

Aparatos con $I_n \leq 16$ A: IEC 61000-3-2

- Límites para lámparas con $P \leq 25$ W.
- Deben cumplir con **una** de las siguientes condiciones:
 - Las corrientes armónicas no deben sobrepasar los límites proporcionales a la potencia de la tabla 3, columna 2:

Harmonic Order n	$I_{\text{máx}}$ per Watt [mA/W]
3	3.4
5	1.9
7	1.0
9	0.5
11	0.35
$13 \leq n \leq 39$ (odd harmonics)	$3.85/n$

- La amplitud de la corriente armónica de orden 3, expresada en porcentaje de la corriente fundamental, no debe sobrepasar el 86% y la amplitud de la corriente armónica de orden 5 no debe sobrepasar el 61%.



Aparatos con $I_n > 16$ A: IEC 61000-3-4

- Los niveles de emisión son referidos a la corriente nominal del equipo bajo prueba.
- Los niveles son brindados para un valor de la relación existente entre la potencia de cortocircuito del punto donde el equipo será instalado (S_{sc}) y la potencia nominal del mismo (S_{equ}) de al menos 33. A esta relación de potencias se la llama R_{sce} .
- Si estos niveles de emisión no son cumplidos por el aparato, la Norma brinda una serie de valores más permisivos. Pero para que éstos sean aplicables, es necesario que se cumpla con un mayor valor del cociente R_{sce} .



Aparatos con $I_n > 16$ A: IEC 61000-3-4

Niveles de emisión para $R_{sce} = S_{sc}/S_{equ} \geq 33$

Harmonic number n	I_n/I_1 [%]
3	21.6
5	10.7
7	7.2
9	3.8
11	3.1
13	3
15	0.7
17	1.2
19	1.1

Harmonic number n	I_n/I_1 [%]
21	0.6
23	0.9
25	0.8
27	0.6
29	0.7
31	0.7
≥ 33	0.6
Even	$\leq 8/n$ or ≤ 0.6



Aparatos con $I_n > 16$ A: **IEC 61000-3-4**

En caso de no cumplir con los niveles anteriores

Minimal R_{sce}	THD	I3	I5	I7	I9	I11	I13
66	25	23	11	8	6	5	4
120	29	25	12	10	7	6	5
175	33	29	14	11	8	7	6
250	39	34	18	12	10	8	7
350	46	40	24	15	12	9	8
450	51	40	30	20	14	12	10
600	57	40	30	20	14	12	10

Las armónicas pares deben estar por debajo de $16/n$ [%].

Es posible interpolar entre dos valores sucesivos de R_{sce} .



Normativa en Uruguay

Reglamento de Calidad de Producto Técnico.
Resolución 297/18 – URSEA.

Se controlan armónicas individuales y THD.
En el caso de la THD se considera h de al menos
25.



Orden de la armónica		Nivel de Referencia de la armónica (en % con respecto a la fundamental)
(h)		BT, MT y ST
(impares no múltiplos de 3)	5	6,00
	7	5,00
	11	3,50
	13	3,00
	17	2,00
	19	1,76
	23	1,41
(impares múltiplos de 3)	25	1,27
	3	5,00
	9	1,50
	15	0,40
	21	0,30
(Pares)	2	2,00
	4	1,00
	6	0,50
	8	0,50
	10	0,50
	12	0,46
	14	0,43
	16	0,41
	18	0,39
	20	0,38
	22	0,36
24	0,35	
Tasa de Distorsión Total (THD)		8,00

Normativa en Uruguay

Artículo 42. Si el porcentaje de mediciones con mala calidad es superior al 5 % (cinco por ciento) del total en el Período de Medición, el Distribuidor deberá compensar a los usuarios afectados, de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\$CP_i = \max \left[\left(\frac{P_{95,A} - NR_A}{NR_A} \right), \left(\frac{P_{95,F} - NR_F}{NR_F} \right), \left(\frac{P_{95,D} - NR_D}{NR_D} \right) \right] \times k_{VAD} \times FMP_i$$

Donde:

$\$CP_i$: es el monto en \$ de la compensación correspondiente al Consumidor i.

$P_{95,j}$: Valor no superado durante el 95% del tiempo de medición. (con j igual a F para Flicker, a A para Armónicas y a D para Desbalance)

NR_j : Nivel de Referencia (con j igual a F para Flicker, a A para Armónicas y a D para Desbalance).

k_{VAD} : 0,53.

FMP_i : Es el monto total en pesos (\$) de la Factura Mensual Promedio correspondiente al Consumidor i calculada con el consumo promedio de dicho usuario en los últimos seis meses y con el valor de los distintos cargos tarifarios vigentes al momento del pago de la compensación.

Para armónicas se considerará el máximo desvío verificado entre el THD y las componentes armónicas individuales de órdenes 2 a 25.

La compensación se calculará con el mayor de los respectivos desvíos en los tres parámetros controlados.



Norma Std IEEE 519-2014

- Esta Norma americana contempla tanto los límites a cumplir en la tensión por las empresas prestadoras del servicio eléctrico como los límites de emisión existentes para los usuarios.
- Los niveles de distorsión en la tensión, así como también los de emisión de armónicas son dependientes del nivel de tensión nominal del sistema bajo estudio.
- A diferencia de las IEC, los niveles permitidos en la tensión son iguales para la totalidad de las armónicas, tanto pares como impares.
- Los niveles de emisión son sensiblemente dependientes, tanto de la potencia contratada por el usuario, como de la potencia de cortocircuito existente en el punto en cuestión.
- Son expresados como porcentaje de la corriente obtenida de la potencia contratada por el usuario.



Norma Std IEEE 519-2014

Niveles permitidos en la tensión de suministro

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
$U \leq 1.0 \text{ kV}$	5.0	8.0
$1 \text{ kV} < U \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < U \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$161 \text{ kV} < U$	1.0	1.5

Los P_{95} medidos cada 10', a lo largo de una semana, deben ser menores que los valores indicados en la Tabla.



Norma Std IEEE 519-2014

Niveles permitidos en la emisión de armónicas para sistemas desde 120 V hasta 69000 V

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
	Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)					
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	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

- Los P95 medidos cada 10', a lo largo de una semana, deben ser menores que los valores indicados en la Tabla. Mientras que los P99 deben ser menores que los valores de la Tabla multiplicados por 1.5.
- Los límites para las armónicas pares están limitados al 25 % de aquellos para las armónicas impares.
- Cargas que generan DC-offset (rectificadores de media onda) no están permitidas.



Norma Std IEEE 519-2014

Niveles permitidos en la emisión de armónicas para sistemas desde 69001 V hasta 161000 V

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
	Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)					
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20<50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50<100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100<1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0

Mismas consideraciones que en para sistemas desde 120 V hasta 69000 V.



Norma Std IEEE 519-2014

Niveles permitidos en la emisión de armónicas para sistemas con tensiones mayores a 161000 V

Maximum Harmonic Current Distortion in Percent of I_L						
	Individual Harmonic Order (Odd Harmonics)					
I_{sc}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
< 25	1.0	0.5	0.38	0.15	0.1	1.5
25 < 50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥ 50	3.0	1.5	1.15	0.45	0.22	3.75

Mismas consideraciones que en para sistemas desde 120 V hasta 69000 V.



Medición de armónicas

Medidor



Medidor de armónicas

Descripción del equipo “normalizado”: IEC 61000-4-7

IEC 61000-4-7: *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto.*

IEC 61000-4-30: *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods.*

1. Alcance:

Medición de armónicas en redes eléctricas en general, y pruebas de emisión o susceptibilidad de dispositivos, equipos o sistemas.

2. Magnitudes a medir:

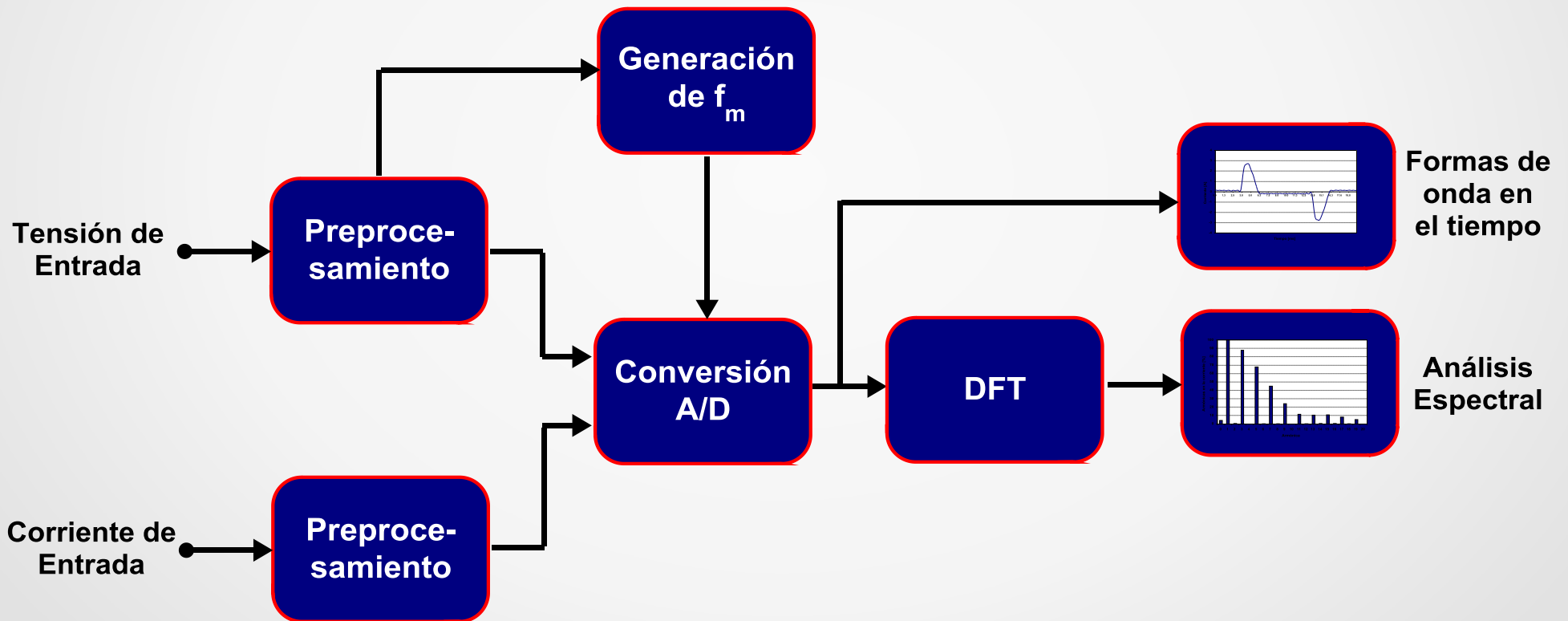
- *Armónicas*: U_n e I_n componentes de frecuencia múltiplo n de la frecuencia de red.
- *Interarmónicas*: U_m e I_m componentes de frecuencia f_m que no es múltiplo de la frecuencia de red.

En general se requiere determinar la amplitud (o valor eficaz) y a veces la fase de cada componente. Pueden requerirse otras magnitudes derivadas como la distorsión armónica total, la distorsión armónica pesada, etc.



Medidor de armónicas

Diagrama de bloques del medidor



Medidor de armónicas

Requerimientos de la IEC 61000-4-7

- Exactitud:

Clase	Medición	Condiciones	Error Máximo admitido
I	Tensión	$U_m \geq 1 \% U_N$	5 % U_m
		$U_m < 1 \% U_N$	0,05 % U_N
I	Corriente	$I_m \geq 1 \% I_N$	5 % I_m
		$I_m < 1 \% I_N$	0,05 % I_N
II	Tensión	$U_m \geq 1 \% U_N$	5 % U_m
		$U_m < 1 \% U_N$	0,15 % U_N
II	Corriente	$I_m \geq 1 \% I_N$	5 % I_m
		$I_m < 1 \% I_N$	0,5 % I_N

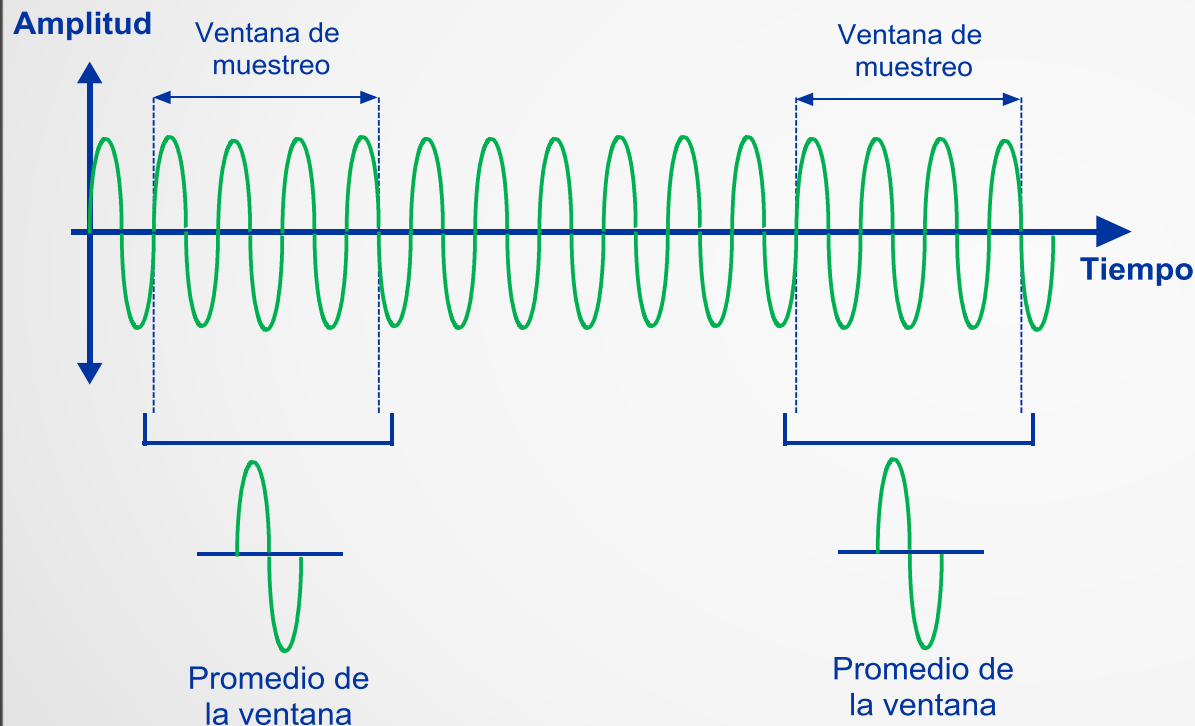
U_m, I_m : Valores medidos.

U_N, I_N : Rangos nominales de entrada del instrumento.



Medidor de armónicas

Modalidad de registro



- Dentro del período de observación, normalmente de 10', tendremos un gran número de ventanas de muestreo.
- Cada una de ellas arrojará un valor "instantáneo" para cada una de las armónicas.
- Los equipos normalmente brindan los valores mínimos, medios y máximos para cada período de 10'.
- Éstos se calculan a partir de la ventana con menor valor, la ventana de mayor valor y el valor medio de todas las ventanas, respectivamente.
- Según las Normas internacionales el valor que debe usarse es el medio de los 10'.
- Sin embargo, en ciertas aplicaciones, es útil conocer el valor máximo que cierta magnitud ha alcanzado.



Medidor de armónicas

Características básicas de un equipo de registro

- Capacidad para medir tensiones y corrientes en las tres fases.
- Rango de los canales capaces de medir señales directas en BT (220 V) o indirectas, en MT o AT, a través de transformadores de medición (63,5 V).
- Pinzas de corriente para mediciones tanto directas como indirectas.
- Posibilidad de visualizar las magnitudes en tiempo real (tensiones y corrientes eficaces, oscilogramas, diagramas fasoriales, armónicas; etc.)
- Capacidad de registro y almacenamiento de los perfiles de las variables de interés. Posibilidad de registrar valores mínimos, máximos y promedios dentro del período de medición (normalmente de 10').
- Como módulo adicional, posibilidad de capturar oscilogramas de tensión y corriente ante la presencia de determinado evento.
- Posibilidad de bajar la información registrada a una PC.
- Apropiado software de visualización y análisis de los resultados.
- Posibilidad de exportar los datos registrados a formato texto, compatible con programas comerciales (Excel, Matlab, ATP; etc.)



Medidor de armónicas

Requerimientos para los transductores

- En muchas aplicaciones, sobre todo en MT y AT, los registradores de armónicas medirán tensiones y corrientes a través de transformadores de tensión (TV) y corriente (TI), respectivamente.
- En estos casos, se requiere que tanto los transformador de tensión como los de corriente posean un error inferior al 5 % en la amplitud y un error de hasta 5° en el ángulo de fase de las armónicas.
- En el caso de la medición de corriente, normalmente se hace por medio de pinzas, las que también deben cumplir con los requerimientos de error de amplitud menor al 5 % y de fase menor a 5° .



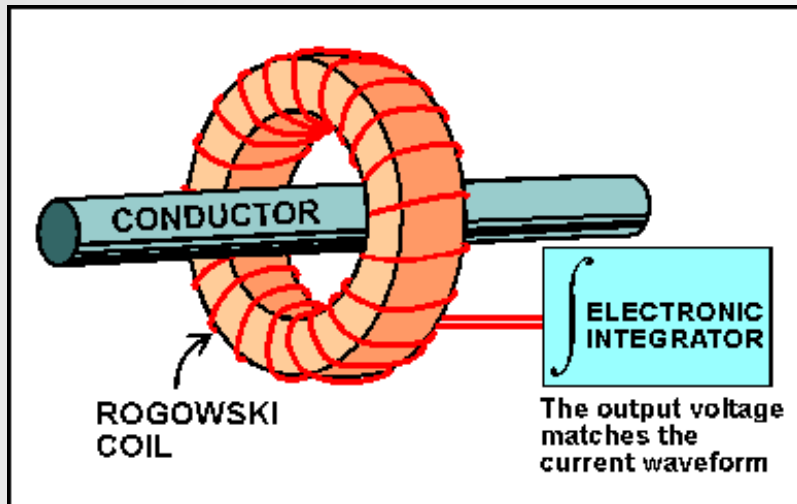
Pinza de corriente con núcleo magnético



Pinza de corriente flexible (bobina de Rogowski)

Medidor de armónicas

Principio de funcionamiento de la *Bobina de Rogowski*



Para una bobina de n vueltas se cumple que:

$$U_{bob} = n \cdot \frac{d\phi}{dt} = n \cdot A \cdot \frac{dB}{dt}$$

Por otro lado, la inducción B , que se presenta al circular una corriente I es:

$$B = \frac{\mu_o \cdot I}{2\pi r}$$

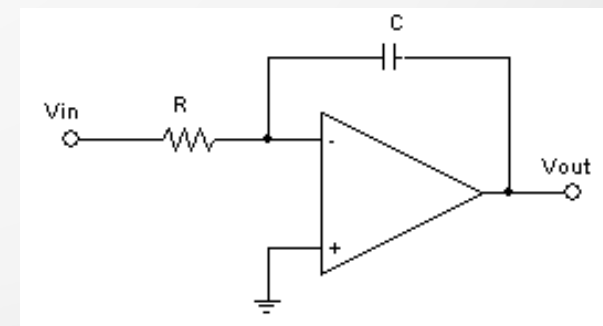
Reemplazando en la ecuación anterior:

$$U_{bob} = \frac{n \cdot A \cdot \mu_o}{2\pi r} \frac{dI}{dt}$$

Por lo tanto, haciendo pasar esta tensión por un circuito integrador, nos queda:

$$U_{out} = \frac{1}{RC} \frac{n \cdot A \cdot \mu_o}{2\pi r} \cdot I \Rightarrow I = k \cdot U_{out}$$

En un circuito integrador, tenemos que:



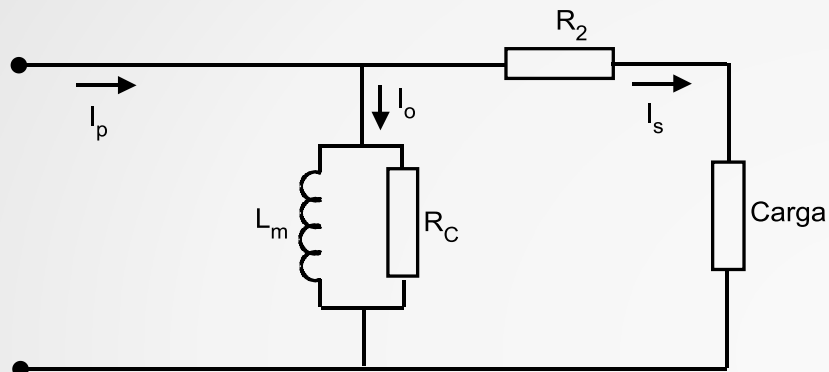
$$U_{out} = \frac{1}{RC} \int U_{in} dt$$



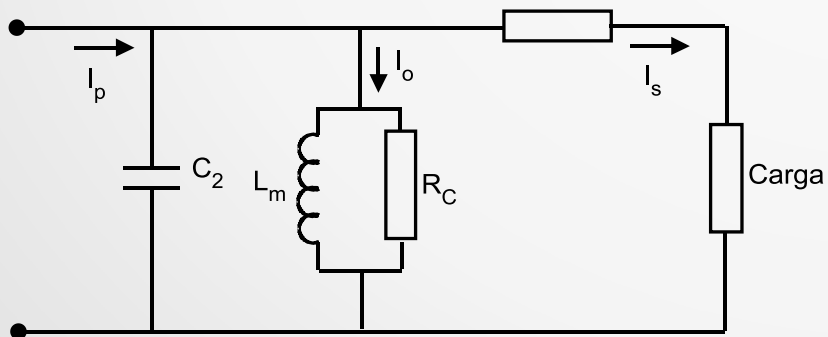
Medidor de armónicas

Transformadores de corriente

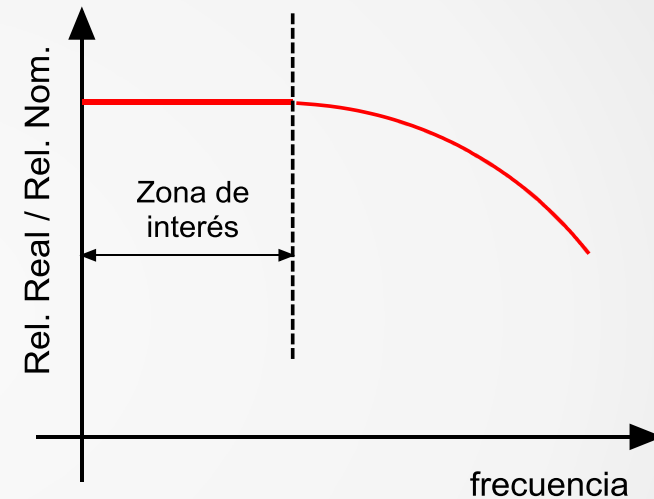
Modelo Básico



Modelo con el agregado de capacitores



Respuesta en frecuencia

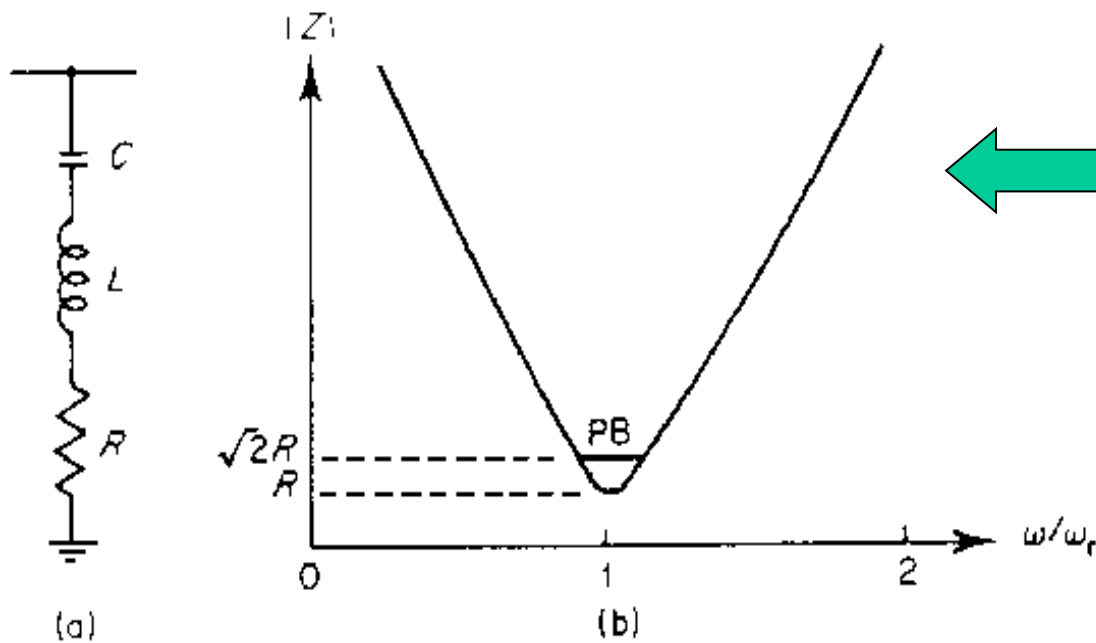


Recomendaciones:

- si tiene varios secundarios, usar el de relación más elevada.
- La carga debe ser de impedancia lo más baja posible.
- El FP de la carga debe ser lo más elevado posible.
- Siempre que sea posible, usar el secundario en cortocircuito y una pinza de corriente de exactitud.



Mitigación de armónicas



Filtros pasivos

Filtro de sintonía simple

Frecuencia de resonancia

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Factor de mérito del filtro

$$Q = \frac{X_0}{R} = \frac{\omega_0}{PB}$$

Típicamente $30 < Q < 60$

Factor de desintonía

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right)$$

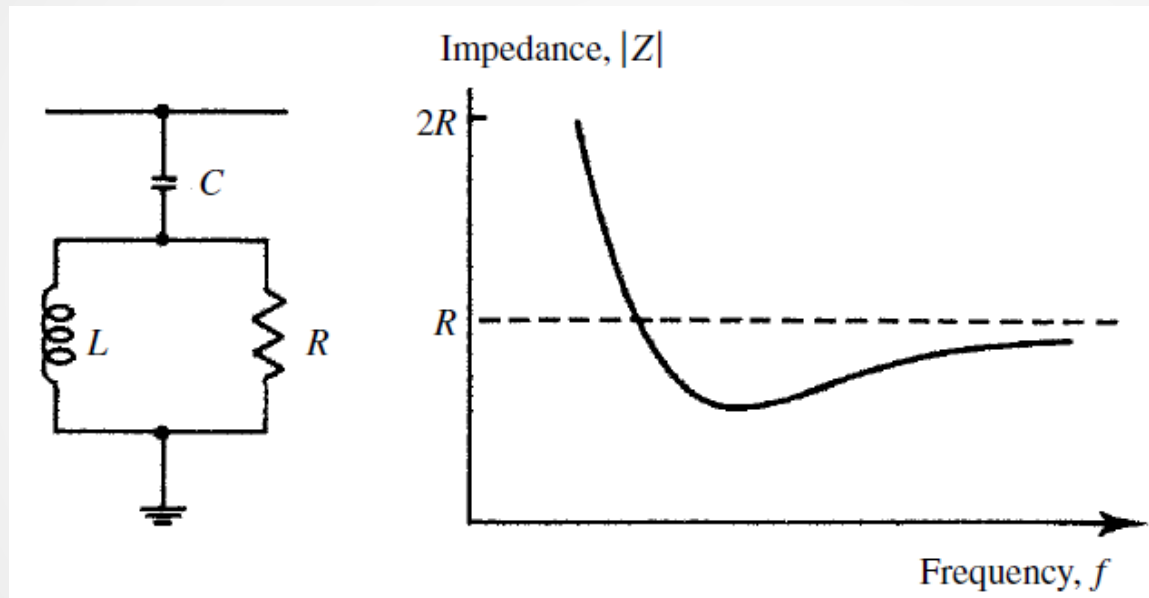
El porte del filtro esta determinado por la potencia reactiva que debe suministrar a la frecuencia fundamental



Mitigación de armónicas

Filtros amortiguados

Se utilizan para eliminar armónicas de orden superior



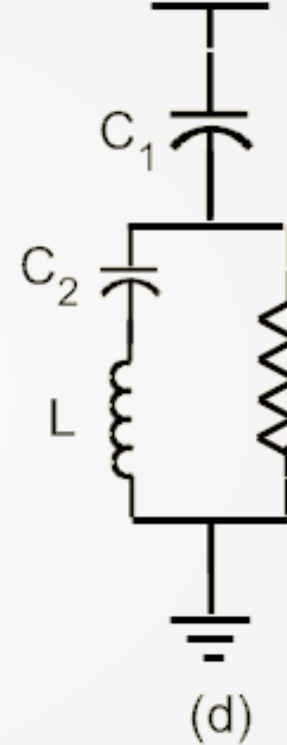
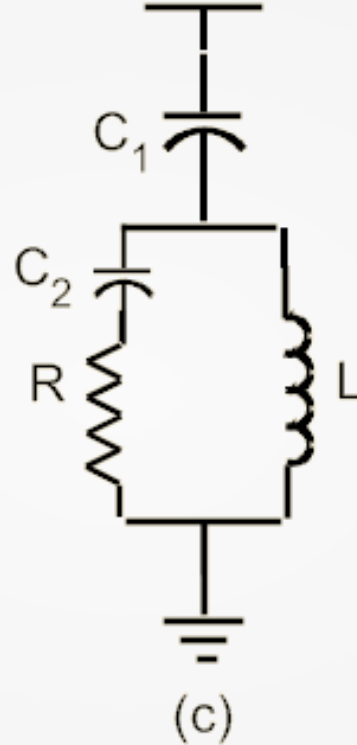
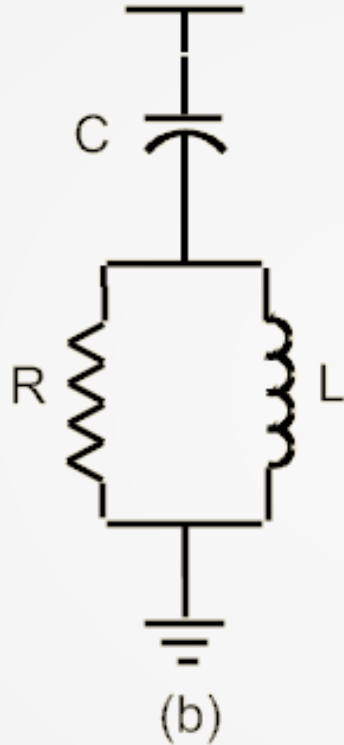
El factor de mérito Q es inverso al del filtro pasabajos. $0.5 < Q < 5$

Presenta una baja impedancia en un amplio rango de frecuencias



Mitigación de armónicas

Tipos de filtros amortiguados



(a) Filtro de primer orden

(b) Filtro de segundo orden

(c) Filtro de tercer orden

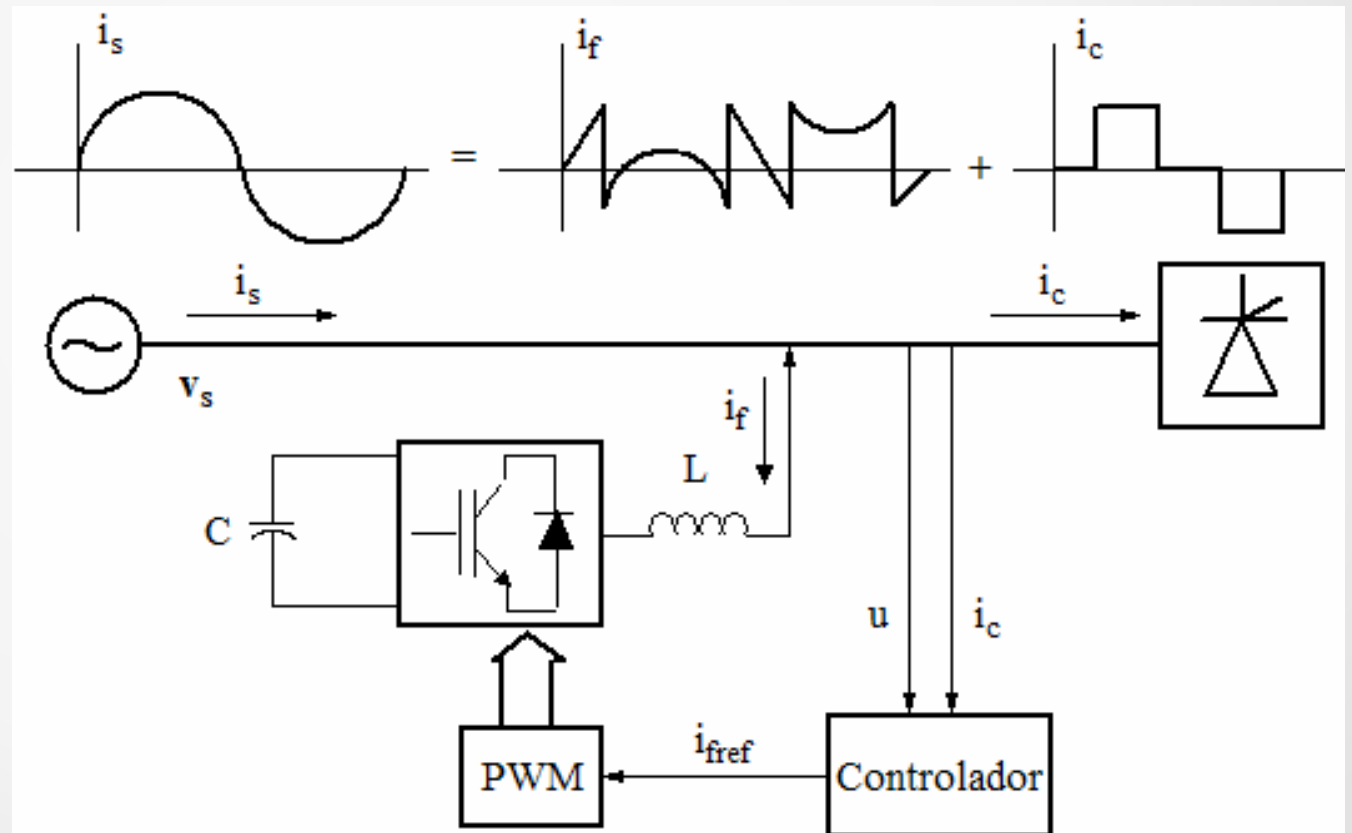
(d) Filtro C-type



Mitigación de armónicas

Filtros Activos (AHF)

Son convertidores que inyectan corrientes o tensiones en la línea de forma tal de compensar la distorsión introducida por la carga.



Mitigación de armónicas

Filtros Activos (AHF)

Controlar la corriente de línea en tiempo real y procesar las armónicas medidas como señales digitales en un procesador digital de señales (DSP “Digital Signal Processor”). La salida del DSP controla un modulador de ancho de pulso (PWM “Pulse Width Modulated”) que a través de reactores de línea inyectan corrientes armónicas con la fase exactamente opuesta a aquellas que están siendo filtradas

Ventajas:

- 1) Compensan las corrientes armónicas y el factor de potencia de la carga.
- 2) No producen resonancias con el sistema.
- 3) Tienen la capacidad de eliminar interarmónicas y armónicas no convencionales como 2^a, 4^a, 6^a etc.
- 4) No se sobrecargan.

Desventajas:

- 1) Costo elevado.



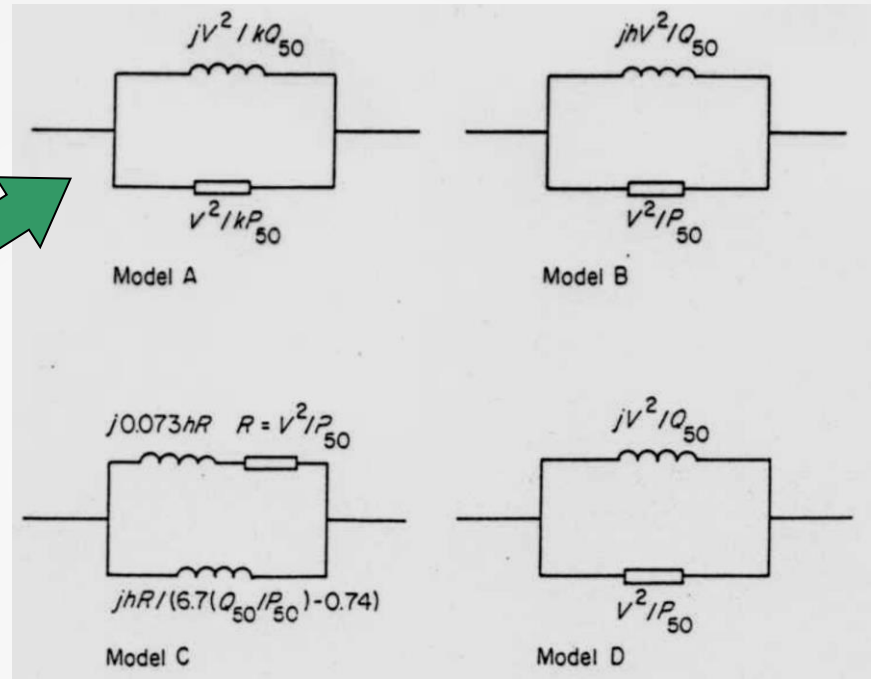
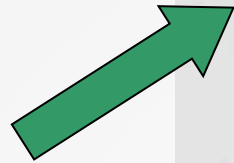
Estudios de armónicas

Modelos de Cargas:
Dependencia con la
frecuencia

$$Y_L(\omega) = 1/R + j(h \cdot X)$$

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

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



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.

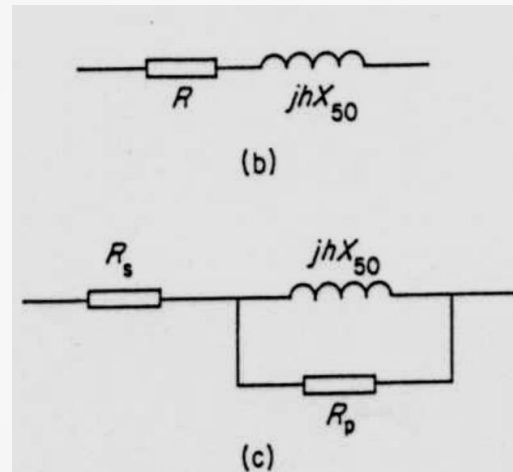
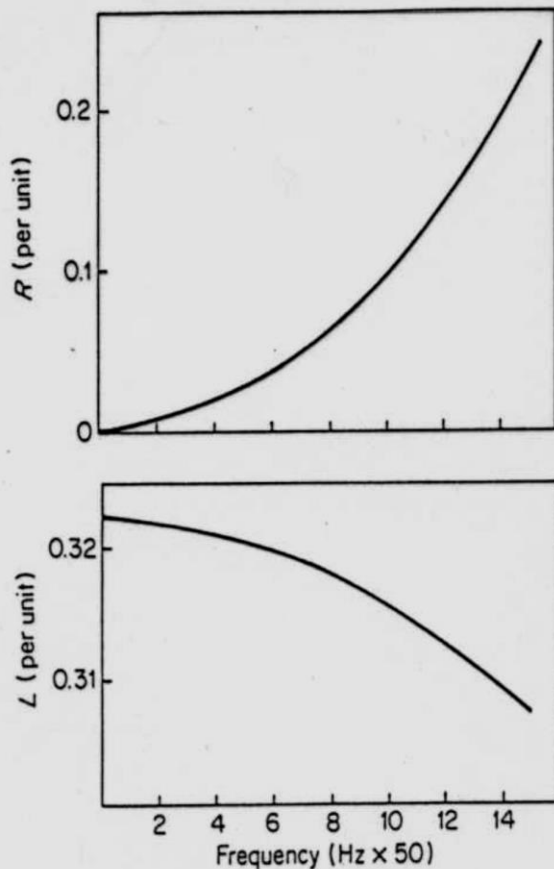
Modelo **D** - valores calculados a 50 Hz que se mantienen constantes.



Estudios de armónicas

Modelos de Transformadores: dependencia con la frecuencia

Modelos sugeridos por CIGRE



$$(b) \quad R = 0.1026 k h X_{50} (J + h)$$

$$k = 1 / (J + h)$$

$$(c) \quad 90 < U^2 / S R_s < 110 \quad 13 < S R_p / U^2 < 30$$

$S = 30 \text{ MVA}$	$R_s = 0.04$	$R_p = 60$
$S = 100 \text{ MVA}$	$R_s = 0.01$	$R_p = 20$

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

(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

v: velocidad de propagación

l: longitud de la línea (km)

$$\frac{1}{\sqrt{LC}}$$

L (H/km) y C (F/km)

Ej: Línea aérea $l = 100$ km, $v = 3 \times 10^5$ km/s, 1 sección π



$$f_{\max} = 375 \text{ Hz}$$

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

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

Líneas

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

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:

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

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

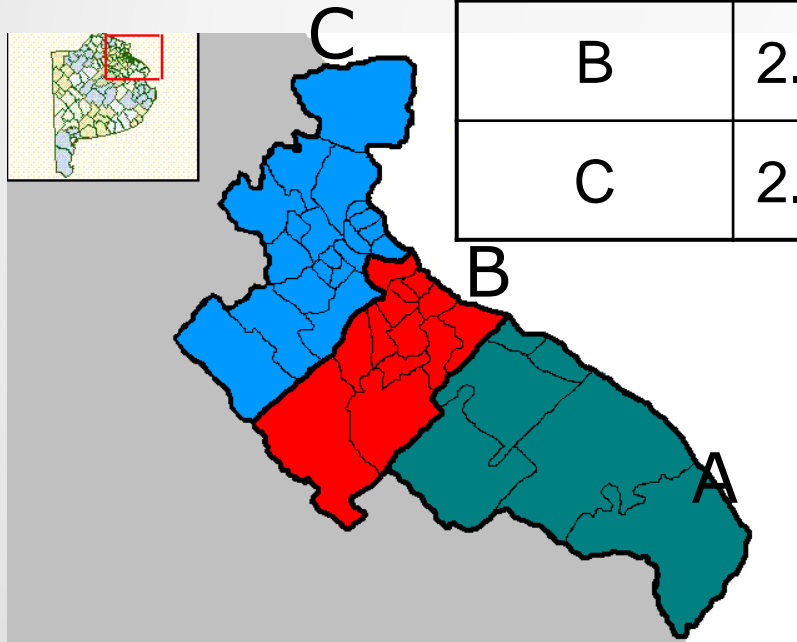
La secuencia básica de pasos a seguir para realizar un estudio de armónicas es la siguiente:

- 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 un programa adecuado (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.



**Campaña de medición de armónicas en Buenos Aires y alrededores.
Resultados de diez años de control.**

Distri- buidora	Nº Usuarios	Energía suministrada [GWh por año]	Área [km²]
A	300.000	2.600	5.700
B	2.200.000	16.600	3.300
C	2.500.000	17.900	4.600



Distribuidora	Nº de mediciones por mes
A	6
B	12
C	12



Estudio estadístico realizado luego de los primeros diez años de control en Bs As

Con el propósito de caracterizar el comportamiento de armónicas, luego de la primera década de control permanente se decidió llevar a cabo un detallado análisis de las mediciones realizadas:

Se comparó el THD entre las distintas Distribuidoras

Se obtuvo el comportamiento a lo largo de la década

El comportamiento a lo largo del año

El comportamiento a lo largo del día

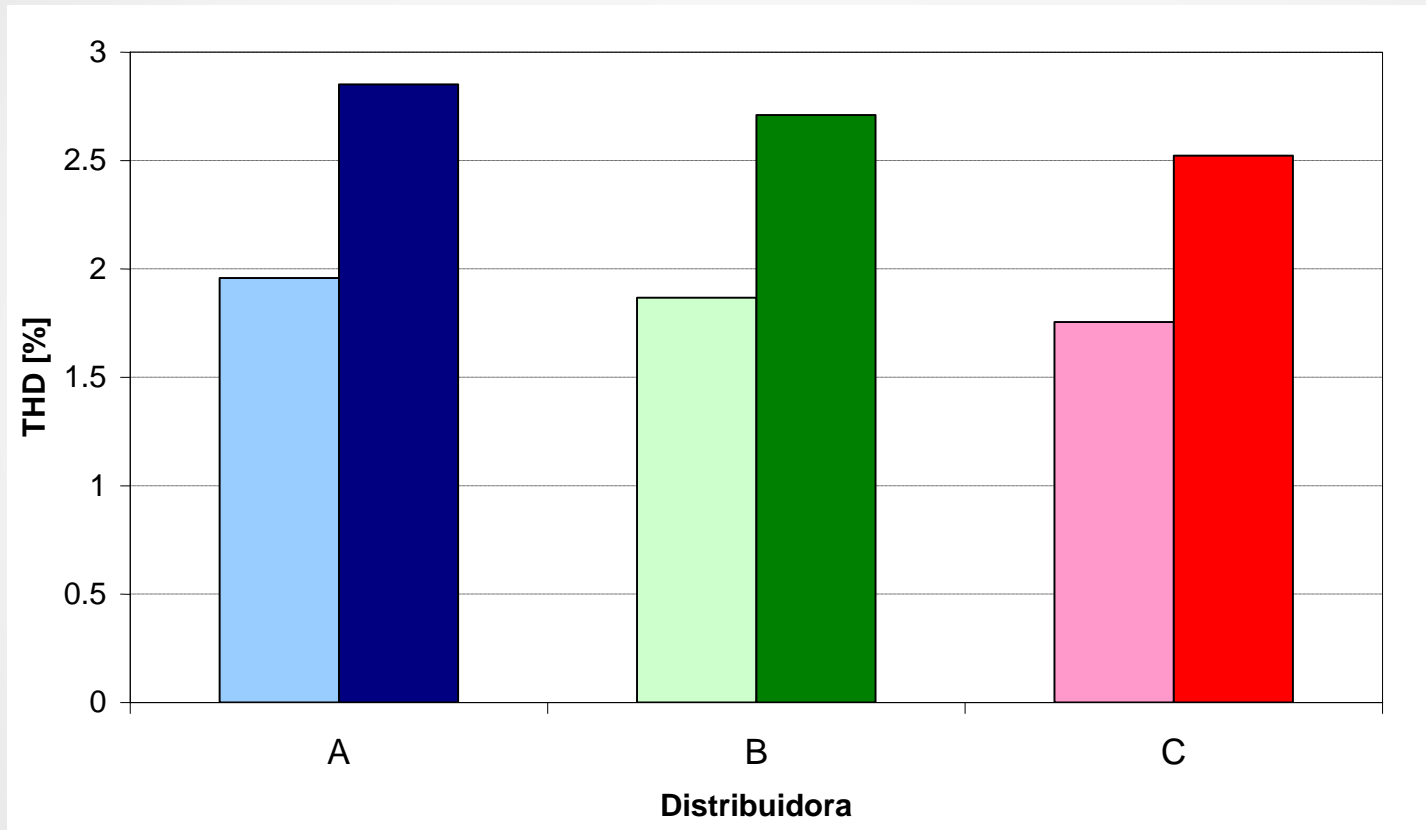
Se compararon los Niveles medidos con los de referencia

Se calcularon los casos penalizados por Distribuidora



Comparación de THD entre Distribuidoras - Bs As

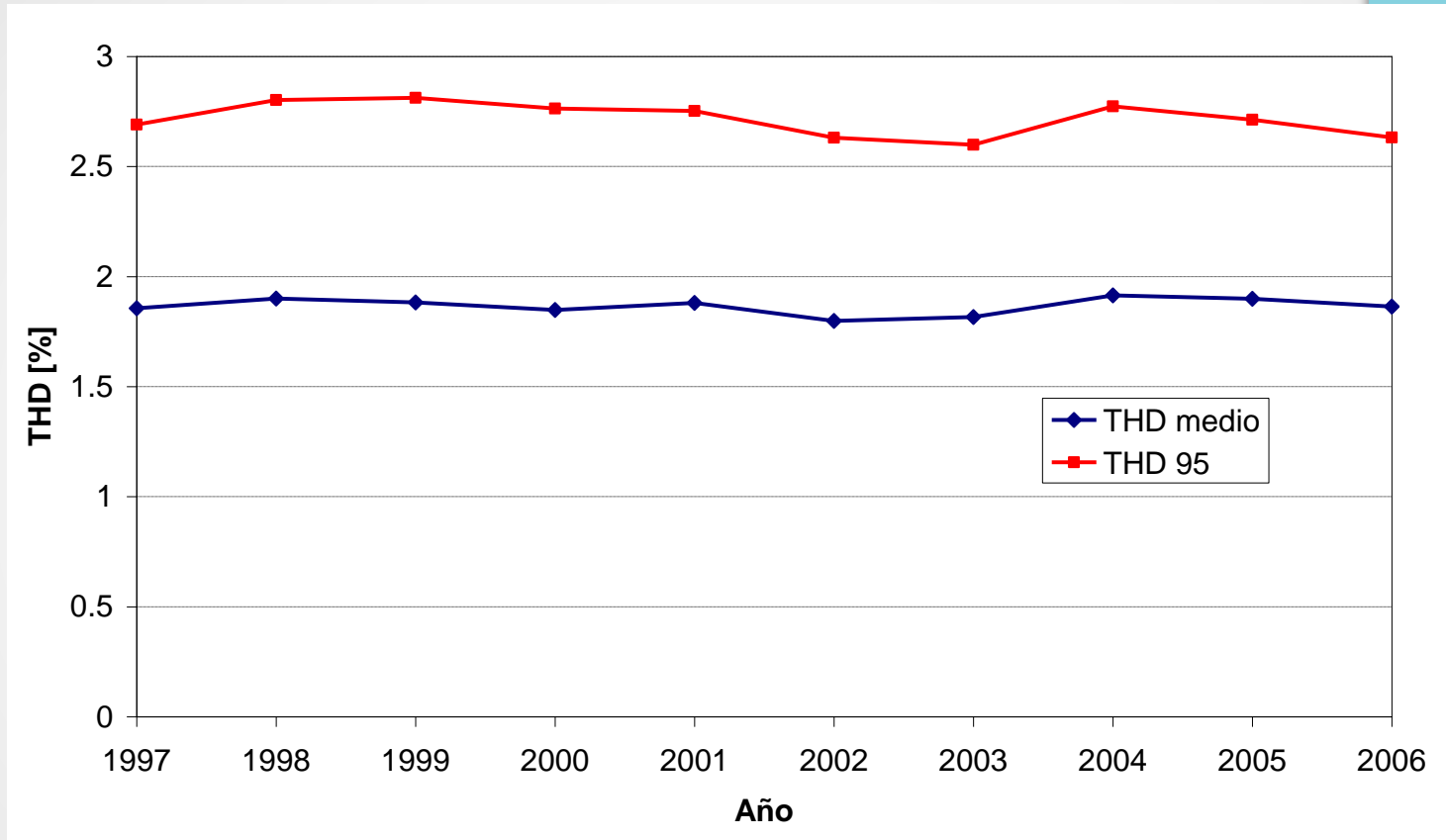
Valores medios y P_{95} medidos en cada Distribuidora



El límite existente para el THD en la red de BT es de 8 %



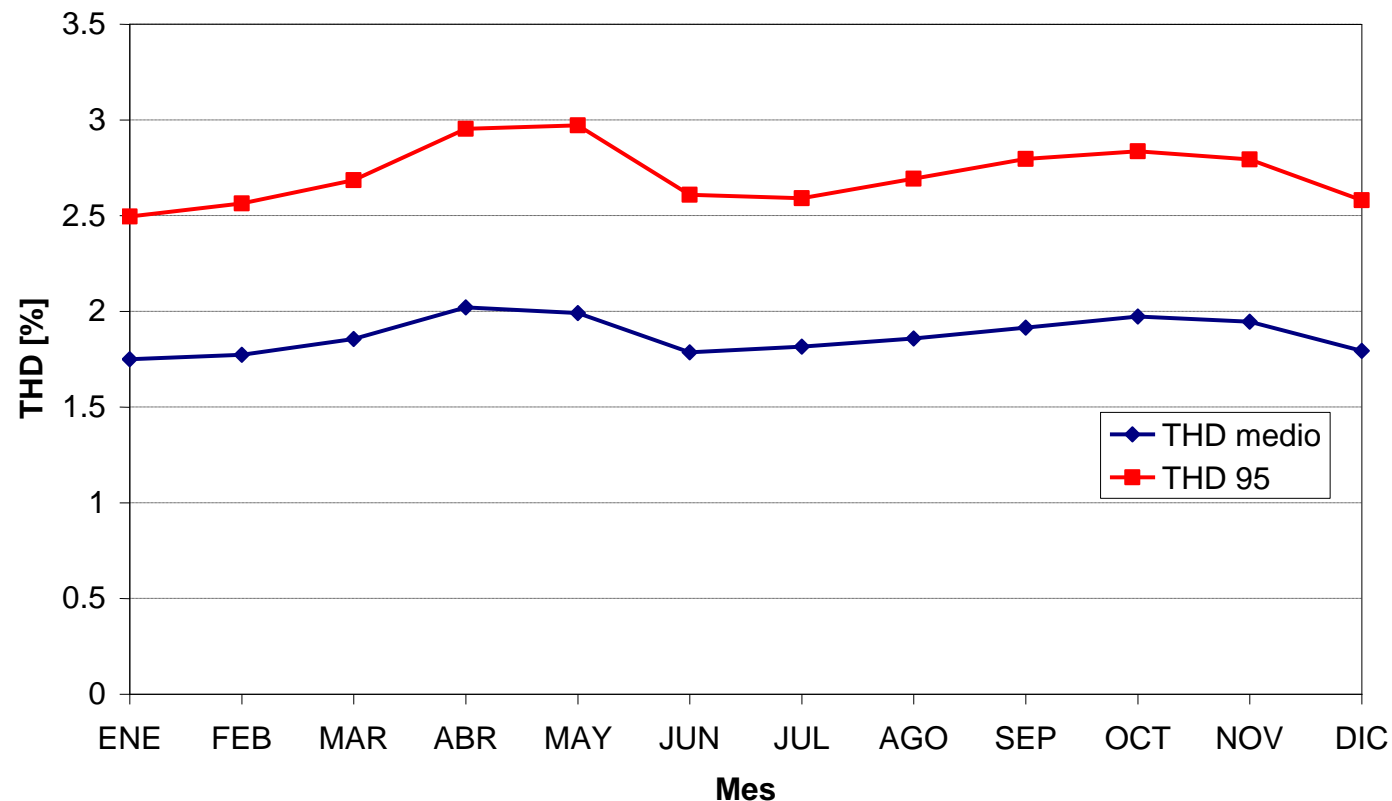
Comportamiento a lo largo de la década - Bs As



Los niveles de armónicas a lo largo de los 10 años se han mantenido estables



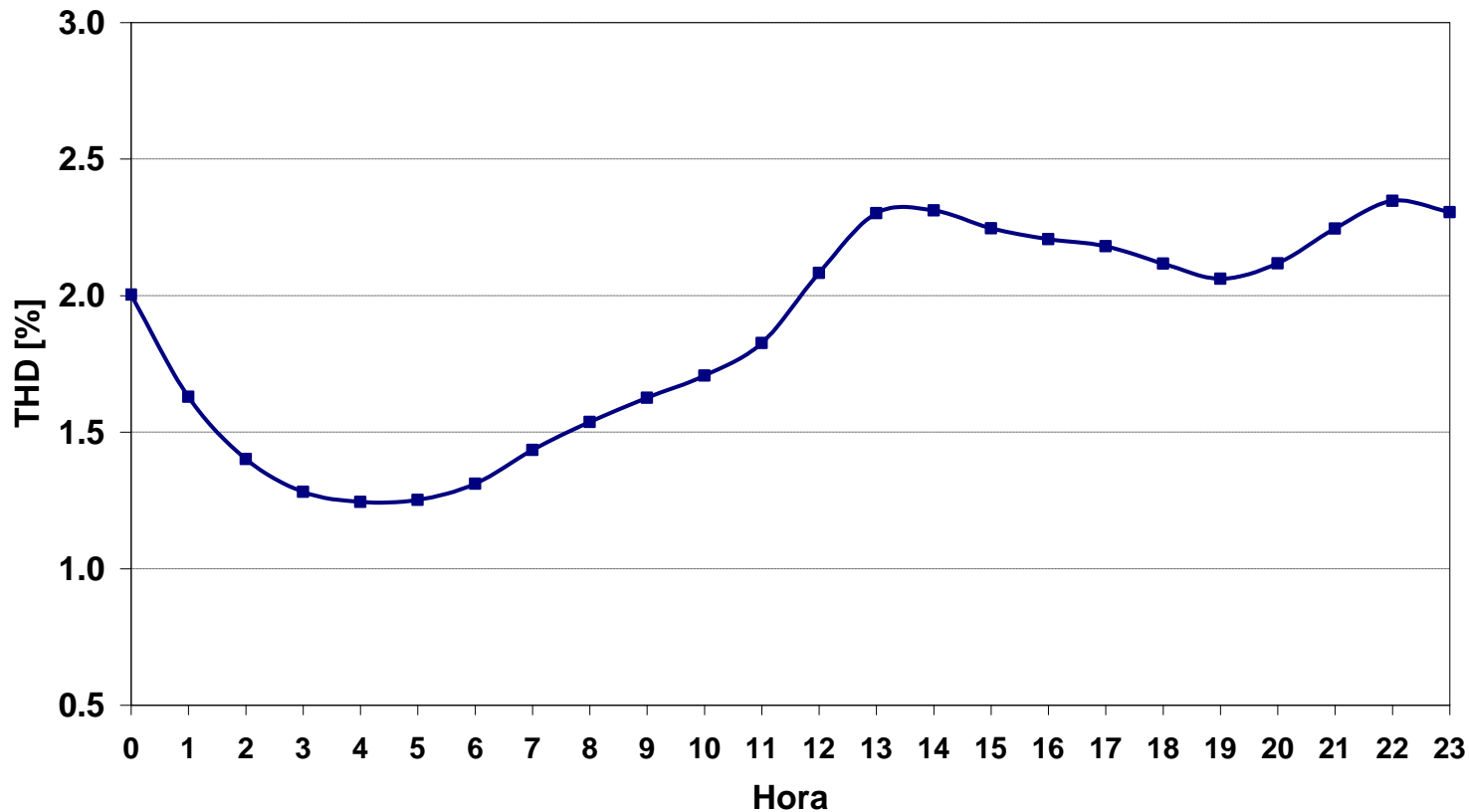
Comportamiento a lo largo del año – Bs As



Los niveles más bajos se han registrado durante los períodos normalmente empleados por los usuarios residenciales para sus vacaciones



Comportamiento a lo largo del día – Bs As

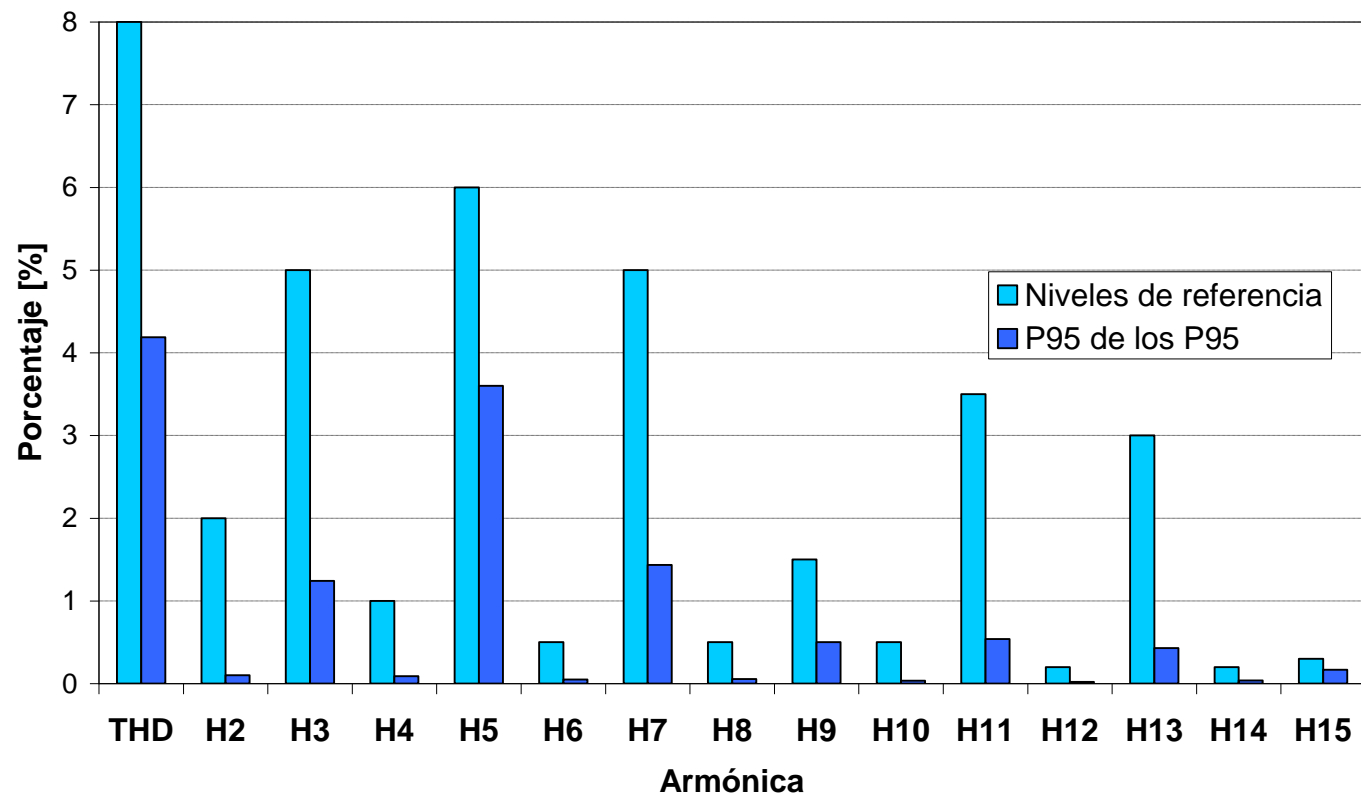


El perfil de THD a lo largo del día posee una gran vinculación con la curva de carga de usuarios residenciales

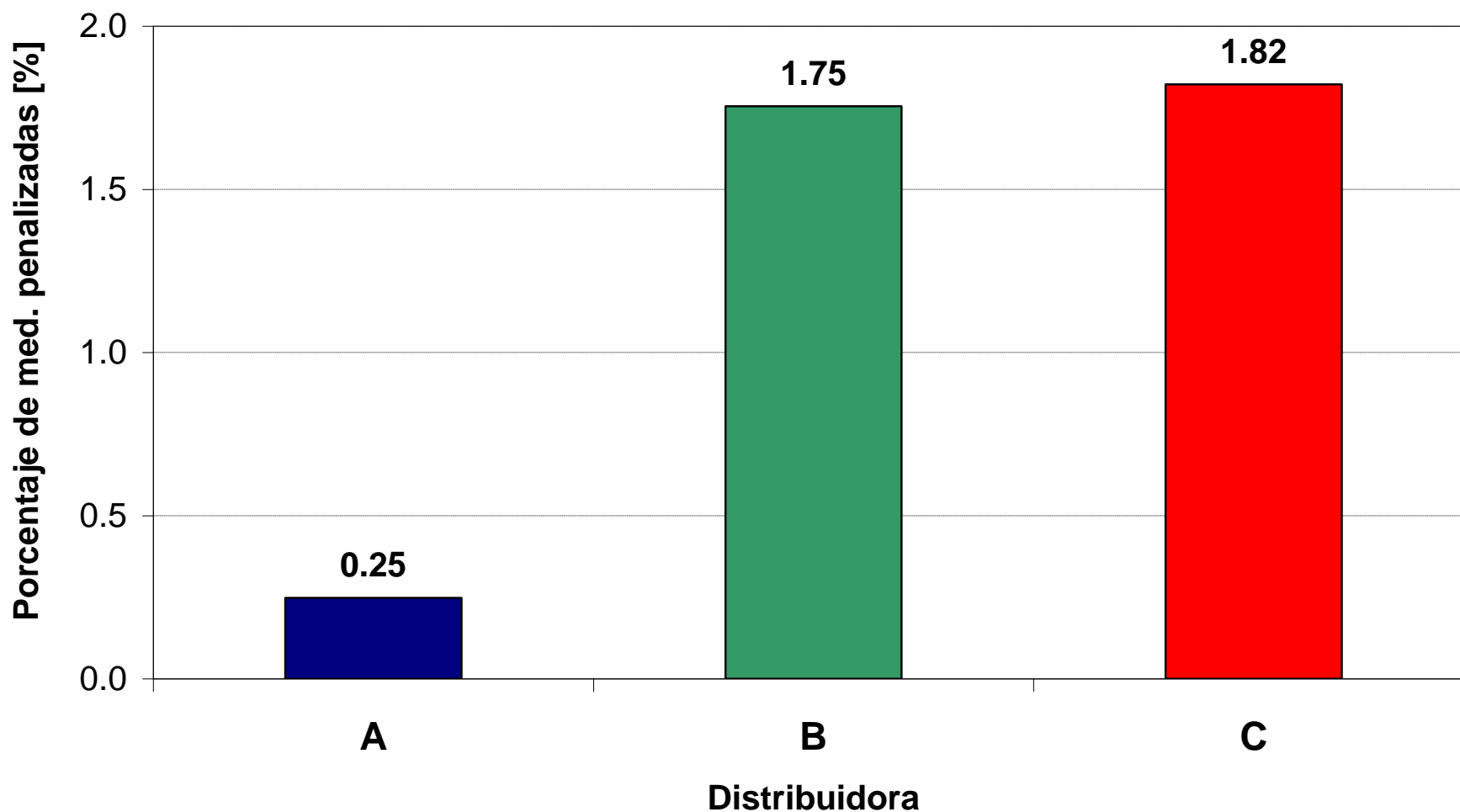


Componentes individuales – Bs As

Niveles medidos y de referencia



Casos penalizados por Distribuidora - Bs As



El grado de cumplimiento es elevado

¿Preguntas?

Muchas Gracias

