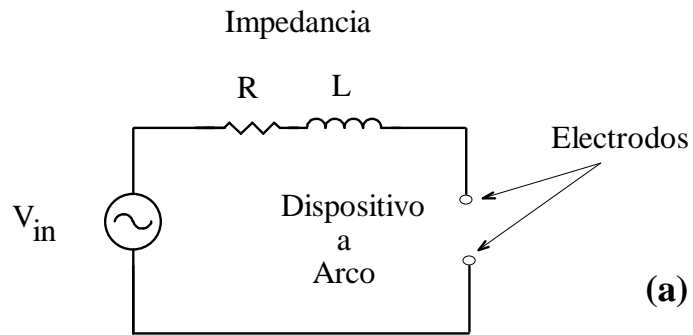
En la Fig. 3.26b,  $\phi$  representa el flujo sinusoidal necesario para balancear el voltaje primario, la corriente magnetizante es dibujada en función del tiempo para cada valor de  $\phi$  y la forma de onda resultante esta lejos de ser sinusoidal.

Cuando la histeresis es incluida, como en el caso de la Fig. 3.26c, la corriente magnetizante sinusoidal ya no es más simétrica en relación a su valor máximo (eje vertical).

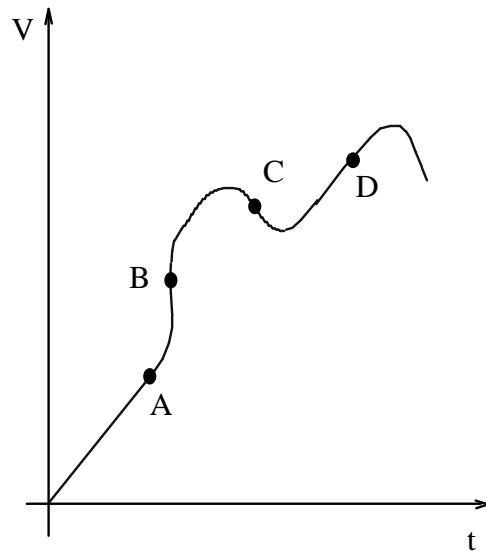
En este caso la corriente en cualquier punto de la onda de densidad de flujo (línea punteada en la Fig. 3.26d) es determinada desde la Fig. 3.26c.

## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos



(a)



(b)

### 3.2.2.2 - Dispositivos a arco

Dispositivos típicos a arco son la iluminación fluorescente, la iluminación a vapor de sodio (lamparas de descarga alta y baja presión), los hornos a arco en los procesos siderúrgicos, y las máquinas soldadoras.

La Fig. 3.27a muestra el circuito equivalente y la Fig. 3.27b nos muestra la característica empírica típica de un dispositivo a arco eléctrico.

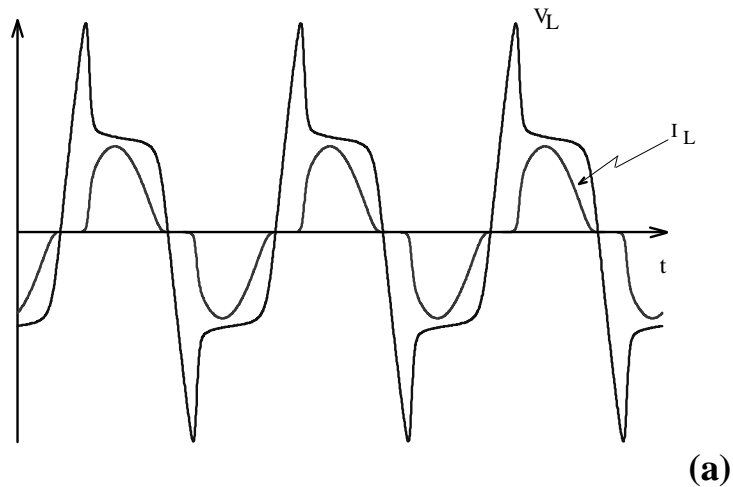
Desde el punto A, la corriente varía proporcional al voltaje aplicado entre los electrodos ( desarrollo lineal).

Cuando la tensión aumenta entre los puntos "A" y "B" un flujo adicional de electrones son utilizados para aumentar la ionización del gas o aire. Esta es la zona de saturación de electrones si el voltaje continua aumentando hasta pasar el punto "C" se alcanzara el estado de total ionización, entre los puntos "C" y "D" ocurre la descarga luminosa y pasando el punto "D" el arco eléctrico hace su aparición.

Fig. 3.27

## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos



La Fig. 3.28a muestra la distorsión en corriente y en tensión causada por un sistema de iluminación fluorescente convencional (con ballast magnético). La Fig. 3.28b muestra la característica no lineal de una lampara fluorescente. Note que la forma de onda del voltaje es totalmente aplanada, con excepción del comienzo de onda que tiene forma de pulso causado por la ignición, esta caída de tensión, aplanamiento, es debido a las altas corrientes que circulan a través del arco.

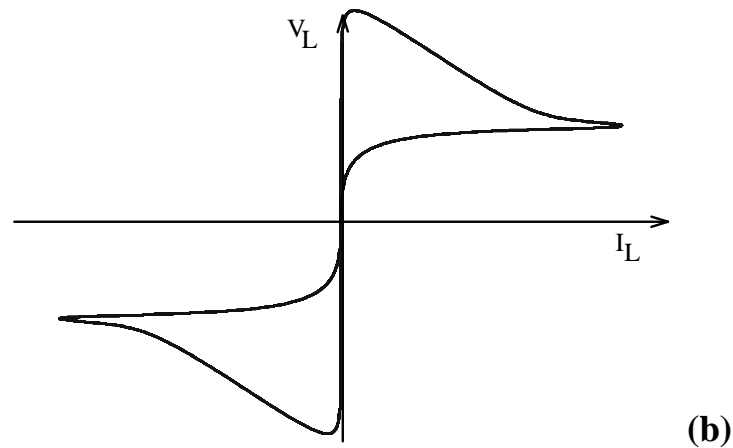
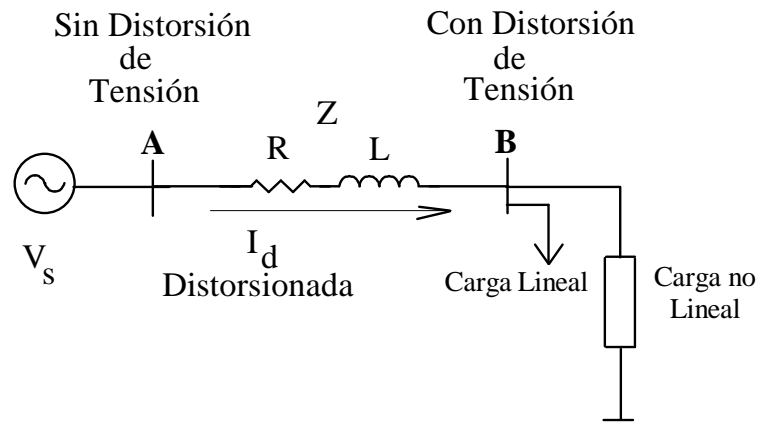


Fig. 3.28

## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos



**Fig. 3.29**

Donde:

$$I_d \cdot Z = \sum_{n=1}^N I_n \cdot (R + j \cdot X_n)$$

y

$$X_n = 2 \cdot \pi \cdot f_o \cdot n \cdot L$$

$f_o$  = frecuencia fundamental.

### 3.3 - EFECTOS DE LAS ARMÓNICAS EN EL SISTEMA Y LOS EQUIPOS ELÉCTRICOS

#### 3.3.1 - Distorsión de tensión en el sistema

La distorsión de tensión en sistemas de potencia que alimenta cargas no lineales son causadas por la interacción de las corrientes de carga distorsionadas con las “impedancias de línea” del sistema.

La Fig. 3.29 muestra una fuente de potencia ideal, por lo tanto no hay distorsión en la barra A, la fuente alimenta una carga no lineal (barra B), vía una red de distribución lineal de impedancia Z, compuesta por R y L, luego el voltaje en B será:

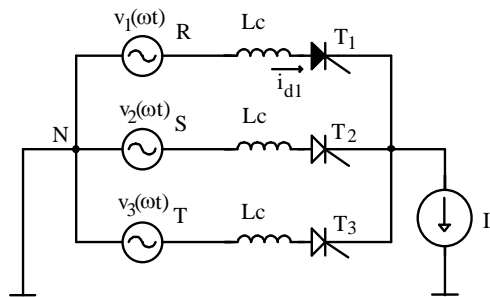
$$V_B = V_s - I_d \cdot Z \quad (3.46)$$

donde  $I_d \cdot Z$  es no sinusoidal, debido a  $I_d$ .

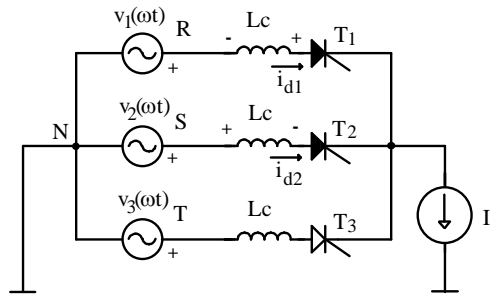
Si el sistema no tiene impedancia ( $Z=0$ ) el voltaje en B será no distorsionado, no importando cuan distorsionada este la corriente  $I_d$ .

## Capítulo 3

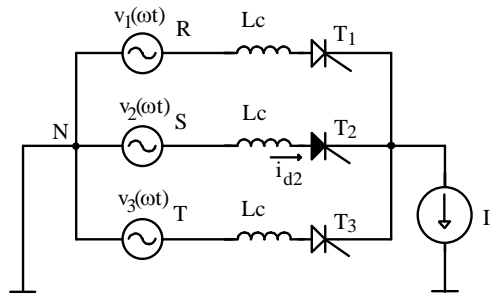
### - Causas y efectos armónicos



Primera Etapa



Segunda Etapa



Tercera Etapa

#### 3.3.1.1 Responsabilidad de la conmutación en la distorsión de tensión (Notches) en los rectificadores de potencia.

El inductor  $L_c$  en serie con  $D_1$  impide que su corriente se anule instantáneamente.

Así durante un intervalo " $\mu$ " de conmutación, los diodos  $D_1$  y  $D_2$  conducen simultáneamente e  $i_{D1} + i_{D2} = I$ .

A partir del ángulo  $\omega t = \mu$ , el diodo  $D_2$  asume toda la corriente de carga, luego  $i_{D2} = I$ .

Para mayor simplicidad de análisis se considera constante la corriente de carga durante la conmutación.

Fig. 3.30

## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos

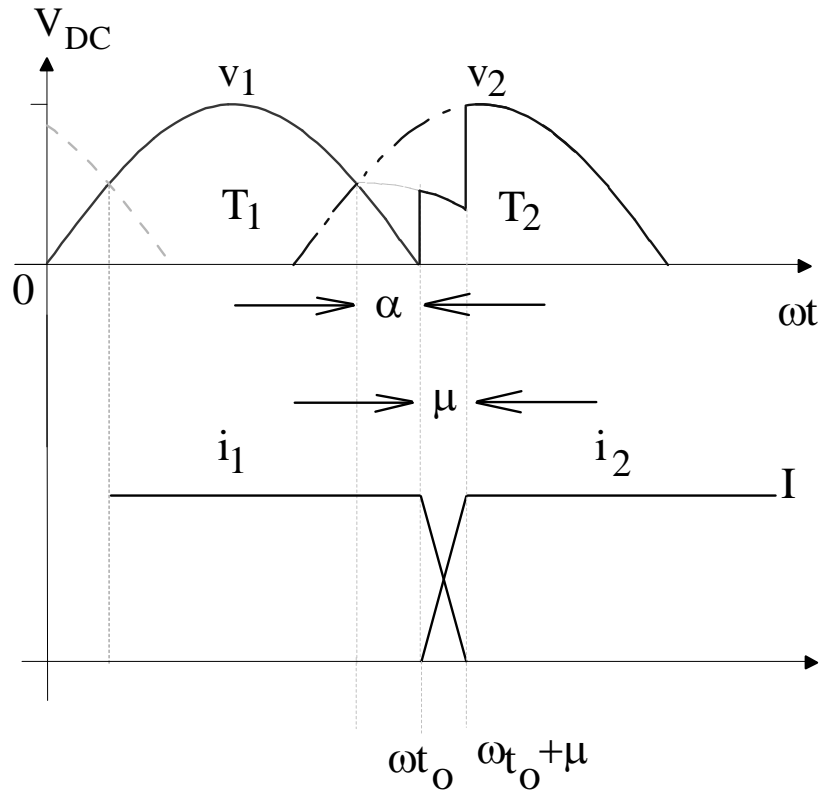


Fig. 3.31

### a) Caída de tensión debido a la conmutación.

Durante la conmutación son validas las siguientes relaciones:

$$V_1 = L_c \cdot \frac{di_1}{dt} + V_{DC} \quad (3.47)$$

$$V_2 = L_c \cdot \frac{di_2}{dt} + V_{DC} \quad (3.48)$$

Así:

$$V_1 + V_2 = L_c \cdot \left[ \frac{di_1}{dt} + \frac{di_2}{dt} \right] + 2 \cdot V_{DC} \quad (3.49)$$

Pero se sabe que:  $i_1 + i_2 = I \quad (3.50)$

luego:

$$\frac{d(i_1 + i_2)}{dt} = 0 \quad (3.51)$$

Debido a que  $I$  es constante durante la conmutación, se tiene:

$$V_{DC} = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (3.52)$$

Durante la conmutación el voltaje de carga  $V_{DC}$  se torna menor que aquel que existirá si  $L_c=0$

## Capítulo 3

### - Causas y efectos armónicos

A continuación es calculado la expresión del valor medio de esta caída de tensión, se sabe que la caída de tensión instantánea es dada por:

$$v_{L_c}(t) = L_c \cdot \frac{di_2}{dt} \quad (3.53)$$

La expresión del valor medio total de esta caída de tensión es:

$$V_{L_{CTotal}} = \frac{3}{2\pi} \cdot \int_{\omega t_o}^{\omega t_o + \mu} L_c \cdot \frac{di_2}{dt} \cdot d\omega t \quad (3.54)$$

ó:

$$V_{L_{CTotal}} = \frac{3}{2\pi} \cdot \int_{\omega t_o}^{\omega t_o + \mu} \omega L_c \cdot \frac{di_2}{d\omega t} \cdot d\omega t \quad (3.55)$$

Cambiando limites, se tiene que:

$$V_{L_{CTotal}} = \frac{3}{2\pi} \cdot \omega L_c \int_0^I di_2 \quad (3.56)$$

Finalmente, genéricamente se tiene:

$$V_{L_{CTotal}} = \frac{d \cdot \omega L_c}{2 \cdot \pi} \cdot I \quad (3.57)$$

Representa el valor medio de la caída de tensión durante la conmutación, donde 'd' es el número de pulsos, para un ciclo de red.



## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos

### b) Obtención teórica del área de un Notches

Sabiendo que el valor medio de la tensión de conmutación para un 'notches' es dado por :

$$\frac{V_{Lc}}{d} = \frac{AREA}{T} \text{ [Volt]} \quad (3.58)$$

Entonces sabiendo que  $T=1/F$ , se obtiene el área:

$$AREA = \frac{V_{Lc}}{d \cdot F} [\text{Volt} \cdot \text{seg}] \quad (3.59)$$

Luego, sustituyendo la ec. (3.57), se tiene:

$$AREA = L'_C \cdot I \cdot 10^6 [\text{Volt} \cdot \mu\text{seg}] \quad (3.60)$$

Luego conociéndose la inductancia de conmutación  $L'_C$  y la corriente de carga,  $I$ , se puede obtener el valor del área de un 'notch'. Para el caso en que el PCC este dividido;  $L'_C$  será solamente la parte que se refleje hacia el lado fuente. Si bien la expresión anterior es una aproximación no deja de ser importante, debido, principalmente, a que se obtiene a priori.

## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos

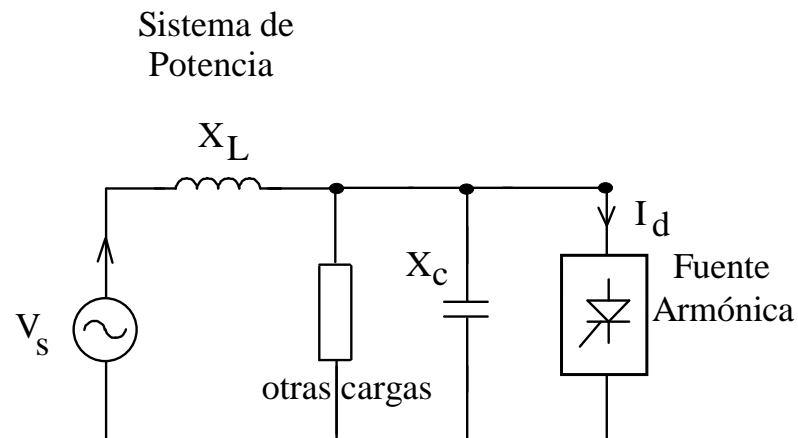


Fig. 3.32

### 3.3.2 - Resonancias

La presencia de condensadores, para la corrección del factor de desplazamiento o del propio filtro pasivo paralelo, e impedancia de fuente juntamente con cargas no lineales en una red, puede llevar a la ocurrencia de resonancias, debido principalmente a la circulación de corrientes armónicas en la frecuencia natural del sistema.

#### 3.3.2.1 - Resonancia Paralela

Esta puede ocurrir de innumerables maneras, la más simple tal vez ocurre cuando un banco de condensadores es conectado en la misma barra de la fuente armónica, la resonancia ocurrirá entre la fuente, el condensador y la reactancia  $X_L$  (Fig. 3.32). Cuando esto ocurre, el orden de la frecuencia resonante puede ser determinada por:

$$h_p = \sqrt{\frac{x_C}{x_L}} = \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q_c}} \quad (3.61)$$

## Capítulo 3

### - Causas y efectos armónicos

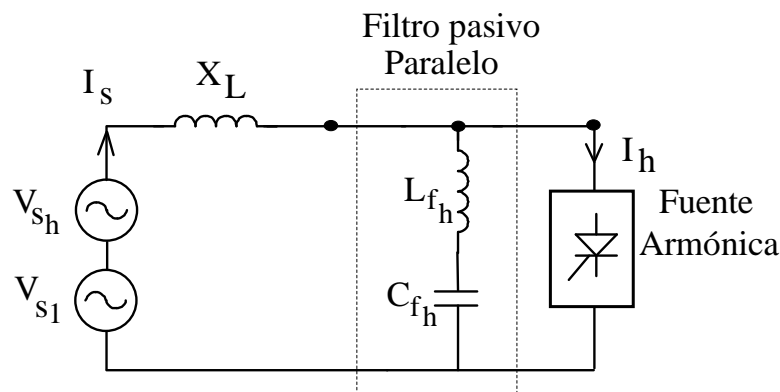


Fig. 3.33

Donde,

$h_p$ : Orden de la armónica en que ocurre la resonancia.

$S_{SC}$ : Potencia de corto circuito [VA] en el punto bajo análisis (usualmente es la potencia de corto circuito del transformador de alimentación).

$Q_C$ : Potencia reactiva capacitiva [VAR] instalada para corrección del factor de desplazamiento.

$X_C$ : Reactancia capacitiva [ $\Omega$ ] en la frecuencia fundamental.

$X_L$ : Reactancia de cortocircuito [ $\Omega$ ] del transformador de alimentación en la frecuencia fundamental más la inductancia parasita del sistema.

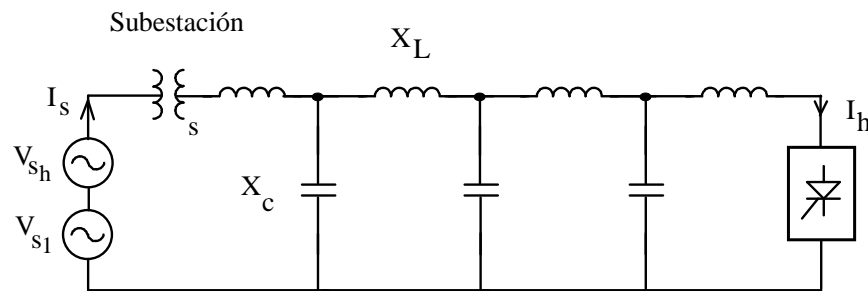
#### 3.3.2.2 - Resonancia Serie

El filtro pasivo paralelo actúa como un sumidero de corriente en una orden armónica determinada, es decir tiene impedancia cero para esa armónica.

Ahora si se considera una fuente de alimentación no ideal, entonces la tensión de fuente tendrá componentes armónicas ( $V_{sh}$  en la Fig. 3.33) la cual a su vez, si tiene una componente en la frecuencia de sintonización del filtro, entrara en resonancia serie con el filtro pasivo paralelo.

## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos



**Fig. 3.34**

### 3.3.2.3 - Multiresonancia

Otro esquema resonante es mostrado en la red de distribución que muestra la Fig. 3.34. Si alguna otra inductancia aparece entre grupos de bancos de condensadores más pequeños, el sistema puede presentar una combinación de muchos circuitos resonantes series y paralelos.

## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos

### 3.3.3 - Efectos en motores y generadores

El principal efecto de las armónicas en máquinas eléctricas de corriente alternada es el aumento de la temperatura de operación, debido al aumento de las pérdidas en el fierro y en el cobre.

Las componentes armónicas afectan el torque de la máquina, pudiendo generar ruido audible aunque la contribución para el torque medio sea pequeña, pueden ocasionar pulsaciones de torque, fatiga de material y hasta resonancias mecánicas de la máquina.

La literatura cita ejemplos de la influencia armónica en el torque de la máquina, así, para una máquina alimentada con tensión sinusoidal con TDH= 4%, donde la 5<sup>ta</sup> y 7<sup>ma</sup> armónicas presentan amplitudes p.u. de 0,03 y 0,02 respectivamente, el torque resultante presentaba componentes de 6<sup>ta</sup> armónica con amplitud variando de 0,01 a 0,05 p.u., en función del ángulo de fase de las armónicas envueltas, estando el valor mínimo de influencia relacionado con las armónicas con el mismo ángulo de fase y el valor más elevado, de influencia, con las armónicas en oposición de fase.

## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos

### 3.3.4 - Efectos en los transformadores

Los transformadores de potencia son vulnerables a condiciones de sobre calentamiento y sobre tensión creadas por la excesiva distorsión armónica.

La temperatura de operación aumenta como resultado de dos tipos de pérdidas:

✉ Las pérdidas proporcionales a la resistencia de las bobinas veces el cuadrado de las corrientes fundamentales y armónicas.

✉ En el núcleo existen las pérdidas por corrientes parásitas (corrientes de Eddy) que son proporcionales al cuadrado de las corrientes armónicas y al cuadrado del orden de la armónica.

El procedimiento descrito a continuación se basa en la recomendación IEEE C.57.100-1986. Donde las pérdidas por estos dos conceptos se pueden expresar mediante:

$$Pérdidas_{Total-NoLineal}(W) = K_{bob.} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} I_{ef_n}^2 + K_{Eddy} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} I_{ef_n}^2 \cdot n^2 \quad (3.62)$$

Típicamente bajo carga lineal las pérdidas por corrientes parásitas son un 15% de las pérdidas por resistencias en las bobinas. Así para **Cargas lineales**, sin armónicas, se tiene:

$$Pérdidas_{Total-Lineal}(W) = (1 + 0.15) \cdot K_{bob.} \cdot I_{ef_1}^2 \quad (3.63)$$

## Capítulo 3

### - Causas y efectos armónicos

La norma ANSI/IEEE C.57.110-1986 indica el procedimiento a ser tomado para el dimensionamiento en potencia del transformador a ser utilizado para alimentación de cargas no lineales. Para tomar en cuenta el aumento de la temperatura de operación con voltajes y corrientes armónicas es establecido **el factor  $K$ , que indica que el calor generado debido a la corriente distorsionada es  $K$  veces mayor de lo que seria para el mismo valor eficaz de una corriente sinusoidal pura** (es decir solamente la fundamental).

En función de esto, ya es posible encontrar transformadores comerciales identificados por este factor  $K$ , como son los: K-4; K-9; K-20; K-40 etc.

El factor  $K$  es expresado como:

$$K = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (n^2 \cdot I_{ef_n}^2)}{\sum_{n=1}^{\infty} I_{ef_n}^2} \quad (3.64)$$

Donde,

$I_{efn}$  = Valor eficaz del  $n$ -ésimo armónico.

$I_{ef1}$  = Valor eficaz de la corriente fundamental

$n$  = Orden armónica

## Capítulo 3

### - Causas y efectos armónicos

ORDEN DE LA ARMÓNICA N	VALOR EN P.U: $I_{EFN}$
1	1
5	0,171
7	0,108
11	0,044
13	0,028
17	0,015
19	0,0098

Tabla Nº 3.1

Empleando las definiciones dadas por las ecuaciones (3.62), (3.63) y (3.64), se calcula la máxima corriente que soporta un transformador con carga no lineal, siendo:

$$I_{max} = \sqrt{\frac{1,15}{1 + 0,15 \cdot K}} \cdot I_{ef1} \quad (3.65)$$

Se puede citar como ejemplo un transformador de 1200A eficaces alimentando una carga no lineal con la composición de corrientes dadas por la tabla Nº 3.1.

Para este ejemplo,  $K=2,6523$ , lo que significa que será generado 2,6523 más calor en relación a una corriente sinusoidal pura de valor eficaz de 1200A. Esto lleva a la necesidad de reducción de la corriente de este transformador (derated), tal que la corriente nominal de operación quede definida en 1088.1A eficaces, significando una reducción de casi un 10% en corriente.



## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos

TIPO DE CARGA	FACTOR
Iluminación incandescente (sin control luminoso)	K-1
Calentamiento resistivo (sin control de temperatura)	K-1
Motores C.A. (sin accionamiento por Conv. Estáticos)	K-1
Iluminación con lamparas de descarga	K-4
UPS con filtro de entrada	K-4
Equipos de soldaje a arco	K-4
Equipos de calentamiento inductivo	K-4
PLC's y controladores electrónicos, (excepto accionamientos de velocidad variables)	K-4
Equipos de telecomunicaciones	K-13
UPS sin filtro de entrada	K-13
Instalaciones eléctricas; Hospitales-clinicas-escuelas	K-13
Instalaciones eléctricas; Montaje industrial	K-13
Computadores de gran porte y periféricos	K-20
Accionamientos de velocidad variable	K-20
Inst. Eléctricas Lab. Industriales, médicos etc.	K-30
Inst. Bancos, oficinas	K-30
Mini y microcomputadores	K-30
Cargas conocidas como grandes generadores de armónicas	K-40

Transformadores para cargas lineales tienen factor  $K=1$ .

La tabla N° 3.2 relaciona el tipo de carga y el factor K correspondiente.

**Tabla N° 3.2**

## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos

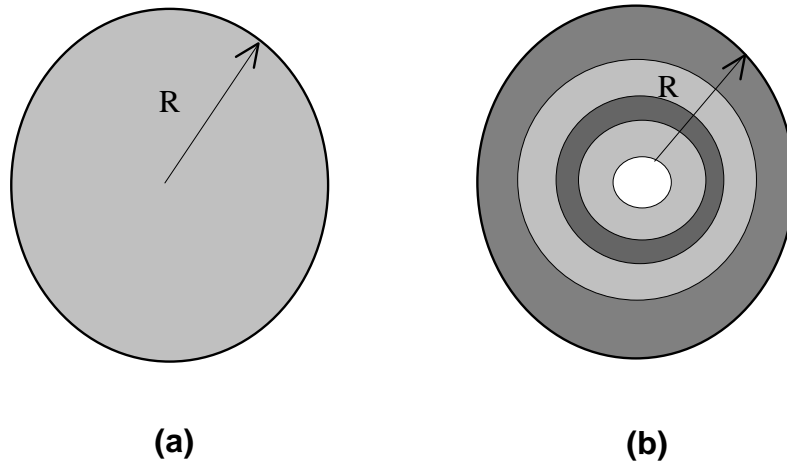
### 3.3.5 - Efectos en equipos electrónicos

Algunos equipos pueden ser muy sensibles a distorsiones en la forma de onda de voltaje. Por ejemplo, si un aparato utiliza el cruce por cero ( u otro aspecto de la onda de voltaje) para realizar alguna acción, distorsiones en la forma de onda pueden alterar o inviabilizar su funcionamiento.

En el caso en que las armónicas penetren en la alimentación del equipo por medio de acoplamientos inductivos y capacitivos (empeorando con el aumento de la frecuencia), ellos pueden también alterar el buen funcionamiento del aparato.

## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos



**Fig. 3.35**

a) Distribución uniforme, con corriente continua.

b) Ilustración gráfica del efecto skin (piel) mostrando un gradiente, el cual indica la tendencia de la corriente a fluir por la periferia del conductor.

### 3.3.6 - Efectos en los conductores

Uno de los principales efectos de las corrientes armónicas en los cables conductores es el sobre calentamiento. La resistencia aparente que el conductor posee aumentará dramáticamente con el aumento de la frecuencia. Este aumento es debido a los efectos Skin y de proximidad. La resistencia del conductor es expresado por:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A_{ef}} \quad (3.66)$$

Donde;

$\rho$  : Resistividad del material (cobre, aluminio etc.)  
 $L$  : Largo del conductor  
 $A_{ef}$  : Area efectiva usada por la corriente.

## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos

### 3.3.7 - Efectos en los sistemas de comunicación

Para un sistema de comunicación dado, la ocurrencia de tales disturbios es función tanto de la amplitud como de la frecuencia de las componentes armónicas. Esta claro que la suposición básica hecha es que el sistema de comunicaciones presente susceptibilidad a tales fenómenos.

Existen algunos indicadores del nivel de calidad de los sistemas de comunicación, como el TIF o TFF (ya definidos) que se basan en curvas de respuesta de frecuencia del oído humano.

Así para obtener una indicación razonable de la interferencia de cada armónica, varios sistemas de peso son empleados, debido a que el efecto de las armónicas no es uniforme sobre todo el espectro de audiofrecuencia.

Este sistema de “pesos” toman en cuenta la respuesta del equipo telefónico y la sensibilidad del oído humano (procedimiento subjetivo).

Apenas como información general, los sistemas de telefonía deben presentar en todo el espectro de audiofrecuencia, ruido psofométrico (voltaje en circuito abierto) inferior a 0,1mV.

## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos

### 3.3.8 - Efectos en los medidores eléctricos

Los instrumentos de medición de energía eléctrica pueden ser afectados por la presencia de armónicas, particularmente si existen condiciones para la ocurrencia de resonancias.

Los dispositivos con disco de inducción, como los que utilizan algunos medidores de energía, son sensibles a componentes armónicos, pueden presentar errores debido a que las componentes armónicas pueden influenciar los resultados de las mediciones en general la THD debe ser elevada (sobre 20%) para que los errores sean significativos.

Los transformadores de potencial y de corriente (TP's y TC's) utilizados para la medición no son afectados, en las condiciones de contenido armónico normalmente encontrados en los sistemas industriales.

Es sabido que los instrumentos electrónicos de medición son capaces de efectuar lecturas basadas en los valores eficaces verdaderos, independientemente de las formas de onda envueltas, en todo caso tales instrumentos aún son de costo bastante superior a los convencionales.

## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos

### 3.3.9 - Efectos en las protecciones eléctricas

Como en todos los demás equipos eléctricos, la presencia de armónicos causa aumento de la temperatura de trabajo y de las pérdidas en los elementos de protección, reduciendo la capacidad de corriente nominal fundamental en régimen permanente, pudiendo reducir la vida útil de estos equipos.

En relación a los fusibles, es necesario emplear una “reducción” (derated) en relación a su valor nominal de corriente, en los mismos moldes del factor K de los transformadores. No existiendo, aún, padrones referentes a niveles de armónicas que tales dispositivos deban tener .

Todas las pruebas son hechas basadas en sistemas eléctricos que están exentos de armónicas.

## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos

### **3.4 - NORMAS RELATIVAS A LA CORRIENTE DE LINEA Y AL FACTOR DE POTENCIA**

#### **3.4.1 - Factor de potencia**

La actual reglamentación Chilena de factor de potencia establece, según lo informado por la Comisión Nacional de Energía en sus oficios Ord. CNE N° 1085 de fecha 18 de octubre de 1996 y Ord. CNE N° 573 de fecha 23 de junio de 1997, en la ley N° 19.489 del 28 de diciembre de 1996 y en la ley N° 10.336.

En lo que se refiere a recargo por factor medio mensual, el cobro o facturación por consumos efectuados en instalaciones cuyo factor de potencia medio sea inferior a 0,93, se recargará en 1% por cada 0,01 en que dicho factor baje de 0,93.

## Capítulo 3

- Causas y efectos armónicos

### 3.4.2 - Normas en relación al contenido armónico

A partir de la proliferación de cargas no lineales del tipo conmutado, los comités de normalización pasaron a estudiar los efectos en los sistemas eléctricos. Estos estudios tenían como meta dos puntos básicos: la preservación de la naturaleza sinusoidal del voltaje de los sistemas eléctricos y de los dispositivos a los conectados contra los efectos de la distorsión armónica de la corriente.

En esta óptica, ya en los inicios de los 70, tanto el IEC (International Electrotechnical Commission) en Europa, como el IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) en los Estados Unidos anunciaron la primera versión de normas sobre el asunto, que en la versión actual son conocidas como las normas: IEC-555-2; IEC16000-3-4 y la IEEE 519-1992 respectivamente .

En Chile la comisión nacional de energía, basándose en la norma de la IEEE 519-1992, dispuso normas respecto al contenido armónico de la corriente y el voltaje , a través de las **disposiciones transitorias** dadas en el artículo 18, letra (b), respecto a corrientes armónicas, el cual es dado a continuación:



## Capítulo 3

### - Causas y efectos armónicos

#### DISTORSIÓN ARMÓNICA MÁXIMA DE LA CORRIENTE EN PORCENTAJE DE IL (<69KV)

h: Orden de las armónicas impares						
Isc/IL	< 11	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 20*	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 - 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 - 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 - 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Las armónicas pares son limitadas a 25% del limite de la armónica impar inmediatamente superior

No es permitido componente continua

\*Todos los equipos de generación de potencia están limitados a los valores indicados de distorsión armónica de corriente, independiente de la razón  $I_{SC}/I_L$ .

Isc: Máxima corriente de corto circuito en el PCC. PCC es el nudo más cercano de la red donde dos o más usuarios obtienen energía eléctrica.

IL: Máxima corriente de carga (valor efectivo) de frecuencia fundamental en el PCC. Se calcula como el promedio de los doce (12) valores previos de las máximas demandas mensuales.

Si la fuente productora de armónicas es un convertidor con un número de pulsos “q” mayor que seis, los limites indicados en la tabla deberán ser aumentados por un factor igual a la raíz cuadrada de un sexto de “q”.

**Tabla N° 3.3**

#### a) Norma para las corrientes armónicas

En condiciones normales de operación, se deberá cumplir para un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos que: el 95% de los valores estadísticos de las corrientes armónicas y de su índice de distorsión total, cumplen con lo indicado en la tabla 3.3.

El valor estadístico de las corrientes armónicas y de su índice de distorsión será obtenido para cada intervalo de diez minutos, como resultado de evaluar estadísticamente un conjunto de mediciones efectuadas en dicho intervalo, de acuerdo a lo establecido en la norma técnica correspondiente:

## Capítulo 3

### - Causas y efectos armónicos

#### b) Norma para las armónicas de voltaje.

La norma referente al voltaje es dado por el artículo 25 letra (f) que dice:

En todo sistema eléctrico, en condiciones normales de operación, se deberá cumplir para un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos, que el 95% de los valores estadísticos de los voltajes armónicos y de su índice de distorsión total, cumplen con lo indicado en la tabla siguiente. El valor estadístico de los voltajes armónicos y de su índice de distorsión es obtenido para cada intervalo de diez minutos, como resultado de evaluar estadísticamente un conjunto de mediciones efectuadas en dicho intervalo, de acuerdo a lo establecido en la norma correspondiente.

ARMÓNICAS IMPARES NO MÚLTIPLO DE 3			ARMÓNICAS IMPARES MÚLTIPLO DE 3			PARES		
Orden	Armónica voltaje (%)		orden	voltaje (%)		orden	voltaje (%)	
	≤ 110 kV	>110 kV		≤ 110 kV	>110 kV		≤ 110 kV	>110 kV
5	6	2	3	5	2	2	2	1.5
7	5	2	9	1.5	1	4	1	1
11	3.5	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.5
13	3	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.4
17	2	1	>21	0.2	0.2	10	0.5	0.4
19	1.5	1				12	0.2	0.2
23	1.5	0.7				>12	0.2	0.2
25	1.5	0.7						
>25	0.2+1.3*25/h	0.2+0.5*25/h						

**Tabla N° 3.4**

Los valores de voltajes armónicos se expresan en porcentaje del voltaje nominal.

## Capítulo 3

### - Causas y efectos armónicos

Al aplicar la estadística del 95 % a los valores registrados del índice de distorsión total armónica, se debe cumplir, para un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos y para **tensiones iguales o inferiores a 110 kV, que este índice deberá ser inferior a 8%.**

Al aplicar la estadística del 95 % a los valores registrados del índice de distorsión total armónica, se debe cumplir, para un período de registro de mediciones de una semana cualquiera del año o de siete días consecutivos y para **tensiones superiores a 110 kV, que este índice deberá ser inferior a 3%** y se calculará de acuerdo con la siguiente expresión:

$$DistorsionTotal = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=50} V_{efn}^2}}{V_{ef1}} \quad (3.67)$$

En que:

$V_{efn}$  es la componente armónica de voltaje de orden n  
 $V_{ef1}$  es la componente fundamental de voltaje.

## Capítulo 3

### - Causas y efectos armónicos

Si bien la norma chilena no dice nada en relación a los 'Notches', (estos implícitamente están contenidos en la tabla que normaliza la distorsión del voltaje) de igual forma es mostrado en la tabla N° 3.5 la recomendación dada por la IEEE en relación a ellos. Por tanto, son observados los límites referentes a la profundidad y área de los 'Notches' de voltaje, causados por la conmutación de interruptores de convertidores estáticos.

	APLICACIONES ESPECIALES	SISTEMAS COMUNES	SISTEMAS DEDICADOS
<b>Profundidad de los hundimientos (Notches)</b>	10 % de $V_{ef1}$	20 % de $V_{ef1}$	50 % de $V_{ef1}$
<b>THD</b>	3 %	5 %	10 %
<b><math>A_n</math>: Area de los hundimientos (Notches) [V. us]</b>	16400	22800	36500

Obs.

**Tabla N° 3.5**

El valor de  $A_n$  para sistemas con  $V_{ef1}$  debe ser multiplicado por el factor  $V_{ef1}/480$

Aplicaciones especiales incluyen hospitales y aeropuertos.

Sistemas dedicados son aquellos exclusivos para alimentación de convertidores estáticos.

El área  $A_n$  es calculada en [V\*μs] para condiciones nominales de voltaje y corriente.