

Estudios de armónicas en Sistemas Eléctricos de Potencia

Curso: Transitorios electromagnéticos en Sistemas de Potencia - 2023

Prof. Andrés Cardozo
acardozo@fing.edu.uy

Armónicas

- **Definiciones**
- **Revisión teórica**
- **Generadores de armónicas (ejemplos)**
- **Efecto de las armónicas (banco de capacitores)**
- **Técnicas/herramientas de estudio**
- **Presentación de casos**

Para empezar: contexto...

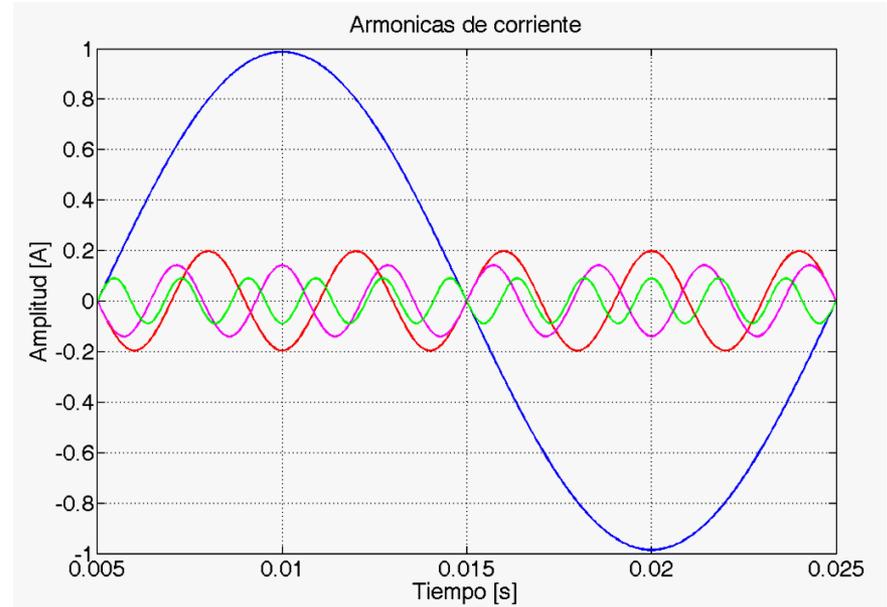
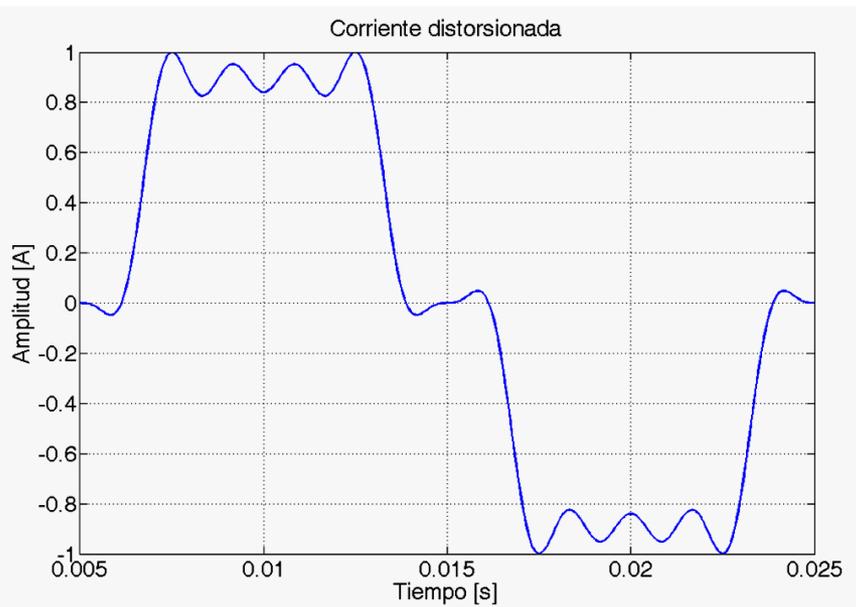


Definiciones

Componente armónica (IEV 103-07-25): “sinusoidal component of the Fourier series of a periodic quantity, the harmonic order of which is an integer number greater than one.”

“Note 1 to entry: A component of harmonic order n (with $n > 1$) is generally designated “ n^{th} harmonic”. The designation of the fundamental”.

Importante: Para hablar de armónicas tenemos que disponer de una señal periódica. En nuestro SIN la frecuencia fundamental es 50 Hz.



Revisión teórica

Para funciones periódicas:

$$f(t + nT) = f(t)$$

$n = 0, 1, 2, \dots$ y $T =$ período

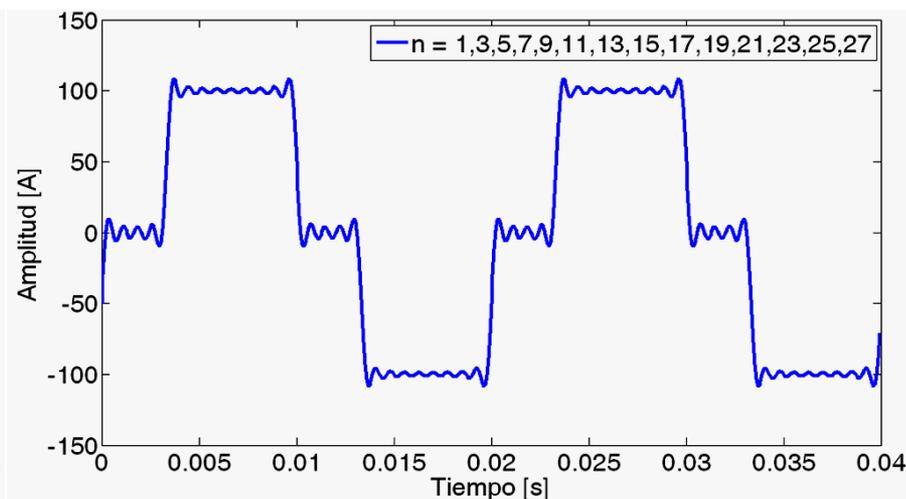
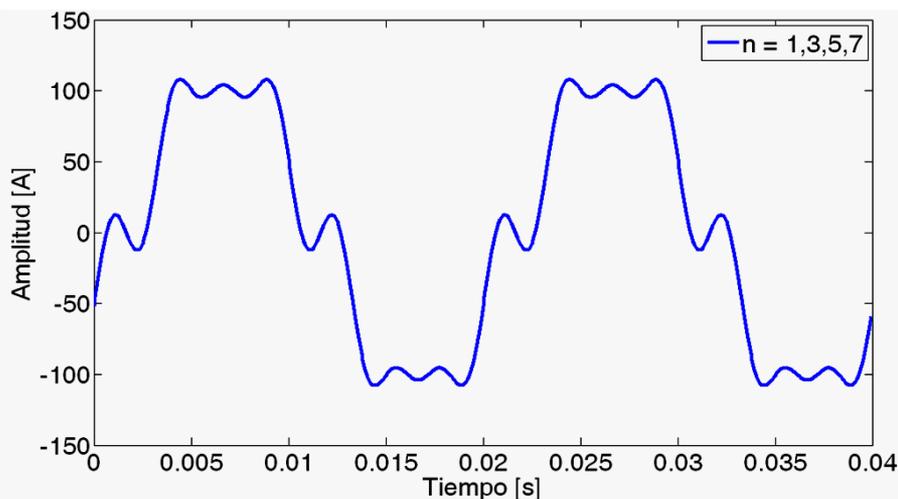
Serie de Fourier:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt$$

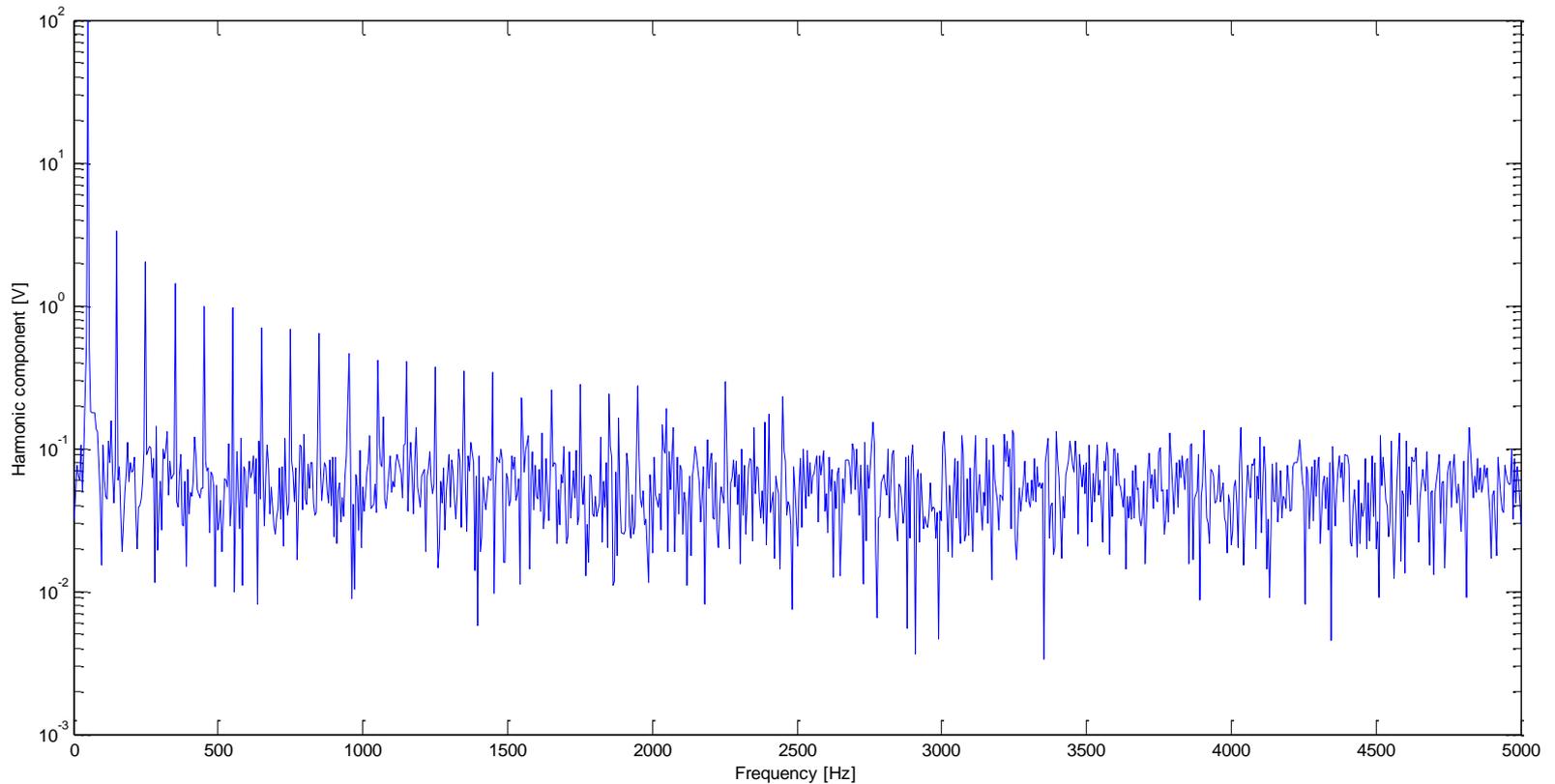
$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt$$



Revisión teórica

Para funciones no periódicas:



$$\widehat{F_{i*50 \text{ Hz}}} = \sqrt{F_{i*50-5 \text{ Hz}}^2 + F_{i*50 \text{ Hz}}^2 + F_{i*50+5 \text{ Hz}}^2}$$

Revisión teórica

Total Harmonic Distortion (THD): Es un parámetro para ponderar el contenido armónico total, aplicable tanto a tensiones como a corrientes.

$$\text{THD}_U(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N \hat{U}_i^2}}{\hat{U}_1} \cdot 100$$

$$\text{THD}_I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N \hat{I}_i^2}}{\hat{I}_1} \cdot 100$$

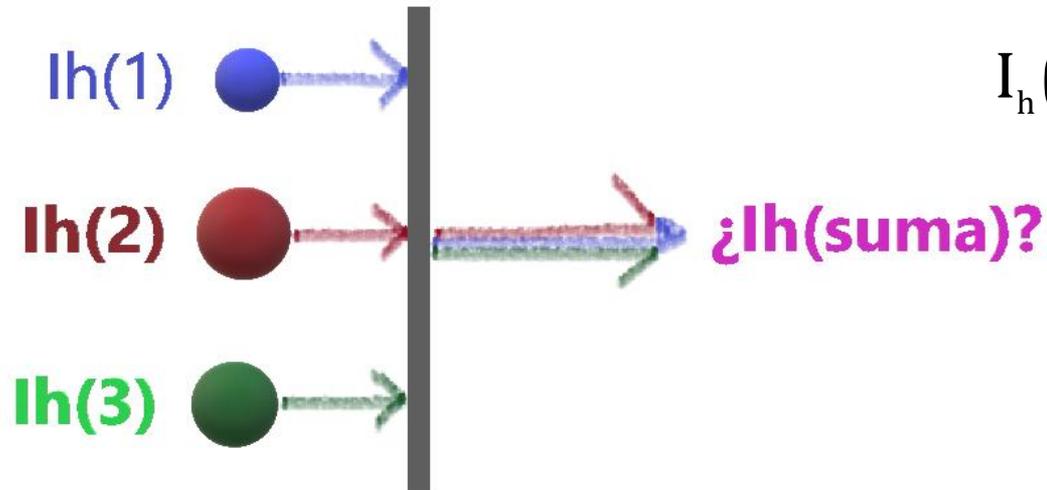
Total Demand Distortion (TDD): Es un parámetro aplicable sólo para corrientes, que evalúa la distorsión de corriente en función de la corriente máxima contratada por el usuario (I_L).

$$\text{TDD}_I(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^N \hat{I}_i^2}}{I_L} \cdot 100$$

Revisión teórica

Combinación de armónicas: A tener en cuenta...

a) Diversidad en el tiempo, diferencia de fases:



IEC/TR 61000-3-6:

$$I_h(\Sigma) = \left[I_h(1)^\beta + I_h(2)^\beta + I_h(3)^\beta \right]^{1/\beta}$$

Orden del armónico	β
$h < 5$	1,0
$5 \leq h \leq 10$	1,4
$h > 10$	2,0

b) Topología del circuito bajo estudio

Generadores de armónicas

Previo a la aparición de dispositivos con electrónica de potencia:

- **Hornos de arco**
- Transformadores
- Lámparas fluorescentes
- Máquinas eléctricas

Dispositivos que integran electrónica de potencia:

- **Controladores de velocidad** (ventiladores, bombas y controladores de procesos).
- Switches de estado sólido que modulan corrientes de control, intensidad de luz, calor, etc.
- Fuentes controladas para equipos electrónicos.
- **Rectificadores** (equipos de soldadura, cargadores de baterías).
- **Compensadores estáticos de potencia reactiva.**
- **Inversores**

Equipamiento que integra EdeP

¿Dónde se encuentran dispositivos con Electrónica de Potencia?

En casi todos lados...

- **Industrias:**

- Control de motores
 - Sistemas de control

- **Iluminación**

- Balastos electrónicos para lámparas fluorescentes y lámparas LED
 - Dimmers

- **Generación (concentrada y distribuida) y transmisión de energía**

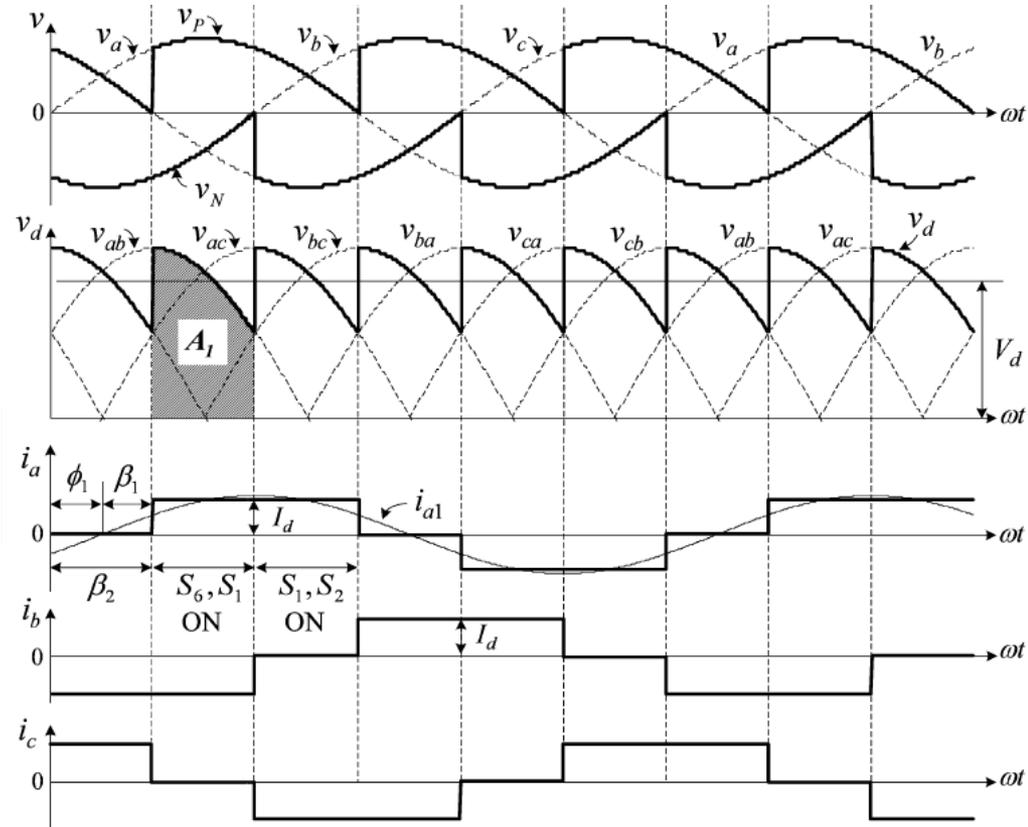
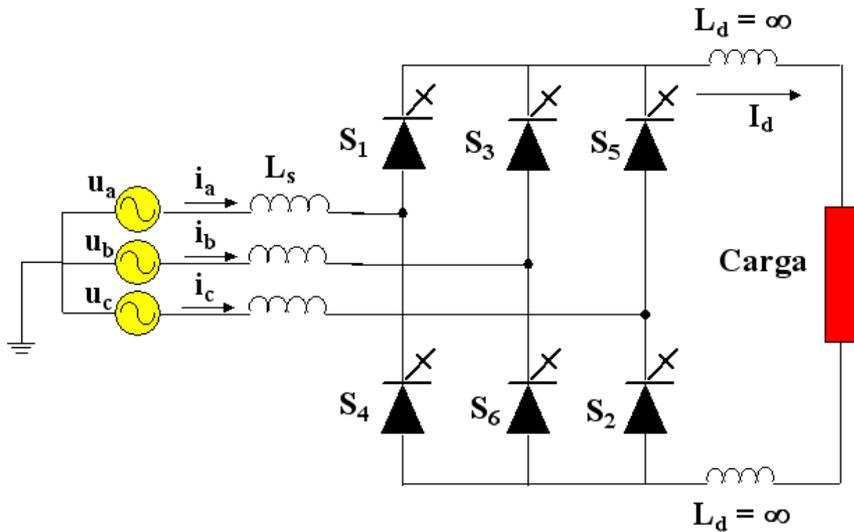
- Solar fotovoltaica
 - Eólica
 - HVDC – Conversión de frecuencia

- **Residencias y oficinas:**

- PC's
 - Televisores
 - Microondas
 - Equipamiento eléctrico de oficina (impresoras, PC's, etc.)

Ejemplo: Rectificador trifásico

Convertidor trifásico de 6 pulsos:



La corriente I_d es siempre positiva

Si $0 < \alpha < 90^\circ$ ➔ La tensión U_d es positiva ➔ $P > 0$

Si $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ ➔ La tensión U_d es negativa ➔ $P < 0$

Ejemplo: rectificador trifásico

La corriente de línea es:

$$i_R = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left[\cos(\omega t) - \frac{1}{5} \cos(5\omega t) + \frac{1}{7} \cos(7\omega t) - \frac{1}{11} \cos(11\omega t) + \frac{1}{13} \cos(13\omega t) + \dots \right]$$

No tiene armónicos múltiplos de 3

Tiene armónicas de orden $6k \pm 1$, k entero ("Armónicas características").

- $6k+1$ (sec. positiva)
- $6k-1$ (sec. Negativa)

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d$$

$$I_n = \frac{I_1}{n}$$

Suelen conectarse a través de un transformador...

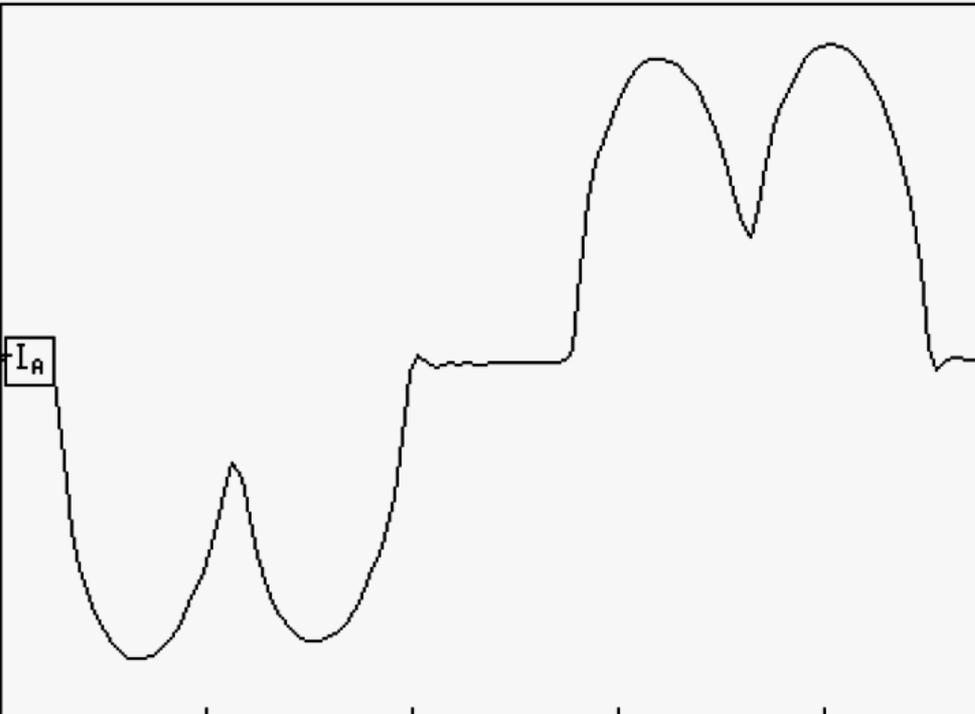
- Si el primario o secundario está en triángulo no cambia el contenido armónico. Sí cambia el signo en alguna de las componentes.

Generadores de armónicas

Ejemplo de medición de distorsión armónica en un Variador de Velocidad

MCC26023 (VSD2602-60)

Phase A Current Waveform. Oct 13 1995 16:35:50



3.325 milliseconds/div. 151.33A RMS CF = 1.59

Harmonic Number $h(n)$ vs. Individual Harmonic Distortion for an Adjustable Speed Drive Input Current with Motor Running at 60 Hz

Harmonic Distortion Spectrum					
$h(n)$	IHD (%)	$h(n)$	IHD (%)	$h(n)$	IHD (%)
0	0.15	11	9.99	22	0.39
1	100	12	0.03	23	2.95
2	4.12	13	0.19	24	0.02
3	0.78	14	0.48	25	0.66
4	1.79	15	0.07	26	0.15
5	35.01	16	0.52	27	0.05
6	0.215	17	4.85	28	0.22
7	2.62	18	0.03	29	1.79
8	1	19	0.67	30	0.03
9	0.06	20	0.31	31	0.64
10	0.73	21	0.04		

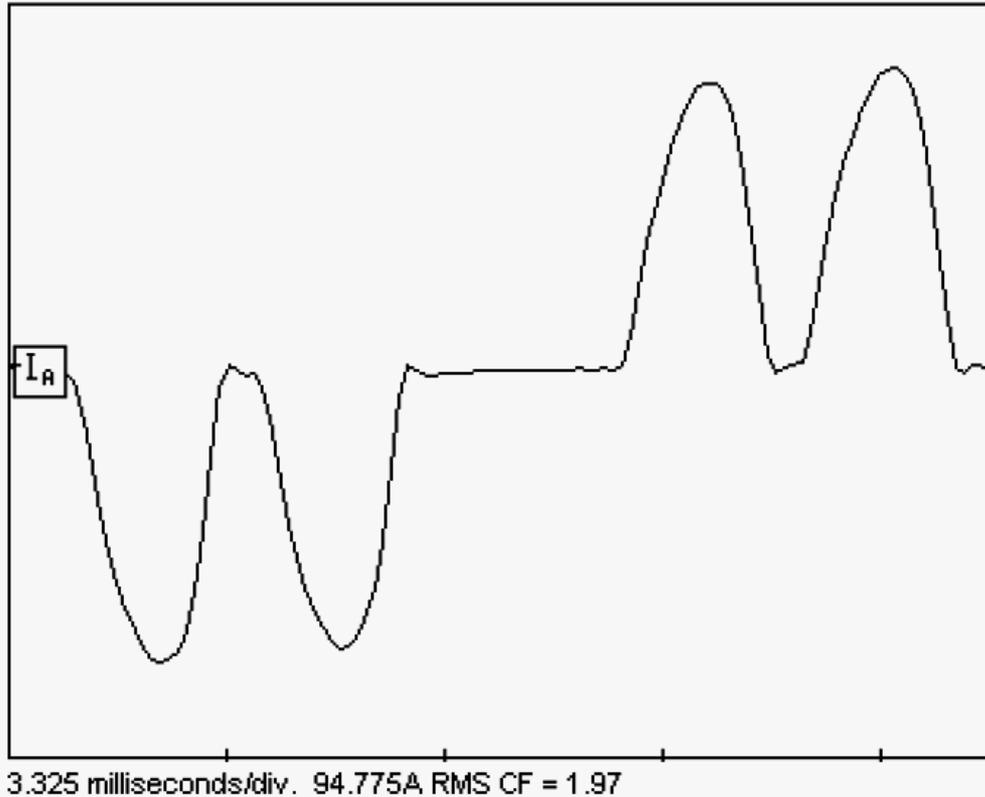
Note: Total harmonic distortion = 37.3%.

Generadores de armónicas

Ejemplo de medición de distorsión armónica en un Variador de Velocidad

MCC26023 (VSD2602-45)

Phase A Current Waveform. Oct 13 1995 16:26:26



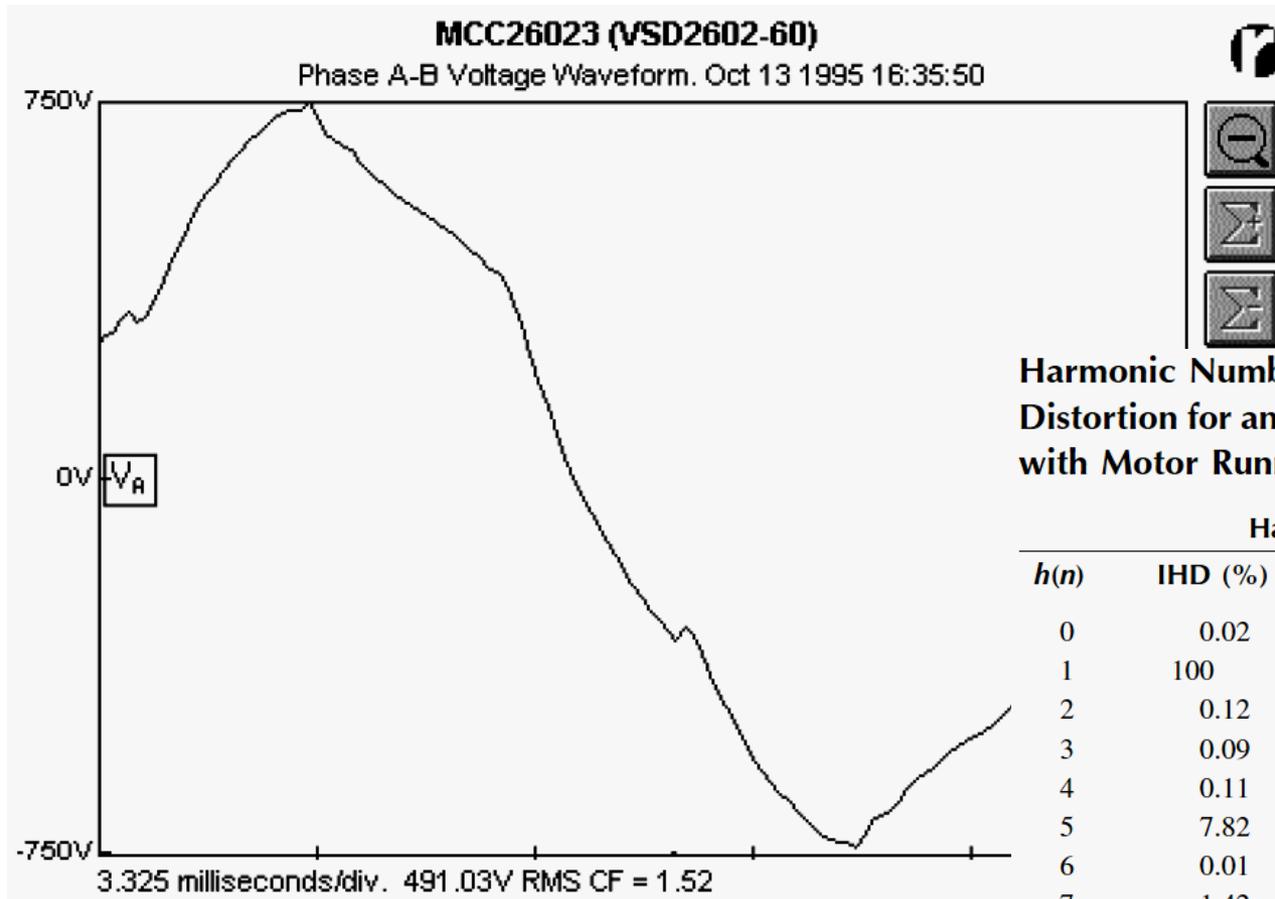
Harmonic Number $h(n)$ vs. Individual Harmonic Distortion for an Adjustable Speed Drive Input Current with Motor Running at 45 Hz

Harmonic Distortion Spectrum					
$h(n)$	IHD (%)	$h(n)$	IHD (%)	$h(n)$	IHD (%)
0	2.23	11	6.36	22	0.16
1	100	12	0.03	23	3.75
2	4.56	13	9.99	24	0.12
3	2.44	14	0.11	25	1.73
4	3.29	15	0.62	26	0.42
5	62.9	16	0.35	27	0.33
6	1.4	17	5.22	28	0.22
7	36.1	18	0.35	29	1.68
8	0.43	19	1.96	30	0.26
9	0.73	20	0.64	31	1.36
10	0.58	21	0.22		

Note: Total harmonic distortion = 74.2%.

Generadores de armónicas

Ejemplo de medición de distorsión armónica en un Variador de Velocidad



Harmonic Number $h(n)$ vs. Individual Harmonic Distortion for an Adjustable Speed Drive Input Voltage with Motor Running at 60 Hz

Harmonic Distortion Spectrum					
$h(n)$	IHD (%)	$h(n)$	IHD (%)	$h(n)$	IHD (%)
0	0.02	11	1.87	22	0.07
1	100	12	0.02	23	0.46
2	0.12	13	0.92	24	0.04
3	0.09	14	0.07	25	0.36
4	0.11	15	0.01	26	0.06
5	7.82	16	0.04	27	0.03
6	0.01	17	0.61	28	0.07
7	1.42	18	0.06	29	0.4
8	0.06	19	0.36	30	0.02
9	0.04	20	0.06	31	0.34
10	0.03	21	0.12		

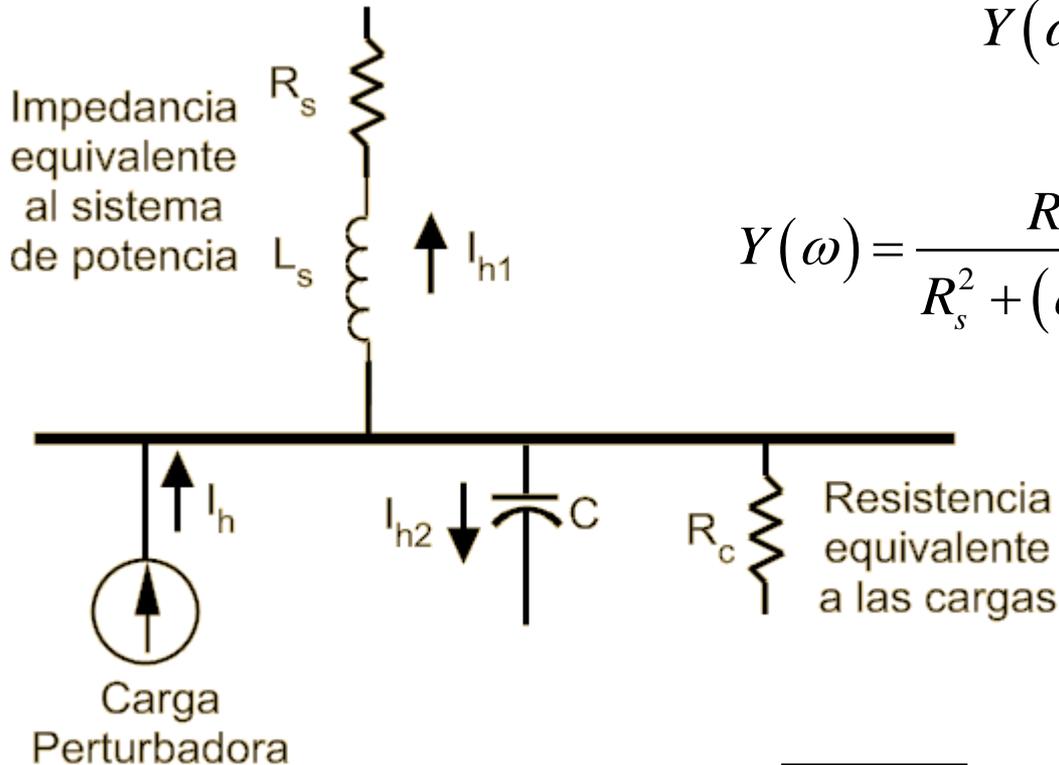
Note: Total harmonic distortion = 8.3%.

Manejo conceptual de la distorsión armónica

- Se fijan límites (para las armónicas individuales e indicadores globales) de acuerdo a los efectos de las armónicas en equipos e instalaciones.
- Para las mediciones con fines regulatorios o contractuales se suelen utilizar equipos clase A según IEC 61000-4-30.
- Se suele considerar un período de medición de al menos una semana “en actividad usual del negocio” (1008 valores 10-minutales), y se caracteriza la distribución de valores mediante un percentil (usualmente el P95).
- Son los percentiles los que habitualmente se comparan contra los límites de normas técnicas internacionales y/o reglamentos.
- Es usual realizar estudios para estimar distorsión armónica en casos en que se conectan cargas importantes (por porte o susceptibilidad) al sistema, en casos en los que se quiere explotar la red en una situación límite o se quiere retrasar inversiones.

Efectos de las armónicas

➤ Resonancia paralelo



$$Y(\omega) = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_s + j\omega L_s} + j\omega C$$

$$Y(\omega) = \frac{R_s}{R_s^2 + (\omega L_s)^2} + \frac{1}{R_c} + j \left[\omega C - \frac{\omega L_s}{R_s^2 + (\omega L_s)^2} \right]$$

En resonancia se anula la parte reactiva de la admitancia

$$\omega C - \frac{\omega L_s}{R_s^2 + (\omega L_s)^2} = 0$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_s C}} \sqrt{1 - \frac{R_s^2 C}{L_s}} \approx \frac{1}{\sqrt{L_s C}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C}}$$

Efectos de las armónicas

Alternativamente la frecuencia de resonancia se puede calcular como:

$$f = f_0 \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}}$$

- f_0 es la frecuencia fundamental del sistema
- S_{cc} es la potencia de cortocircuito donde se coloca el capacitor
- Q_c es la potencia reactiva del banco de compensación

En la frecuencia de resonancia, la impedancia equivalente de la red se hace muy grande y resulta:

$$Z(\omega_r) = \frac{R_s^2 + (\omega L_s)^2}{R_s} \approx \frac{(\omega L_s)^2}{R_s} = Q \cdot XL_s$$

La magnitud de la impedancia vista desde los generadores de corrientes armónicas depende del factor de merito Q del circuito.

En sistemas de Distribución: $2 \leq Q \leq 5$

En sistemas de Transmisión: $5 \leq Q \leq 20$

En el secundario de grandes transformadores : $Q > 30$

Efectos de las armónicas

Durante la resonancia paralelo, una pequeña corriente armónica puede causar una importante tensión armónica:

$$U_p = Q \cdot XL_s \cdot I_h = QU_h$$

En el punto de resonancia, las corrientes en el capacitor y en el sistema de potencia son:

$$I_c = \frac{Q \cdot XL_s \cdot I_h}{X_c}$$

$$I_s = \frac{Q \cdot XL_s \cdot I_h}{XL_s} = Q \cdot I_h$$

Las corrientes en el capacitor y en el sistema de potencia se magnifican Q veces. Este fenómeno puede causar fallas en los capacitores, explosiones de fusibles y recalentamiento de los transformadores.

Efectos de las armónicas

Ejemplo 1: Instalación de bancos de capacitores en un sistema de transmisión.

Transformadores: 2x300 MVA
500/132 kV
 $Z_{cc} = 18.5 \%$
 $X/R = 20$

Bancos de capacitores: 2x50 Mvar
 $U_n = 132 \text{ kV}$
 $I_n = 218.5 \text{ A}$

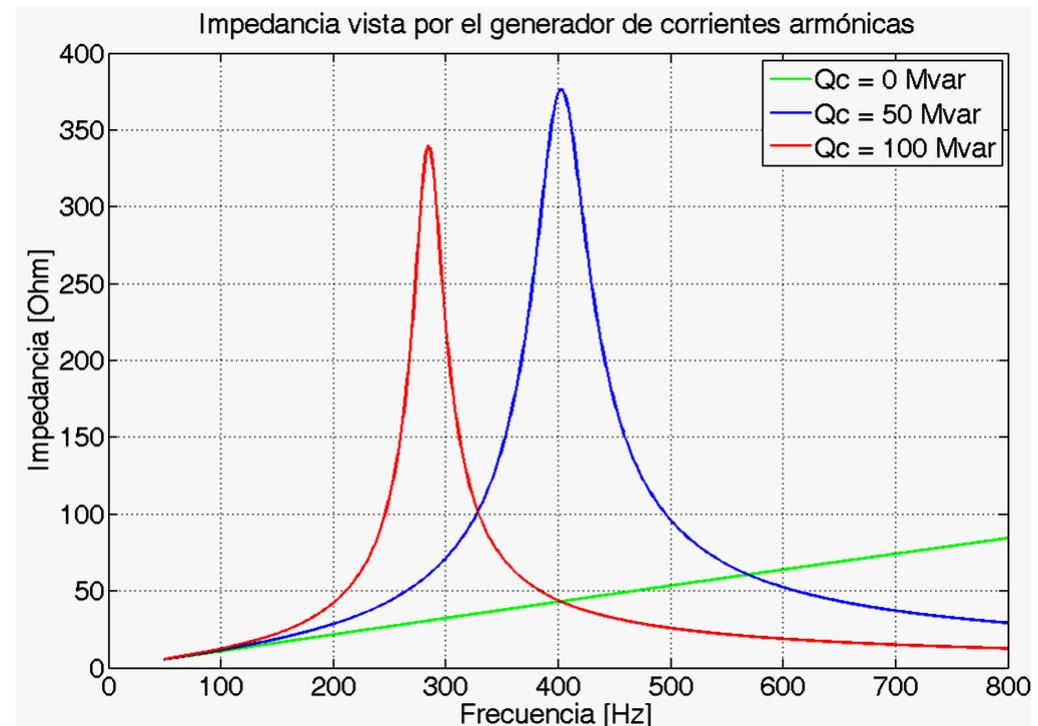
$$S_{cc} = 3250 \text{ MVA}$$

$$\text{Si } Q_c = 50 \text{ Mvar}$$

$$f_r = 50 \cdot \sqrt{\frac{3250}{50}} = 403.1 \text{ Hz}$$

$$\text{Si } Q_c = 100 \text{ Mvar}$$

$$f_r = 50 \cdot \sqrt{\frac{3250}{100}} = 285.1 \text{ Hz}$$



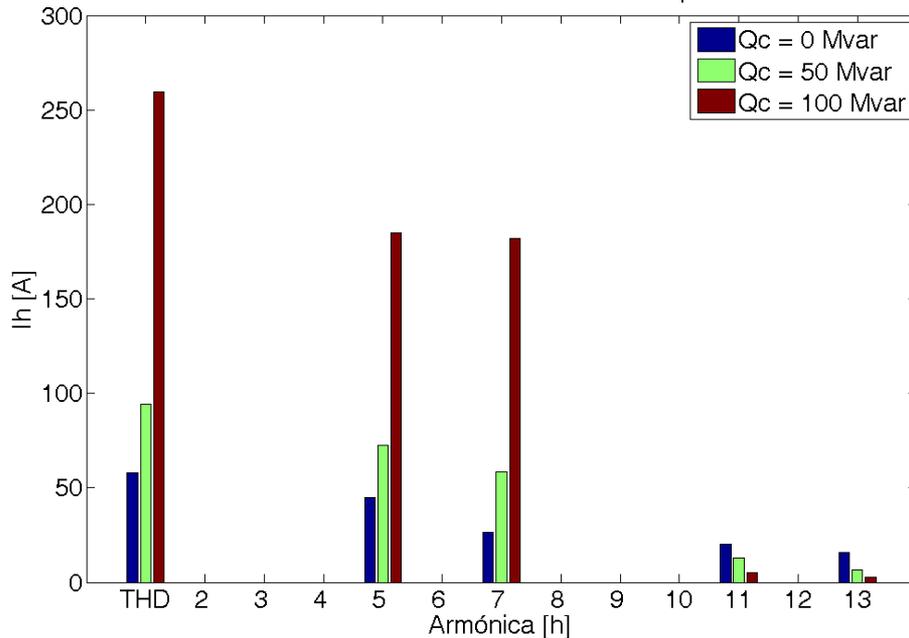
Efectos de las armónicas

La carga consiste en un rectificador trifásico de 6 pulsos, ángulo de disparo $\alpha = 30^\circ$, ángulo de conmutación $\gamma = 12^\circ$ y corriente continua $I_d = 300$ A

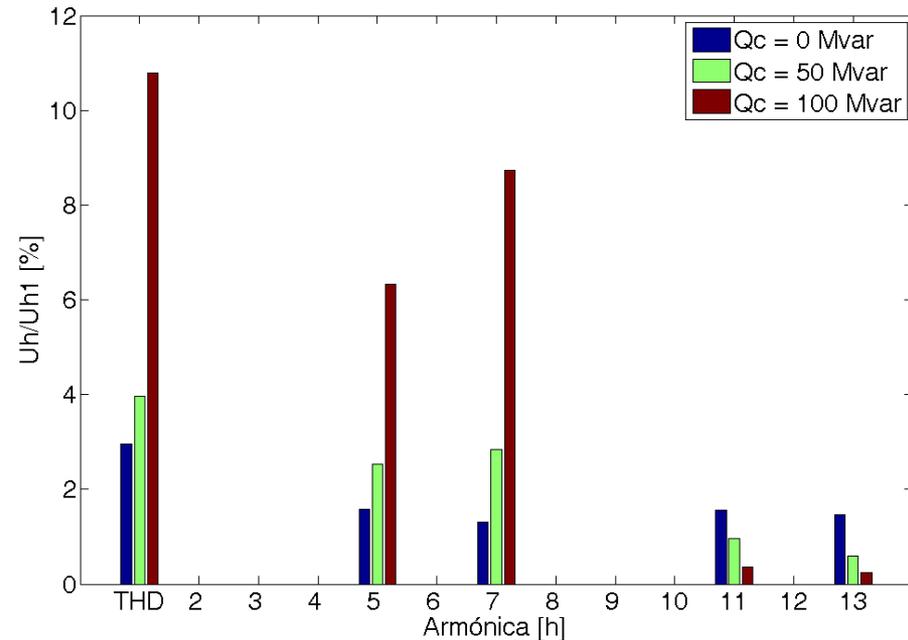
Las armónicas generadas son:

- $I_5 = 44.9$ A
- $I_7 = 30.88$ A
- $I_{11} = 17.31$ A
- $I_{13} = 14.03$ A

Distorsión de corriente en el sistema de potencia

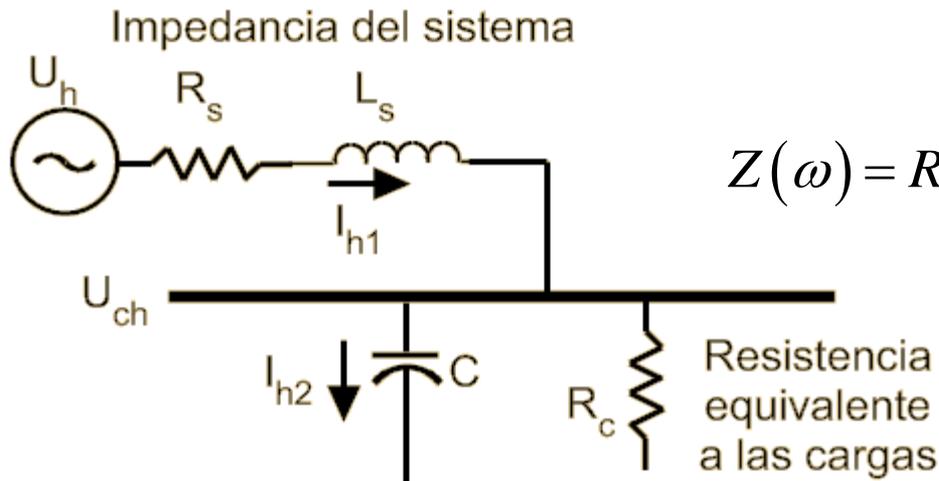


Distorsión de tensión en la barra de 132 kV



Efectos de las armónicas

➤ Resonancia serie



$$Z(\omega) = R_s + j\omega L_s + \frac{R_c / j\omega C}{R_c + 1/j\omega C}$$

$$Z(\omega) = R_s + \frac{R_c}{1 + (\omega C R_c)^2} + j \left[\omega L_s - \frac{\omega C R_c^2}{1 + (\omega C R_c)^2} \right]$$

En resonancia se anula la parte reactiva de la impedancia

$$\omega L_s - \frac{\omega C R_c^2}{1 + (\omega C R_c)^2} = 0$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_s C}} \sqrt{1 - \frac{L_s}{R_c^2 C}} \approx \frac{1}{\sqrt{L_s C}}$$

$$f = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C}}$$

Efectos de las armónicas

Durante la resonancia serie, las tensiones y corrientes armónicas en el capacitor se magnifican.

$$U_{ch} \approx U_h \cdot \frac{X_c}{X_{Ls} + X_c + R_s} = U_h \cdot \frac{X_c}{R_s}$$

$$I_{ch} = \frac{U_h}{R_s}$$

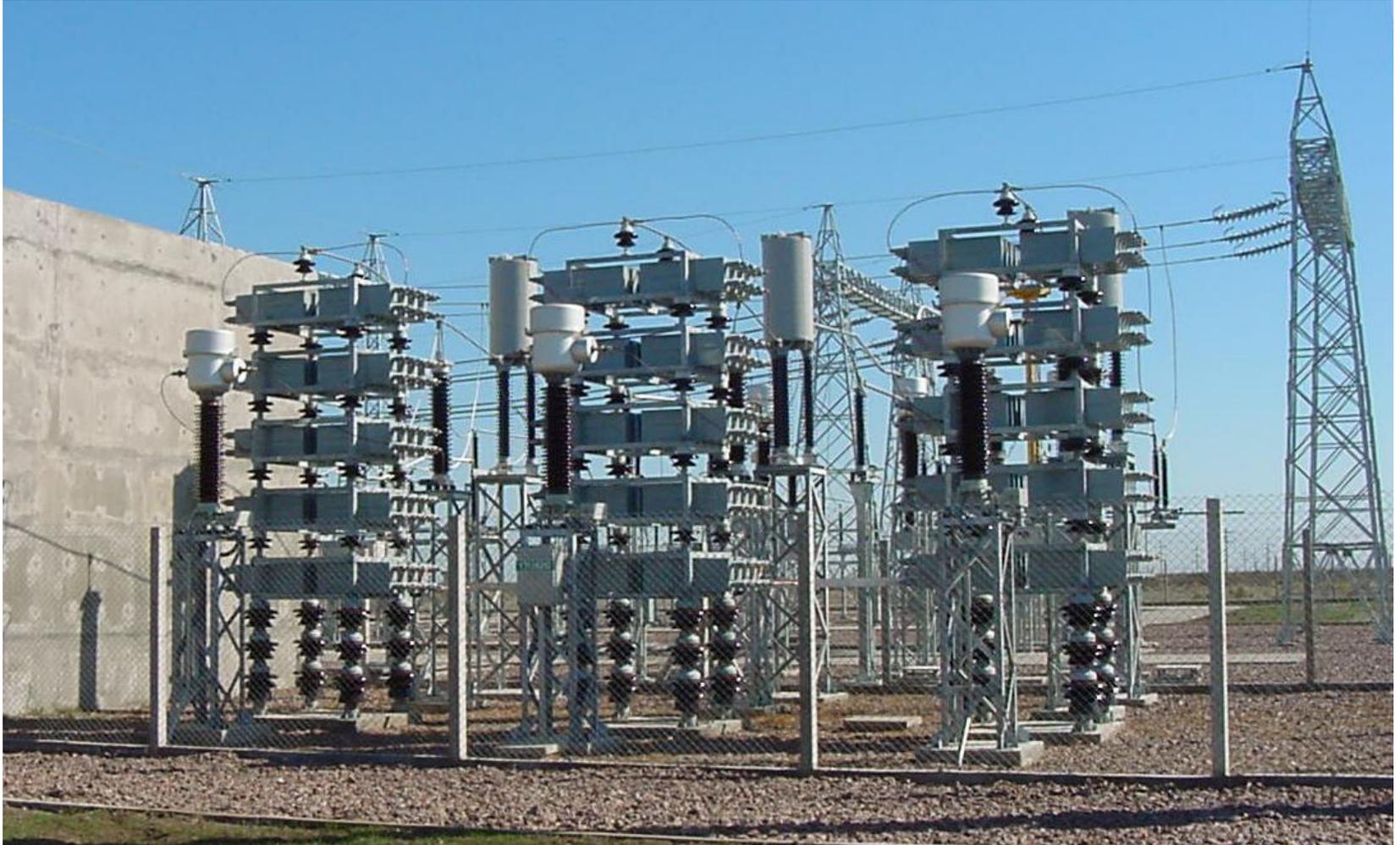
Alternativamente la frecuencia de resonancia puede calcularse como:

$$f = f_0 \sqrt{\left(\frac{S_t}{Q_c Z_t} - \frac{P_l^2}{Q_c^2} \right)}$$

- f_0 es la frecuencia fundamental del sistema
- S_t es la potencia aparente del transformador
- Q_c es la potencia reactiva del banco de compensación
- P_l es la potencia activa de la carga
- Z_t es la impedancia en por unidad del transformador

Efectos de las armónicas

➤ Bancos de capacitores



Efectos de las armónicas

➤ Bancos de capacitores

La distorsión de tensión aumenta las pérdidas dieléctricas en el capacitor, siendo la pérdida total expresada como:

$$P_h = \sum_{n=1}^N C \cdot (\tan \delta) \cdot \omega_n \cdot U_n^2$$

- $\tan \delta = 1/\omega RC$ es el factor de pérdidas
- $\omega_n = 2\pi f_n$
- U_n = es la tensión eficaz de la armónica n

La potencia reactiva total incluyendo la componente fundamental y los armónicos no debe exceder a la potencia reactiva nominal.

$$Q = \sum_{n=1}^N Q_n$$

Las resonancias serie y paralelo entre los bancos de capacitores y el resto del sistema eléctrico pueden causar sobretensiones y sobrecorrientes que pueden aumentar sustancialmente las pérdidas en los capacitores, y por lo tanto el calentamiento, lo que puede llevar a su destrucción.

Efectos de las armónicas

Sobrecarga por armónicas: Norma ANSI/IEEE 18-2012 y Norma IEC 60871-1

La Norma ANSI/IEEE 18-2012 establece los siguientes límites de sobrecarga:

- $U_{ef} = 1.1U_n$ (110%)
- $U_{cresta} = 1.2 U_{np}$ (120%) ➔ **Peak voltage (Including harmonics, but excluding transients)**
- $I_{ef} = 1.35 I_n$ (135%)
- $Q = 1.35 Q_n$ (135%)

La Norma IEC 60871-1 establece los siguientes límites de sobrecarga:

- $U_{ef} = 1.1U_n$ (110%) (12 horas cada 24 horas)
- $U_{cresta} = 1.2 U_{np}$ (120%)
- $I_{ef} = 1.3 I_n$ (130%)

La Norma IEC 60871-1 es más restrictiva respecto de los límites de sobrecarga

Efectos de las armónicas

El valor eficaz de la tensión en el banco de compensación es:

$$U_{ef} = \sqrt{U_1^2 + \sum_{n=2}^N U_h^2} < 1.1U_N$$

La conexión de un banco de compensación provoca una elevación de tensión en el nodo dada por:

$$\Delta u_c = \frac{Q_c}{S_{cc}} \cdot 100 \quad \text{Generalmente } 1\% \leq \Delta u_c \leq 5\%$$

Además, los límites de la tensión de operación de una red varían según el nivel de tensión, por ejemplo en 150 kV los límites de operación son de $\pm 5\%$

Esto indica que es importante tener en cuenta el incremento de tensión de frecuencia fundamental en el cálculo del valor eficaz de la tensión del banco.

$$U_1 = \Delta u \cdot U_{Nsistema}$$

$$U_{banco} = U_{Nsistema} \cdot K_c$$

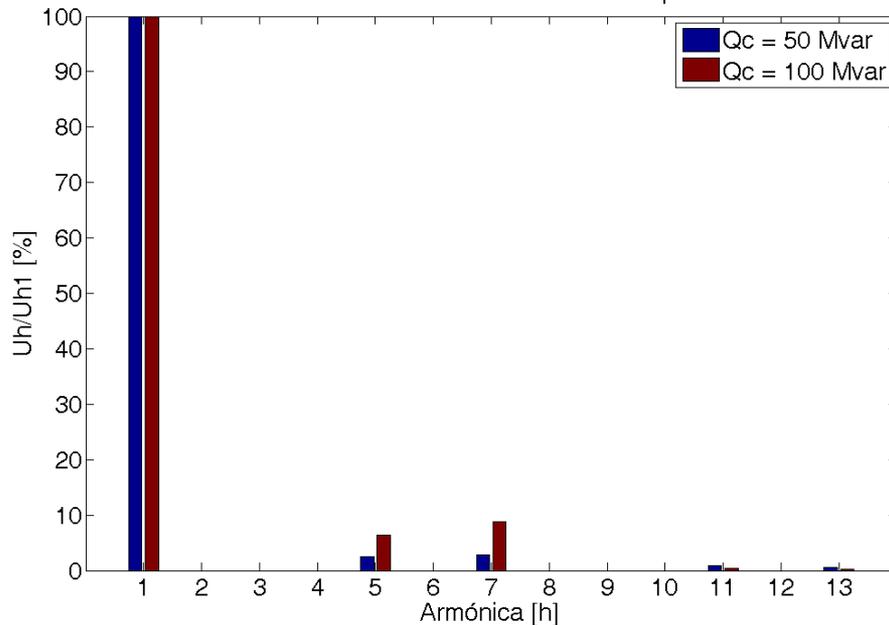
Efectos de las armónicas

Ejemplo 2: Instalación de bancos de capacitores en un sistema de transmisión.

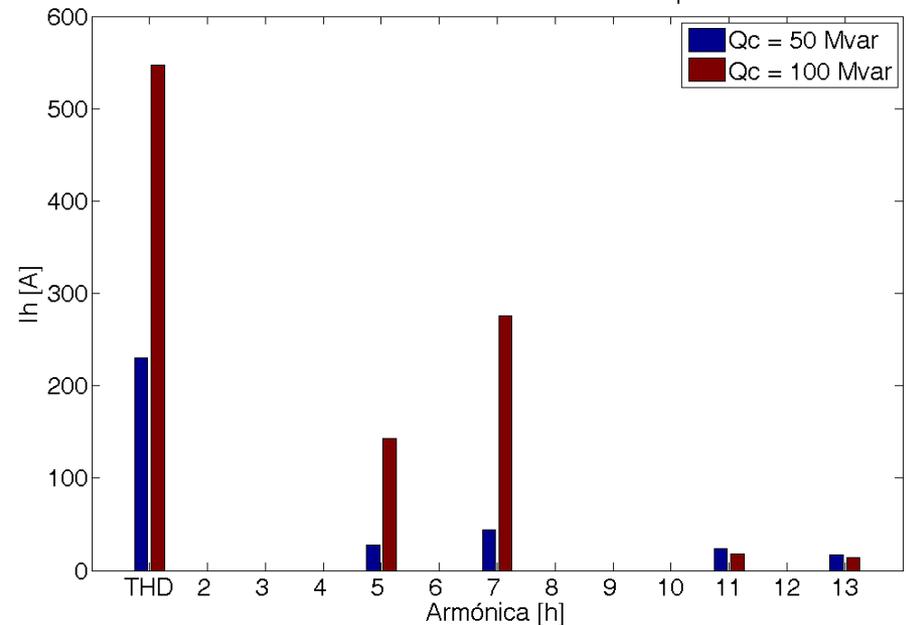
Transformadores: 2x300 MVA
500/132 kV
 $Z_{cc} = 18.5 \%$
 $X/R = 20$

Bancos de capacitores: 2x50 Mvar
 $U_n = 132 \text{ kV}$
 $I_n = 218.5 \text{ A}$

Distorsión de tensión en el banco de compensación



Distorsión de corriente en el banco de compensación



Efectos de las armónicas

Ejemplo 2: Instalación de bancos de capacitores en un sistema de transmisión
(132 kV)

	U_N [V]	H1 [V]	H5 [V]	H7 [V]	H11 [V]	H13 [V]	U_{rms}/U_N [%]	IEC [%]
50 MVar	76210	81050	1845	1978	880	524	106	110
100 MVar	76210	82213	3892	11092	324	213	109	110

	I_N [A]	H1 [A]	H5 [A]	H7 [A]	H11 [A]	H13 [A]	I_{rms}/I_N [%]	IEC [%]
50 MVar	218.7	232.5	24	36.1	25.2	17.8	109	130
100 MVar	437.4	471.9	101.3	404	18.6	44.5	144	130

La tensión nominal del banco de capacitores debe ser igual o mayor que la máxima tensión de operación del sistema en el punto de conexión del banco.

Técnicas de estudio de armónicas

Para la realización de estudios de armónicas en sistemas eléctricos se utilizan herramientas de simulación. Entre las más conocidas se destacan:

- ATP
- DIgSILENT
- MATLAB/Simulink

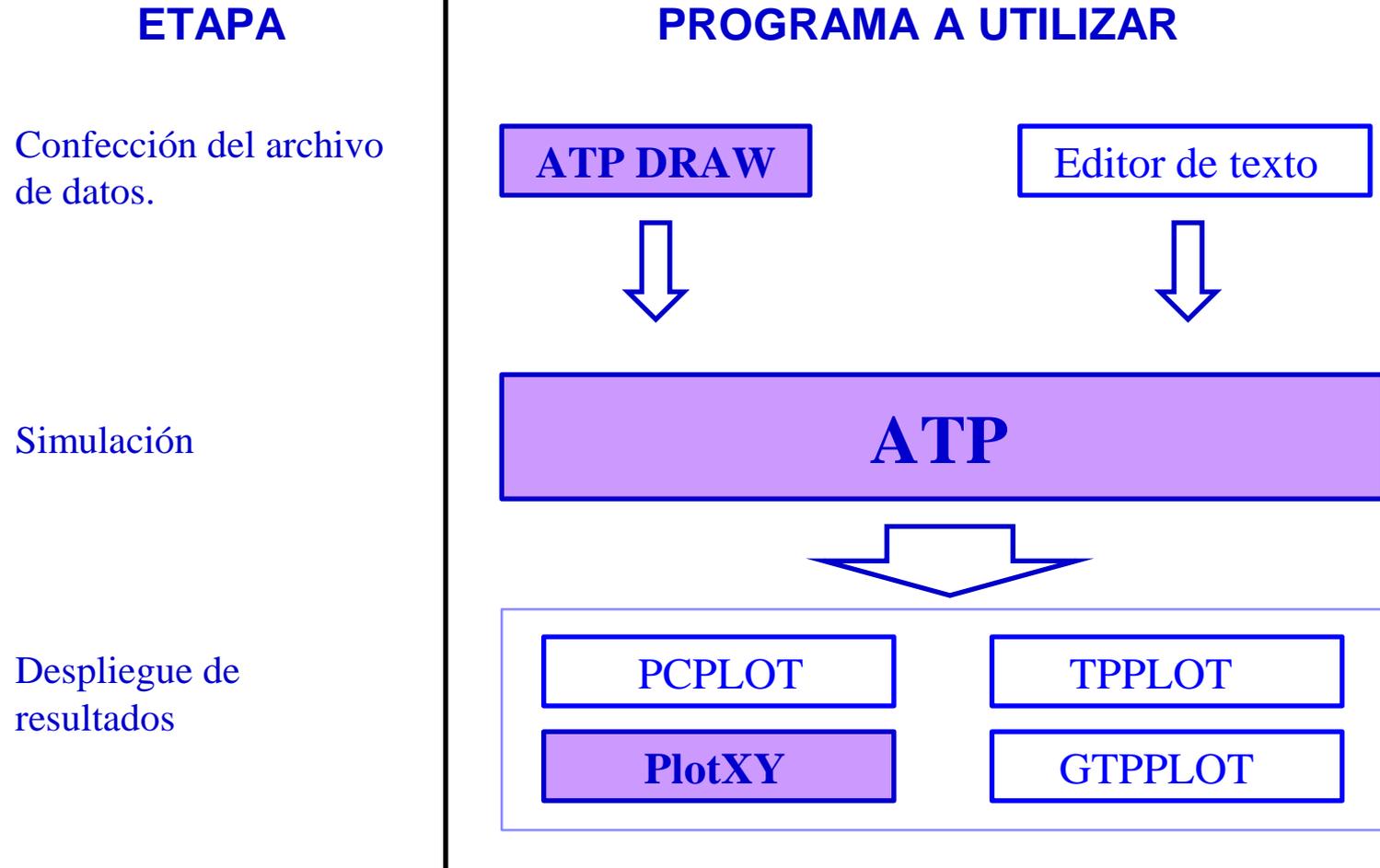
El ATP (EMTP) presenta algunas ventajas, previamente analizadas:

- Se distribuye bajo licencia gratuita otorgada por los comités de usuarios.
- Filosofía “Freeware” también para las herramientas utilizadas para su desarrollo y mantenimiento.
- Disponible para sistema operativo DOS, Linux y WINDOWS.
- Hay “Forums” de usuarios en Internet. CAUE: Comité Argentino de Usuarios del EMTP/ATP. <https://sites.google.com/site/atpcaue/claue>

Utilizando ATP

- Es posible calcular la respuesta en frecuencia de la red mediante el módulo FREQUENCY SCAN
- Es posible realizar análisis de flujos de armónicas con HARMONIC FREQUENCY SCAN

Utilizando ATP



Utilizando ATP

Programa	Función	Versión	Archivo de inicialización
AtpDraw	<ul style="list-style-type: none">• Creación y edición del diagrama del circuito y de los datos de los componentes.• Integrador del paquete de programas del ATP.	Windows	ATPDRAW.INI
TPBIG	Simulación digital de los procesos. El "EMTP".	DOS	<ul style="list-style-type: none">•STARTUP•LISTSIZE.DAT
PlotXY	Procesamiento gráfico de los resultados de la simulación.	Windows	Ninguno
GTPPLOT	Procesamiento gráfico de los resultados de la simulación	DOS	GTTPLOT.INI

Utilizando ATP

Recomendaciones generales para estudios de armónicas:

- La mejor forma de saber si un modelo es correcto, es contrastarlo con datos de la realidad.
- La lectura de buena bibliografía y el intercambio de experiencias entre usuarios son también importantes.
- En general y para evitar errores, en un archivo de datos del ATP deben utilizarse valores en dimensiones físicas reales y no por unidad.
- Como el ATP está ideado para trabajar con magnitudes instantáneas, en algunas versiones **las amplitudes de las fuentes de tensión y de corriente deben expresarse como valores de pico** y no como valores eficaces.

Utilizando ATP

Donde obtener más ayuda:

- Help del ATPDraw: contiene breves descripciones de los modelos de componentes disponibles en librería.
- ATP incluye una variedad de ejemplos que son de ayuda (“Data cases”).
- Otras publicaciones:
 - Can/Am EMTP News (descarga de archivos pdf).
 - Revista Iberoamericana de ATP (en internet, de libre acceso).
 - Revista del comité europeo (solo para miembros del EEUG).
- Home page oficial del ATP: <http://www.emtp.org>
- Web del CAUE: <https://sites.google.com/site/atpcaue/claue>

Utilizando ATP

Donde obtener más ayuda:

- “International Power System Transients Conference (IPTS)”. (Conferencia bienal de especialistas).
- Bibliografía:
 - [1] Canadian/American EMPT User Group. “ATP Rule Book”, 1987-1995.
 - [2] H.W. Dommel, “Techniques for Analyzing Electromagnetic Transients”. IEEE Computer Applications in Power, vol. 10, no3, July 1997, p.p. 18-23.
 - [3] A. Greenwood. “Electrical Transients in Power Sytems”, Second Edition, John Willwy&Soons Inc., 1991.
 - [4] H.W. Dommel. “EMTP Theory Book” 2nd Edition. Microtran Power System Analysis Corporation, Vancouver, British Columbia, 1992.

Estudios de armónicas

La secuencia básica de pasos a seguir para realizar un estudio de armónicas es la siguiente:

- Determinar mediante mediciones la situación armónica preexistente en el nodo en cuestión. Evaluar el cumplimiento de las regulaciones sobre contaminación armónica actual. Obtener datos para validar el modelo de cálculo a utilizar.
- Modelar la red pasiva en ATP, incluyendo el sistema hasta nodos lejanos.
- Excitar el modelo con los valores medidos en el nodo principal. Obtener los nuevos niveles de armónicas en ese nodo con la inclusión del nuevo elemento (por ejemplo un banco de capacitores). Verificar el nuevo grado de compatibilidad armónica del nodo y obtener los datos de sollicitación del elemento, necesarios para su dimensionamiento.

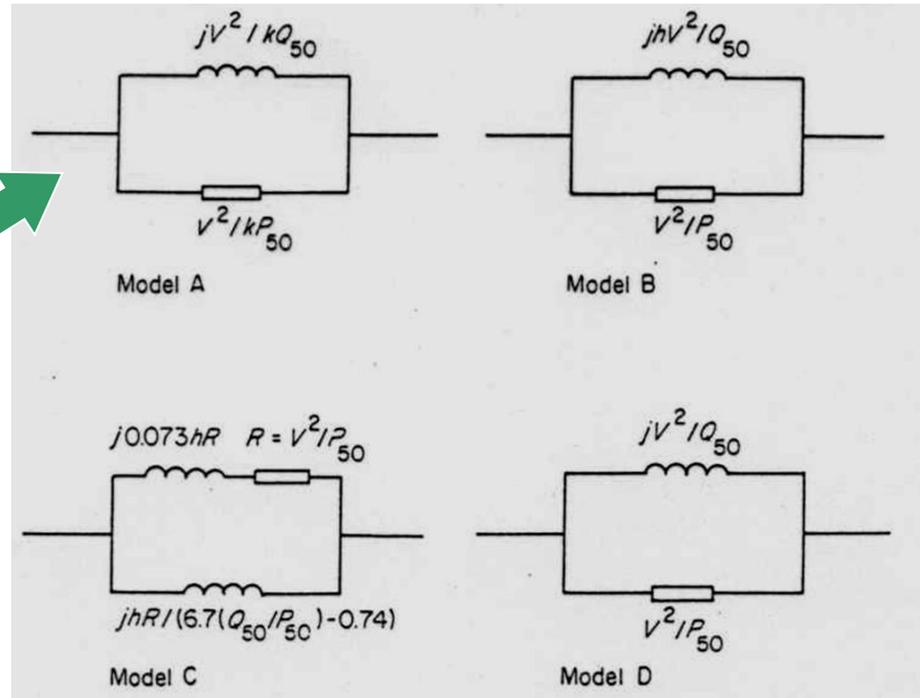
Estudios de armónicas

Modelos de Cargas:
Dependencia con la
frecuencia

$$Y_L(\omega) = \frac{1}{R} + j(h \cdot X)$$

$$R = \frac{V^2}{(0.1h + 0.9)P}$$

$$X = \frac{V^2}{(0.1h + 0.9)Q}$$



Modelo **A** - h: orden de la armónica, V tensión nominal, $k = 0.1h + 0.9$.

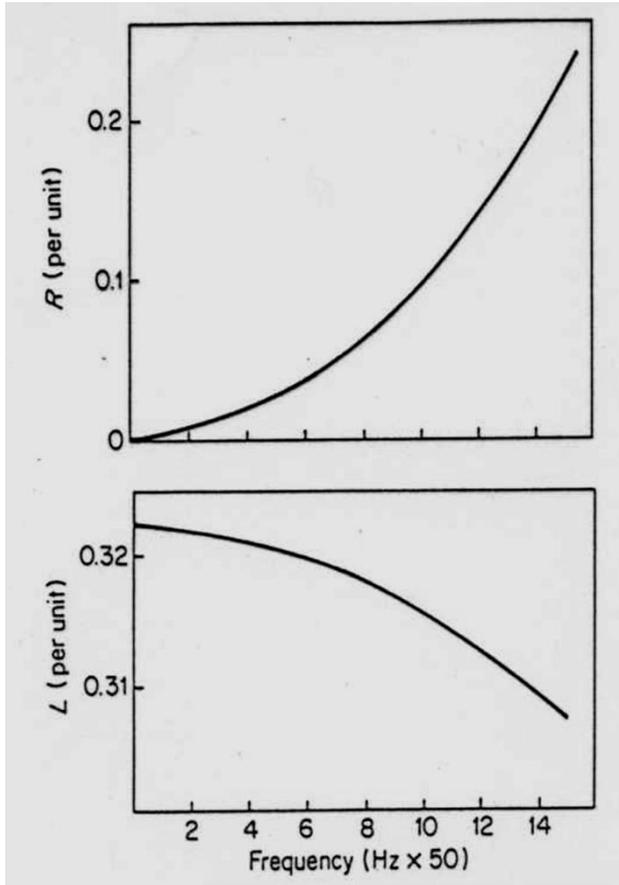
Modelo **B** - reactancia depende de f y la resistencia es constante.

Modelo **C** - derivado de mediciones de cargas en media tensión.

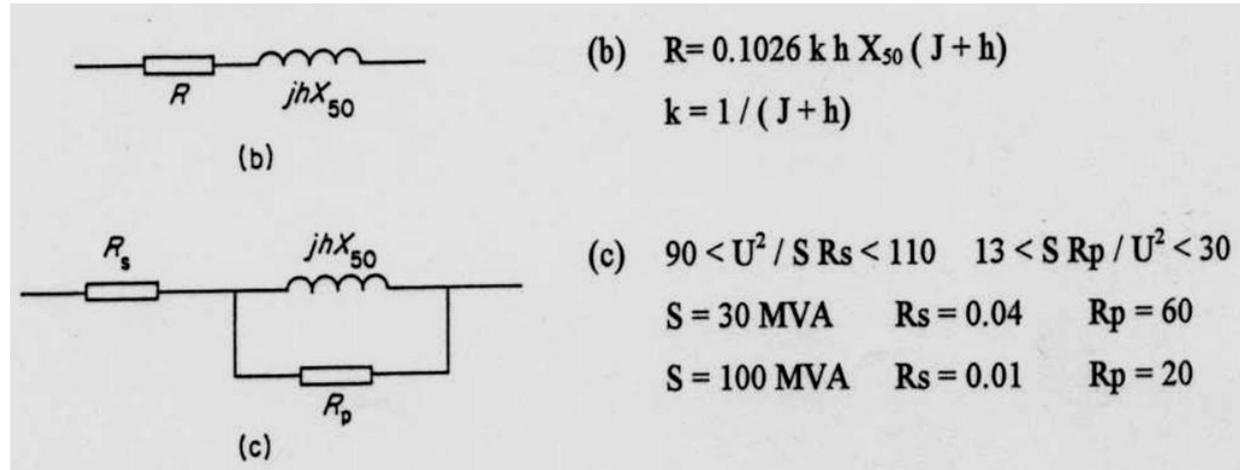
Modelo **D** - valores calculados a 50 Hz que se mantienen constantes.

Estudios de armónicas

Modelos de Transformadores: dependencia con la frecuencia



Modelos sugeridos por CIGRE



(b) $R = 0.1026 k h X_{50} (J + h)$
 $k = 1 / (J + h)$

(c) $90 < U^2 / S R_s < 110$ $13 < S R_p / U^2 < 30$
 $S = 30 \text{ MVA}$ $R_s = 0.04$ $R_p = 60$
 $S = 100 \text{ MVA}$ $R_s = 0.01$ $R_p = 20$

(b) J es la relación entre pérdidas por Histéresis y Eddy ≈ 3 (acero laminado)

(c) Los valores de R_s y R_p son constantes y dependen de la potencia del transformador

Estudios de armónicas

Modelos de Líneas de transmisión: dependencia con la frecuencia

Las líneas de transmisión se representan con un modelo de parámetros distribuidos. Pueden representarse por equivalentes π de parámetros concentrados, colocando tantos de ellos en cascada como la máxima frecuencia a la que se quiere representar.

$$f_{\max} = \frac{Nv}{8l}$$

N: número de secciones π **l:** longitud de la línea (km)
v: velocidad de propagación $\frac{1}{\sqrt{LC}}$ **L (H/km) y C (F/km)**

Ej: Línea aérea $l = 100$ km, $v = 3 \times 10^5$ km/s, 1 sección π  $f_{\max} = 375$ Hz

Se debe tener en cuenta el efecto pelicular. Los factores de corrección son:

$$R = R \left(1 + \frac{0.646 \cdot h^2}{192 + 0.518 \cdot h^2} \right) \quad \text{Líneas}$$

$$R = R \left(0.187 + 0.532 \cdot h^{1/2} \right) \quad \text{Cables}$$

Estudios de armónicas

Modelos de máquinas rotantes

Generadores sincrónicos: Pueden representarse como una combinación serie de resistencia e inductancia.

$$Y_g = \frac{1}{R\sqrt{h} + jX_d''h}$$

R se obtiene de las pérdidas de la máquina, y X_d'' es la reactancia subtransitoria

Motores de inducción: La impedancia del motor puede expresarse como:

$$Z_m(\omega) = R_{mh} + jX_{mh} \quad \longrightarrow \quad \begin{aligned} X_{mh} &= h \cdot X_B \\ R_{mh} &= R_B \left[a\sqrt{h} + \left(\pm h \cdot b\sqrt{\pm h - 1} \right) / (\pm h - 1) \right] \end{aligned}$$

R_B = Resistencia total del motor con rotor bloqueado

X_B = Reactancia total del motor con rotor bloqueado

$a = 0.45$ $b = 0.55$

Estudios de armónicas

Modelos de generadores de armónicas

Los generadores de armónicas se representan como fuentes de corriente.

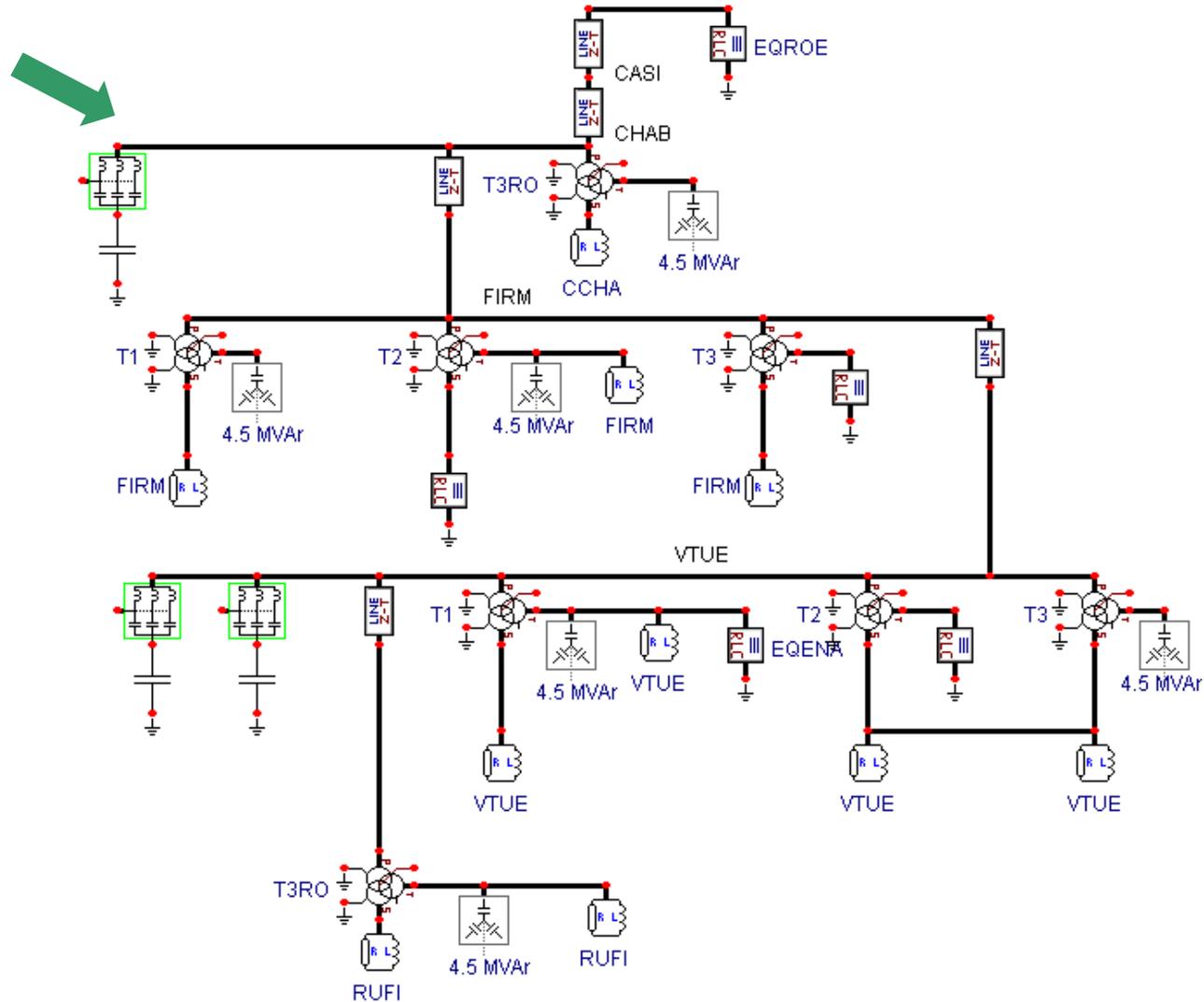


- Se coloca un generador de corriente por armónica que se desea presentar.
- Se ajusta la amplitud de dicho generador de acuerdo con el resultado de mediciones o con valores típicos extraídos de la bibliografía. Por lo general no se tiene en cuenta la fase.
- Tanto para uno como para múltiples generadores de armónicas se toma como referencia la distorsión de tensión en la barra a la cual se encuentran conectados (valores medidos) y de esta forma se ajustan las amplitudes y eventualmente las fases de los mismos.

Estudios de armónicas

Pasos del estudio

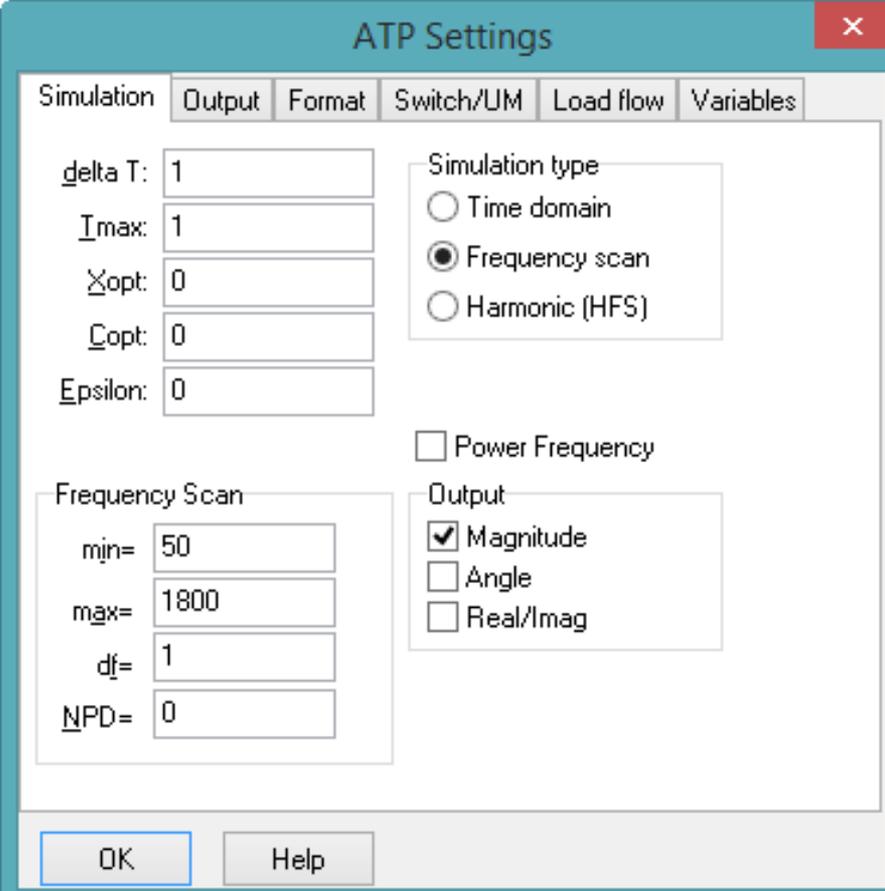
Realización del modelo de red en ATP para realizar barridos en frecuencia



Estudios de armónicas

Pasos del estudio

Configuración del programa ATP para realizar barridos en frecuencia:



ATP Settings

Simulation Output Format Switch/UM Load flow Variables

delta T: 1
I_{max}: 1
X_{opt}: 0
C_{opt}: 0
Epsilon: 0

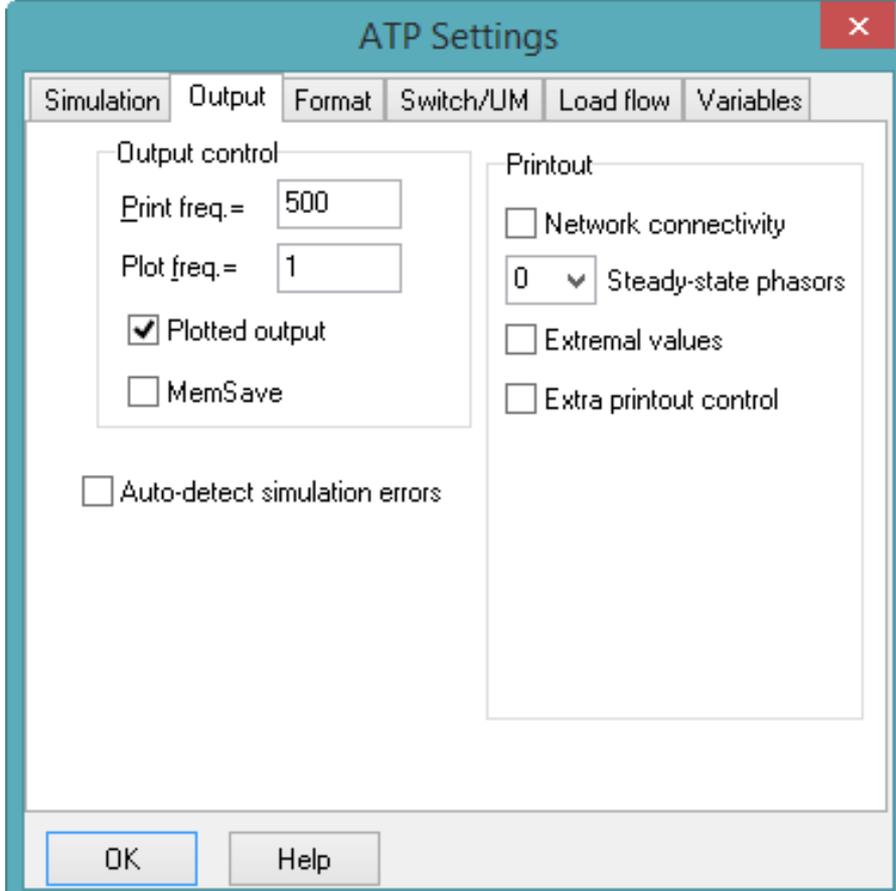
Simulation type
 Time domain
 Frequency scan
 Harmonic (HFS)

Power Frequency

Frequency Scan
min= 50
max= 1800
df= 1
NPD= 0

Output
 Magnitude
 Angle
 Real/Imag

OK Help



ATP Settings

Simulation Output Format Switch/UM Load flow Variables

Output control
Print freq.= 500
Plot freq.= 1
 Plotted output
 MemSave

Auto-detect simulation errors

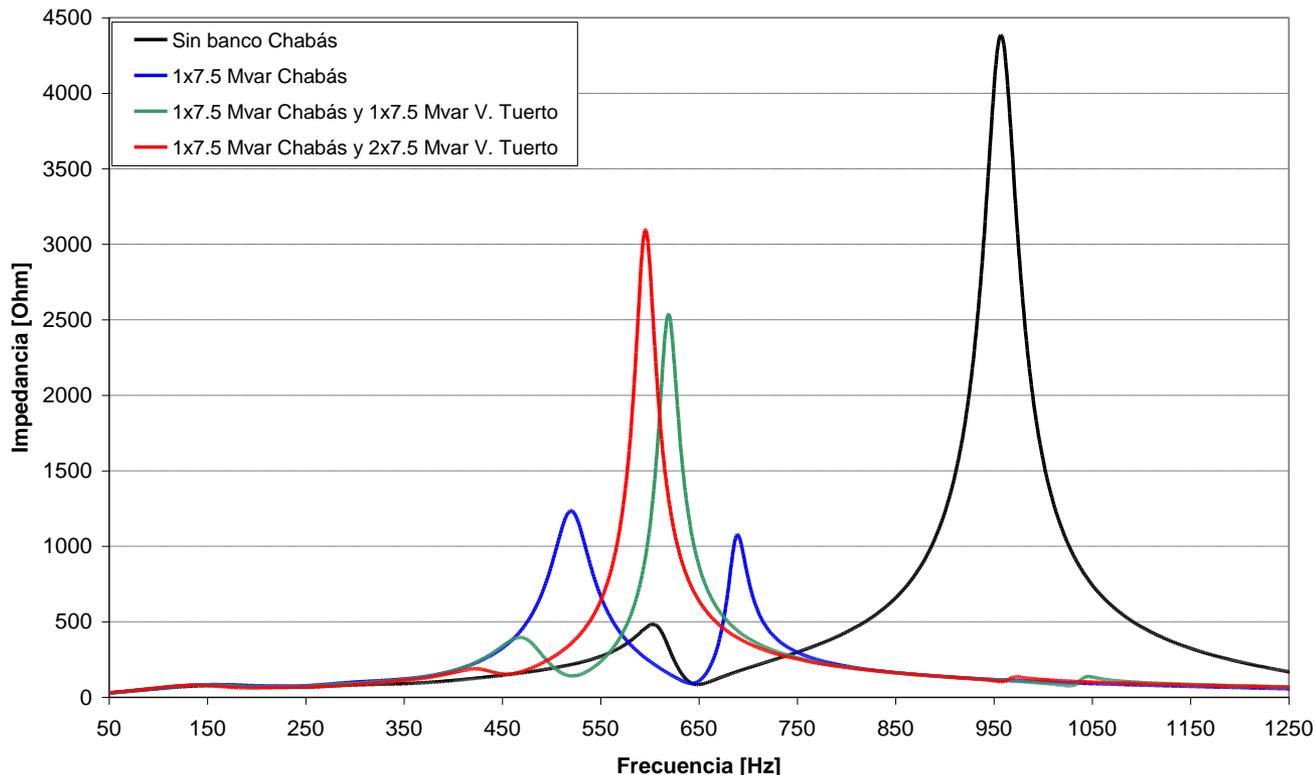
Printout
 Network connectivity
0 ▾ Steady-state phasors
 Extremal values
 Extra printout control

OK Help

Estudios de armónicas

Pasos del estudio

➤ Se realizan barridos en frecuencia para determinar la potencia de cortocircuito en la barra de interés y para caracterizar la impedancia de red. Se analiza la modificación de la impedancia para todas las diferentes posibilidades de conexión de los bancos. El conocimiento de la impedancia en función de la frecuencia permite determinar la presencia de resonancias y por la tanto la consecuente magnificación de la tensión en dicha barra.



Estudios de armónicas

Pasos del estudio

➤ La impedancia a 50 Hz vista desde la barra de 132 kV de la ET Chabás es de 28.67 Ω , por lo tanto la potencia de cortocircuito de la red se calcula como:

$$S_{cc} = (132 \cdot 10^3)^2 / 28.67 = 607 \text{ MVA}$$

➤ La modificación de la impedancia con la frecuencia es:

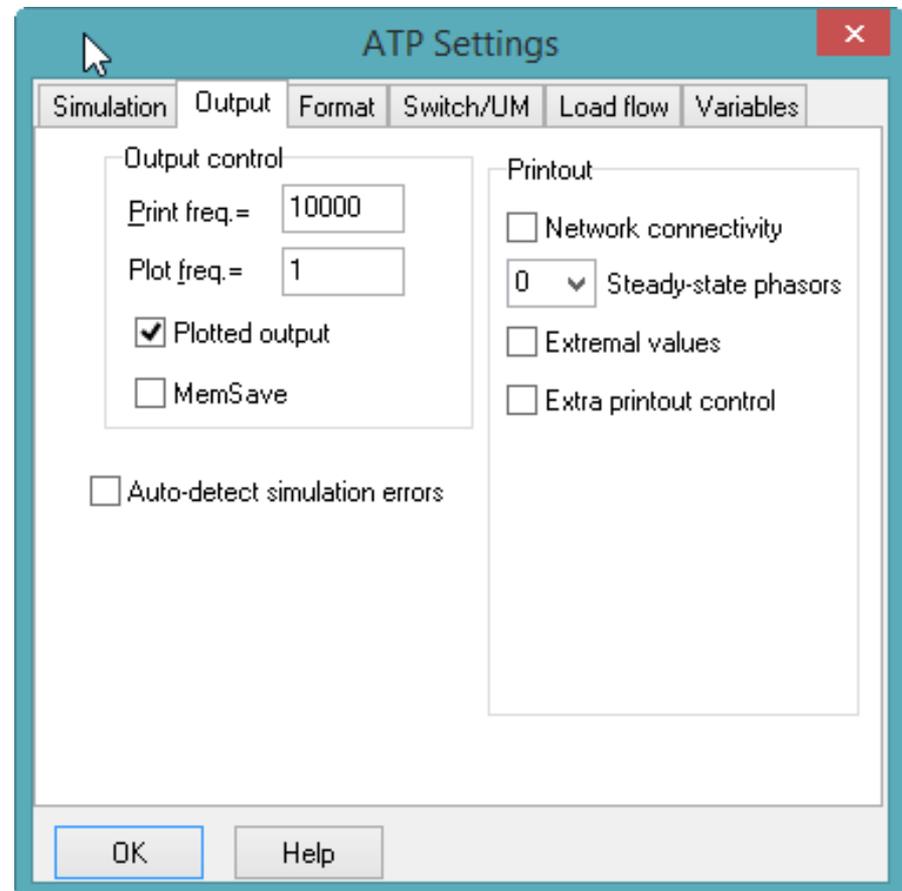
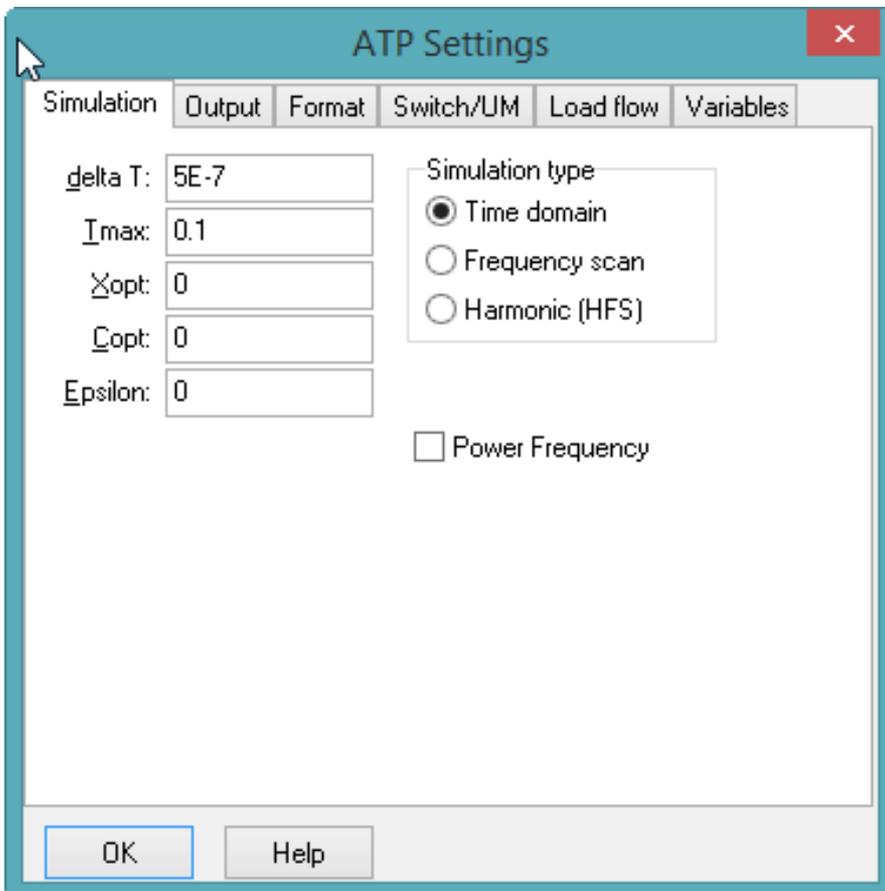
Impedancia	Sin banco de compensación	1x7.5 Mvar ET Chabás	1x7.5 Mvar ET Chabás 1x7.5 Mvar ET V. Tuerto	1x7.5 Mvar ET Chabás 2x7.5 Mvar ET V. Tuerto
Z_3 [Ω]	77.8	84.1	81.9	77.1
Z_5 [Ω]	68.1	76.7	72.6	67.6
Z_7 [Ω]	90.7	120.6	115.7	111.4
Z_{11} [Ω]	270.7	669.1	236.8	640

➤ Se observa que existe una magnificación de la armónica 11:

Estudios de armónicas

Pasos del estudio

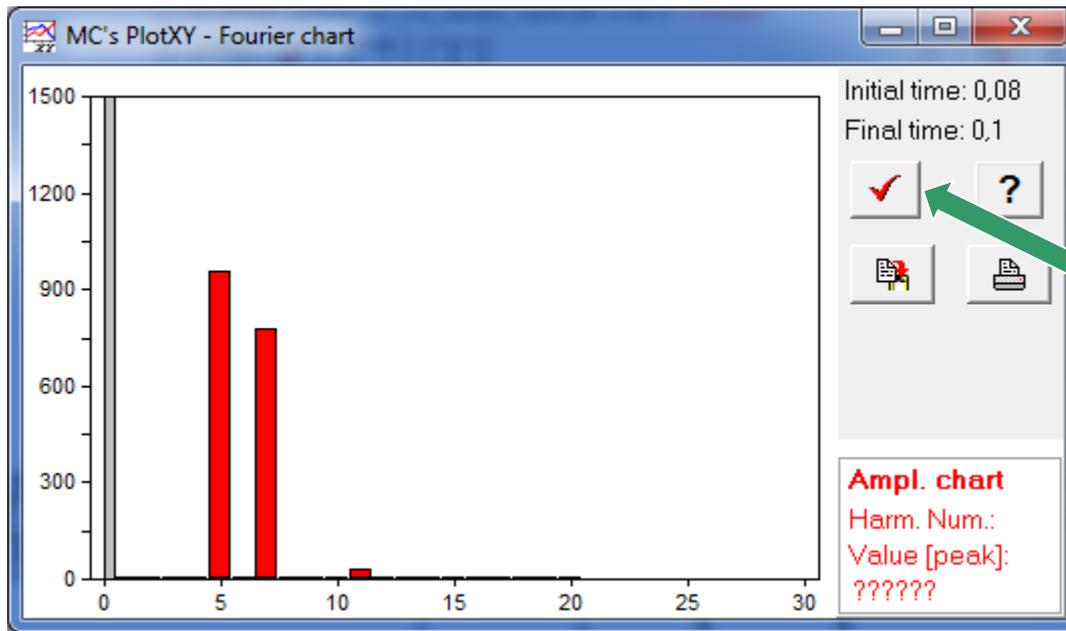
Configuración del programa ATP para realizar estudios de armónicas:



Estudios de armónicas

Pasos del estudio

Luego de correr el programa se obtiene la salida gráfica con el programa PlotXY:



The screenshot shows a dialog box titled "MC's PlotXY - Fourier Options". It has two main sections: "Base period for current file" and "Options valid for current session". In the first section, "Start time:" is set to "0,08" and "End time:" is set to "0,1". In the second section, under "Unit of amplitude chart", the "rms" option is selected with a radio button. To the right, "Harmonic orders to consider:" is set to "0 - 20". At the bottom, "Relative size of Amplitude chart" has the "100%" option selected. "Cancel" and "OK" buttons are at the bottom.

Se puede realizar el análisis de Fourier de la señal y obtener las componentes armónicas.

Estudios de armónicas

Pasos del estudio

Los resultados obtenidos para la distorsión armónica en la barra de 132 kV donde se conectan los bancos de capacitores:

Escenario 1	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 6	IEEE 519/2014
THD	0.68	0.91	0.93	0.92	0.88	0.86	2.5
5	0.57	0.64	0.68	0.65	0.65	0.65	1.5
7	0.28	0.37	0.36	0.38	0.38	0.38	1.5
11	0.20	0.50	0.50	0.50	0.44	0.39	1.5

Estudios de armónicas

Pasos del estudio

Distorsión de tensión y corriente en los bancos de capacitores:

Escenario 1	Variable	Valor Nominal [V]	1	5	7	11	Valor total referido a nominal [%]	Límites Norma IEC 60871 [%]
Caso 2	U_h [V]	83716	83716	491.0	283.7	385.6	100	110
	I_h [A]	36.1	36.1	1.1	0.9	1.8	100	130
Caso 3	U_h [V]	83716	83716	521.5	278.0	384.4	100	110
	I_h [A]	36.1	36.1	1.1	0.8	1.8	100	130
Caso 4	U_h [V]	83716	83716	500.7	288.1	386.8	100	110
	I_h [A]	36.1	36.1	1.1	0.9	1.8	100	130
Caso 5	U_h [V]	83716	83716	494.1	288.3	339.0	100	110
	I_h [A]	36.1	36.1	1.1	0.9	1.7	100	130
Caso 6	U_h [V]	83716	83716	497.3	293.1	300.7	100	110
	I_h [A]	36.1	36.1	1.2	1.0	1.6	100	130

Estudios de armónicas

Presentación de casos

Estudios de armónicas

**Mediciones previas
a la instalación del banco**

**Mediciones
posteriores**

**Se instalan los bancos
de 2x50 Mvar**

**Confección del modelo de la red
(validado con mediciones)
Se estudia la distorsión armónica con bancos**

Estudios de armónicas

Presentación de casos

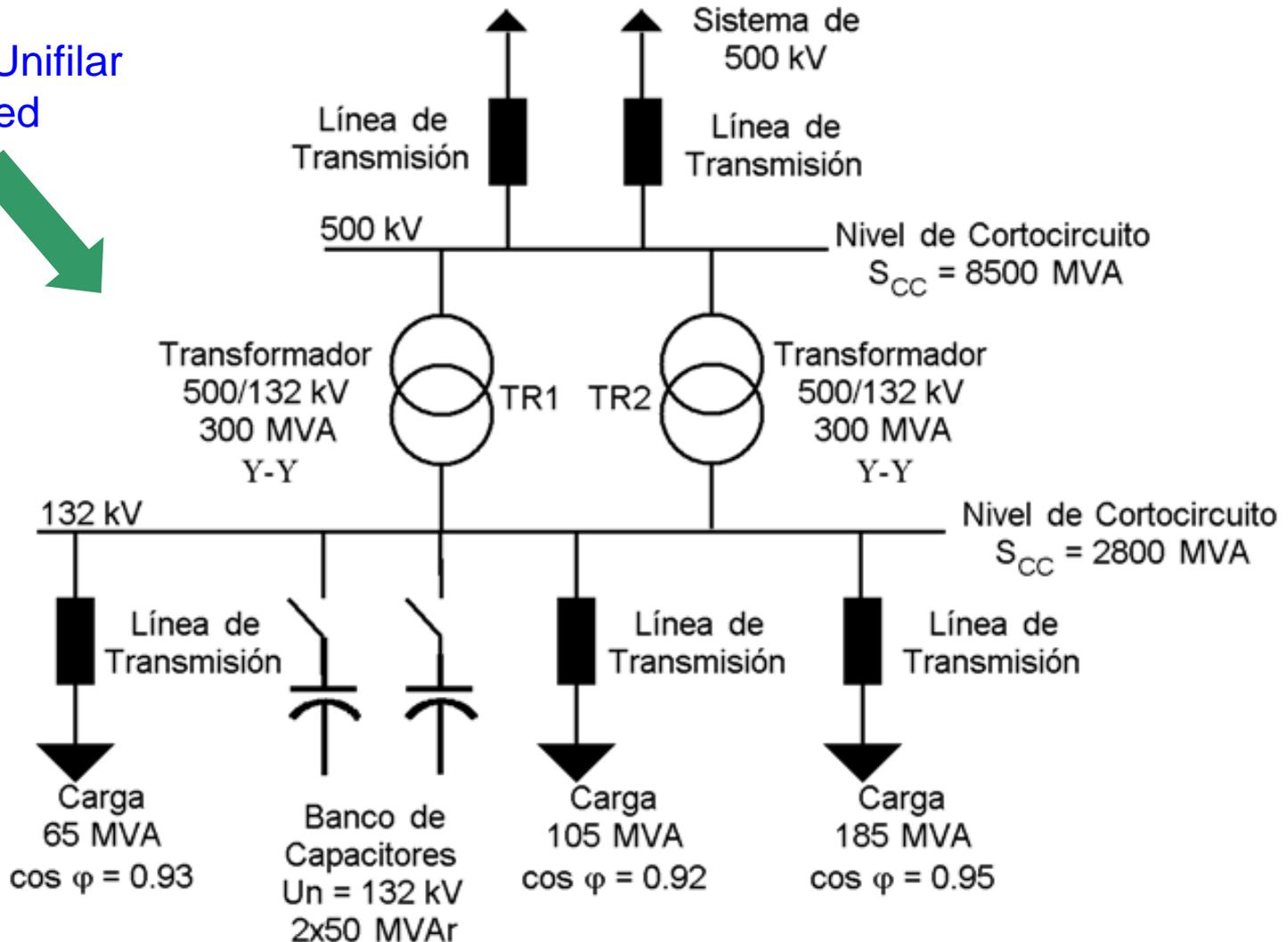
Primera parte

**Mediciones y estudios realizados
previamente a la instalación de los
bancos de capacitores**

Estudios de armónicas

Presentación de casos

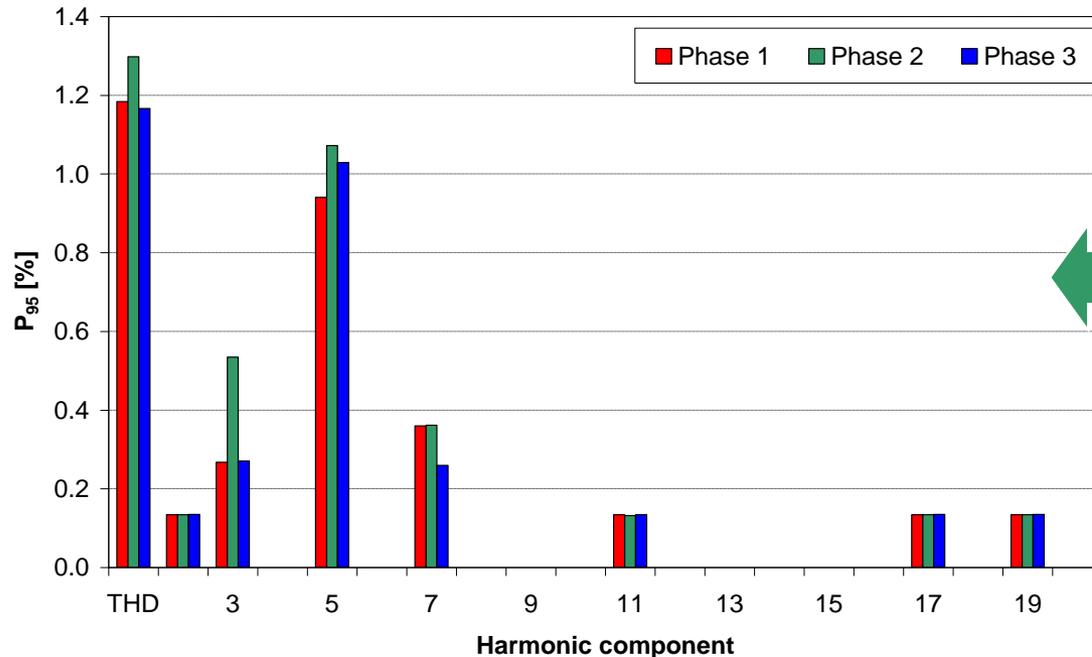
Diagrama Unifilar
de la red



Estudios de armónicas

Presentación de casos

Mediciones de tensiones armónicas



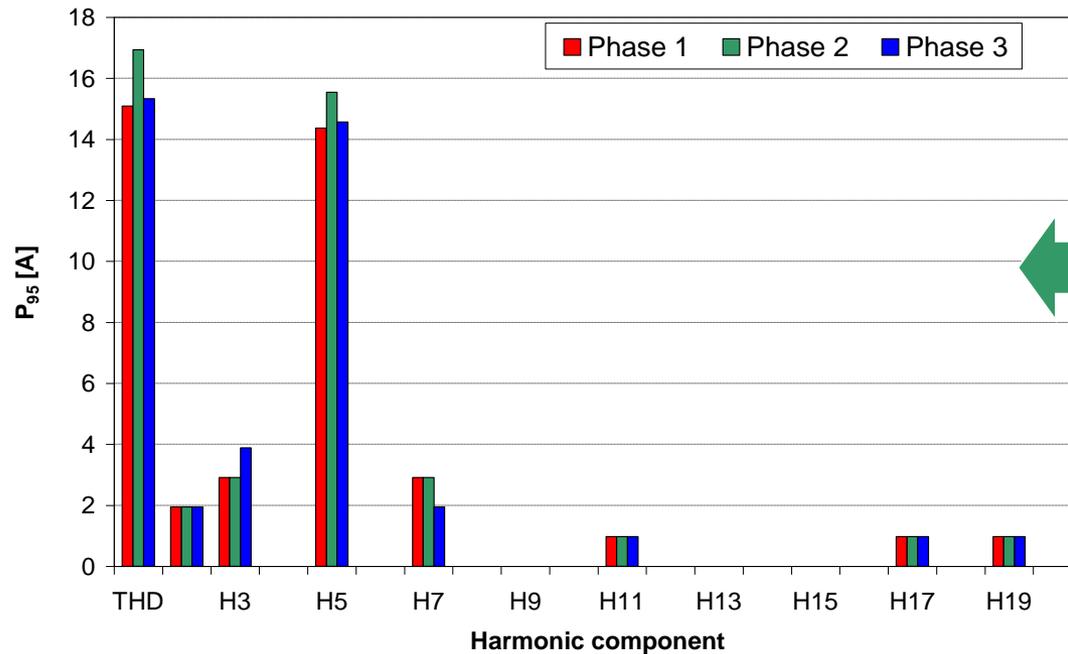
Distorsión Armónica en barra de 132kV

	THD	H3	H5	H7	H11	H17	H19
IEEE	2.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
ENRE	3	1.5	2	1.5	1.5	1	1
P ₉₅ [%]	1.2	0.4	1	0.3	0.13	0.13	0.13

Estudios de armónicas

Presentación de casos

Mediciones de corrientes armónicas



Corrientes Armónicas en TR1

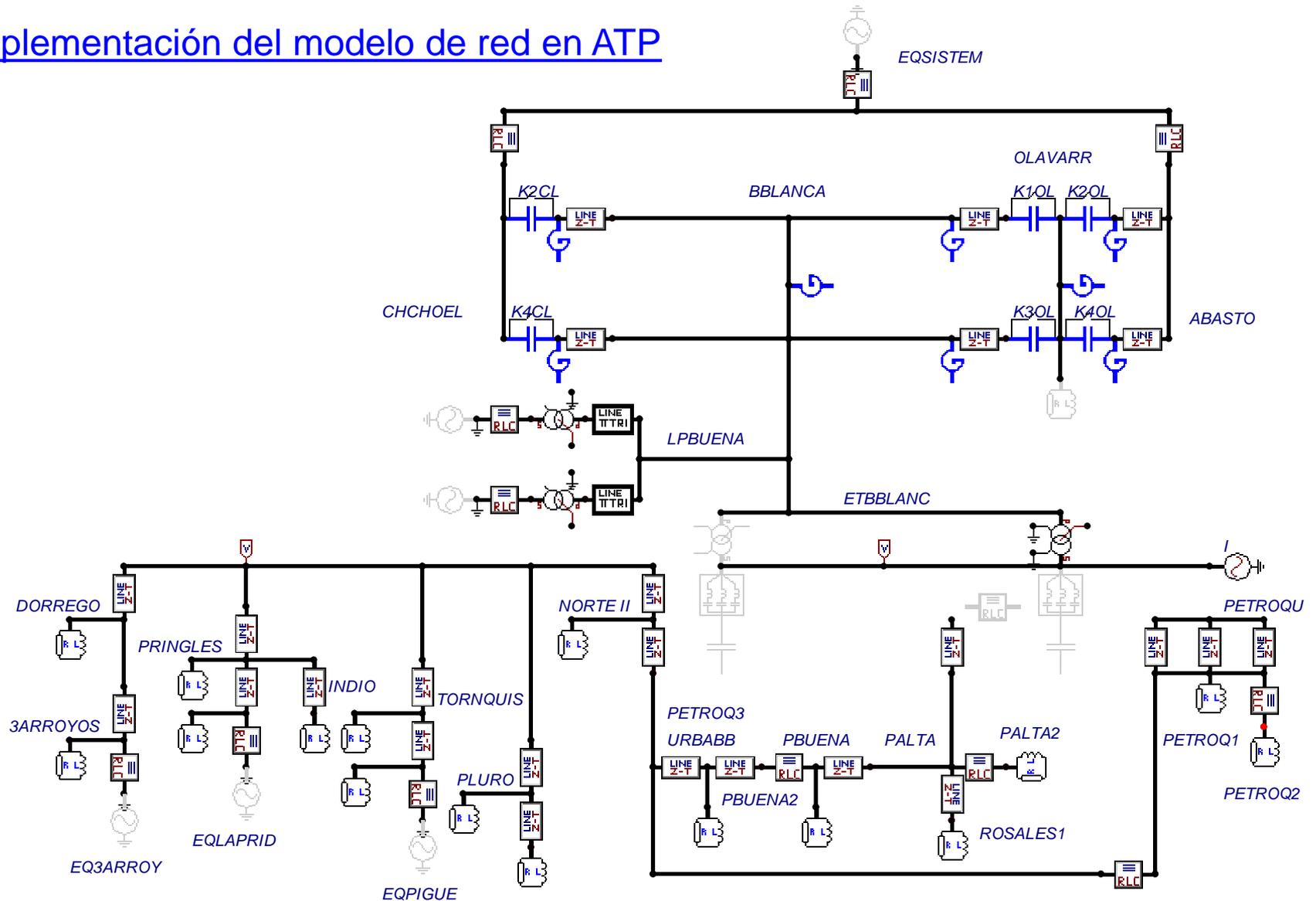
	THD	H3	H5	H7	H11	H17	H19
P_{95} [A]	15.8	3.2	14.8	2.6	0.8	0.8	0.9

➤ Las corrientes armónicas medidas en el TR2 son similares.

Estudios de armónicas

Presentación de casos

Implementación del modelo de red en ATP



Estudios de armónicas

Presentación de casos

Estudio de armónicas

➤ Cálculo de la frecuencia de resonancia:

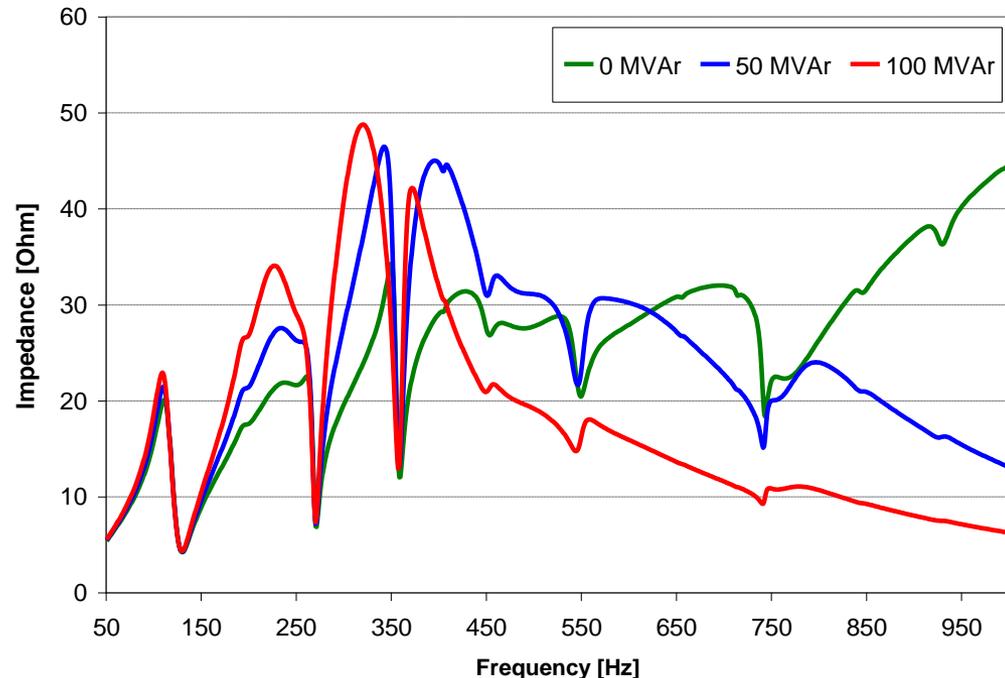
$$h = \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}}$$


Q [Mvar]	S _{sc} [MVA]	h	f [Hz]
50	2800	7.5	375
100	2800	5.3	265

➤ Resultados de las simulaciones en ATP:



Diferencias:
Líneas de transmisión
de 500 kV

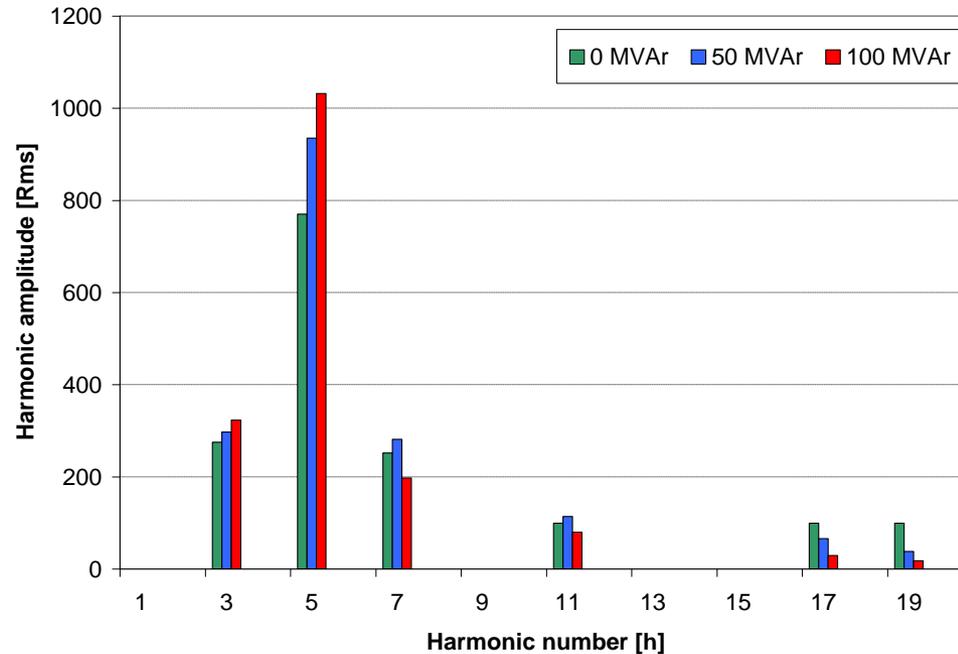


Estudios de armónicas

Presentación de casos

Estudio de armónicas

Distorsión de la barra de 132 kV



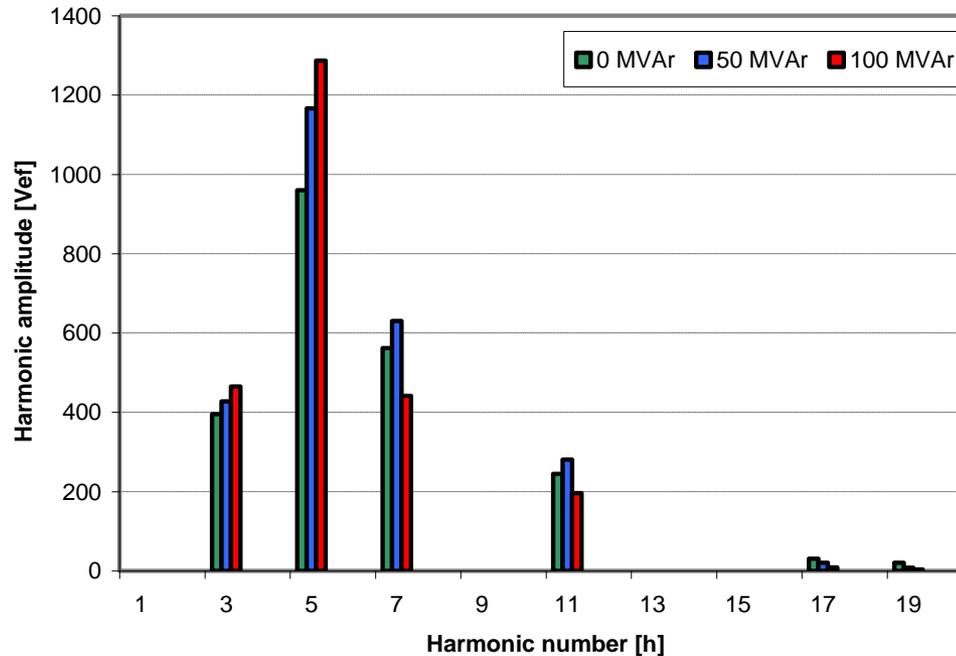
	THD	H3	H5	H7	H11	H17	H19
IEEE	2.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
0 MVAR	1.20	0.36	1.01	0.33	0.13	0.13	0.13
50 MVAR	1.41	0.39	1.23	0.37	0.15	0.09	0.05
100 MVAR	1.91	0.61	1.69	0.58	0.26	0.01	0.01

Estudios de armónicas

Presentación de casos

Estudio de armónicas

Distorsión de
tensión en la barra
de 500 kV.



	THD	H3	H5	H7	H11	H17	H19
IEEE	1.5	1	1	1	1	1	1
0 MVar	0.42	0.14	0.33	0.19	0.08	0.01	0.01
50 MVar	0.49	0.15	0.40	0.22	0.10	0.01	0.01
100 MVar	0.42	0.16	0.45	0.15	0.07	0.01	0.01

Estudios de armónicas

Presentación de casos

Estudio de sobrecarga de los bancos de capacitores

Sobrecarga de los capacitores por tensiones y corrientes armónicas:

Norma IEEE 18-2012:

- 110% por encima del valor eficaz de la tensión nominal.
- 120% por encima del valor pico de la tensión nominal.
- 180% por encima del valor eficaz de la corriente nominal.

Norma IEC 60871-1:

- 110% por encima del valor eficaz de la tensión nominal.
- 130% por encima del valor eficaz de la corriente nominal.

Los límites de sobrecarga por corrientes armónicas son menores en la Norma IEC 60871-1 respecto de la Norma IEEE 18-2012.

Estudios de armónicas

Presentación de casos

Estudio de sobrecarga de los bancos de capacitores

- Tensión máxima de operación de la barra de 132 kV (1.05xUn).
- Incremento de la tensión de la barra por el banco (1.036xUn).

$$\frac{\Delta U}{U} \approx \frac{Q}{S_{CC}} \cdot 100 = \frac{100 \times 10^6}{2800 \times 10^6} \cdot 100 = 3.6\%$$

	H1 [V]	H3 [V]	H5 [V]	H7 [V]	H11 [V]	U_{rms}/U_n [%]	IEC [%]
50 Mvar	82307	299	955	293	126	108	110
100 Mvar	82307	326	1053	205	88	108	110

	H1 [A]	H3 [A]	H5 [A]	H7 [A]	H11 [A]	U_{rms}/U_n [%]	IEC [%]
50 Mvar	236.1	2.6	13.7	5.9	4.0	108	130
100 Mvar	236.1	2.8	15.1	4.1	2.8	108	130

Estudios de armónicas

Presentación de casos

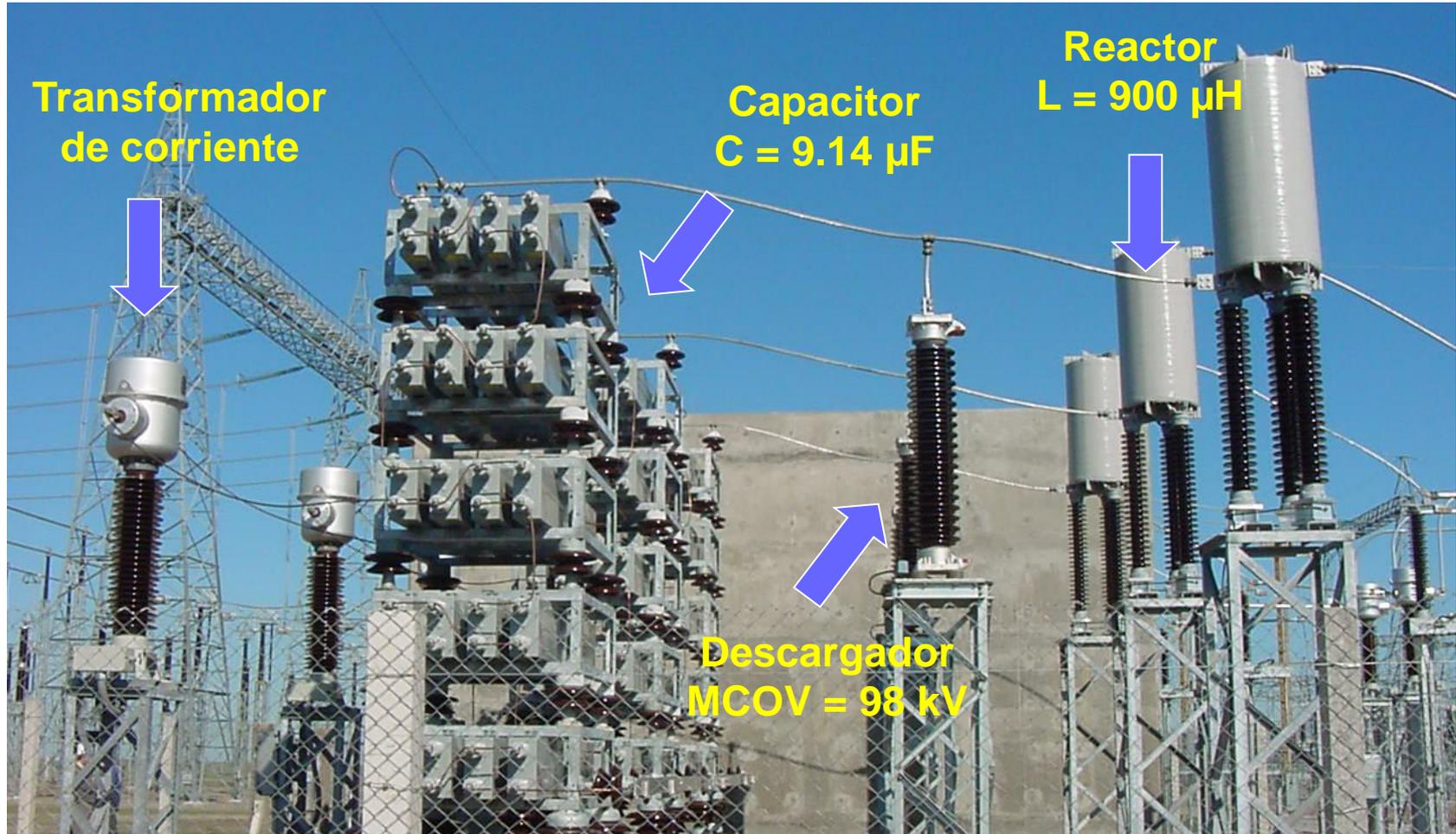
Segunda parte

**Mediciones realizadas posteriormente a
la instalación de los bancos**

Estudios de armónicas

Presentación de casos

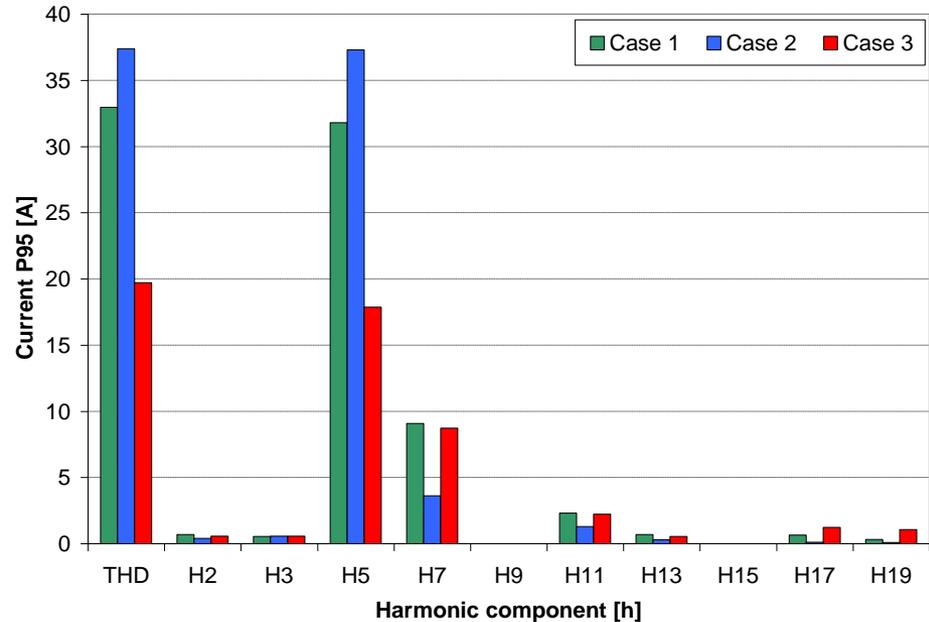
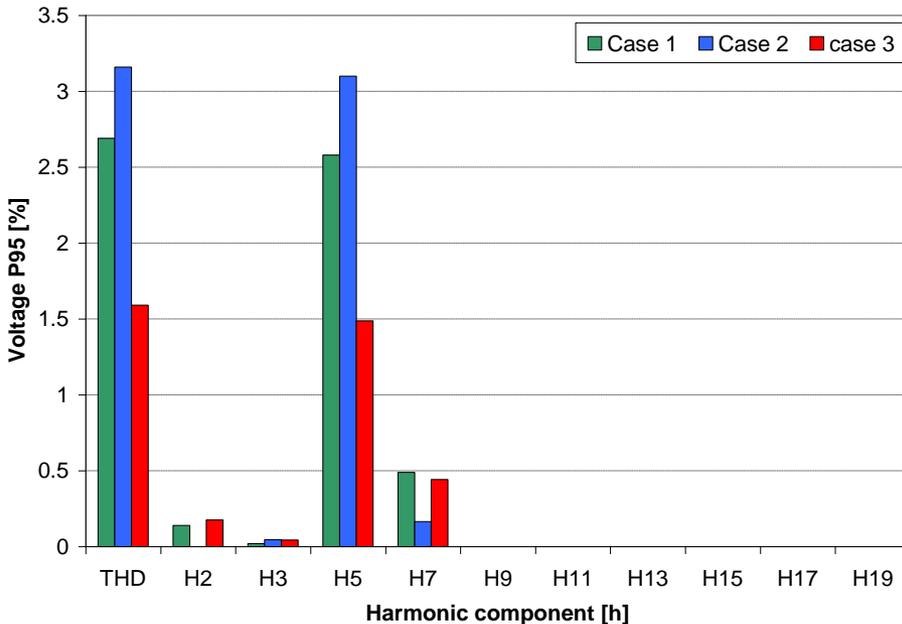
Fotografía de los bancos de capacitores.



Estudios de armónicas

Presentación de casos

Distorsión de tensión y corriente en el banco de capacitores



- Caso 1: Un capacitor conectado a cada barra de 132 kV.
- Caso 2: Dos capacitores conectados en la misma barra de 132 kV y parte de la carga alimentada desde la otra barra de 132 kV.
- Caso 3: Dos capacitores en la misma barra de 132 kV y con toda la carga de la estación en esa barra.

Estudios de armónicas

Presentación de casos

Distorsión de tensión en la barra de 132 kV

	THD	H3	H5	H7	H11	H17	H19
IEEE	2.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
Caso 1	2.53	0.06	2.43	0.27	0.01	0.01	0.01
Caso 2	3.13	0.13	3.05	0.13	0.01	0.01	0.01
Caso 3	1.71	0.13	1.58	0.53	0.01	0.01	0.01
Simulación	1.91	0.61	1.69	0.58	0.26	0.01	0.01

Distorsión de corriente en los bancos de capacitores

	H1 [A]	H3 [A]	H5 [A]	H7 [A]	H11 [A]	I_{rms}/I_n [%]	IEC [%]
Caso 1	236	0.3	30.4	6.4	1.7	109	130
Caso 2	232	0.3	37.1	3.3	1	108	130
Caso 3	240	0.5	18.9	8	1.7	110	130
Simulación	236	2.8	15.1	4.1	2.8	108	130

Estudios de armónicas

Conclusiones:

- Se realiza un modelo detallado de la red y los bancos en el programa ATP. Dicho modelo permite predecir la situación armónica futura sobre la red y la sollicitación por armónicas de los bancos.
- La distorsión armónica en los bancos obtenida por simulación concuerda con los valores medidos sobre los bancos.
- La tensión nominal de los bancos de capacitores debe ser de un 10% más alta que la tensión de operación de la barra de conexión.

Muchas gracias por su atención

¿Preguntas?