

Contenido

1. ¿Qué son las armónicas?
2. Factor de cresta, valor rms y distorsión armónica
3. ¿Qué son cargas no lineales? - Parte 1
4. ¿Qué son cargas no lineales? - Parte 2
5. Factor de potencia en presencia de armónicas
6. Armónicas no características en equipo dañado
7. Efectos de las armónicas en los sistemas eléctricos
8. Armónicas y resonancia paralelo
9. Armónicas de sintonía y resonancia paralelo
10. Transformador delta - estrella con cargas no lineales monofásicas



Contenido - 2

11. Conexión de transformadores para eliminar armónicas en la corriente
12. Implementación de un filtro de armónicas para fuentes reguladas por conmutación
13. Comparación de configuraciones en filtros de armónicas para fuentes reguladas por conmutación
14. Cálculos para la corriente en el inductor y el voltaje en el capacitor de un filtro
15. Diseño y especificaciones de filtros de armónicas para variadores de velocidad
16. Interpretación y aplicación del Estándar IEEE-519
17. Filtros para corrección del factor de potencia
18. Ventajas del uso de filtros
19. Comparación filtros sintonizados y desintonizados



PQ analyzers



<http://www.fluke.com/>

<http://www.dranetz.com/>



<http://www.pml.com/>

<http://www.squared.com/>



Teorema de Fourier

De acuerdo al Teorema de Fourier, una función que se repite cada T segundos (esto es, una función con período T) puede expresarse como una suma infinita de senos y cosenos, tal como se muestra a continuación:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos (1 \times \omega_1 t) + b_1 \sin (1 \times \omega_1 t) + a_2 \cos (2 \times \omega_1 t) + b_2 \sin (2 \times \omega_1 t) \\ + a_3 \cos (3 \times \omega_1 t) + b_3 \sin (3 \times \omega_1 t) + a_4 \cos (4 \times \omega_1 t) + b_4 \sin (4 \times \omega_1 t) + \dots$$

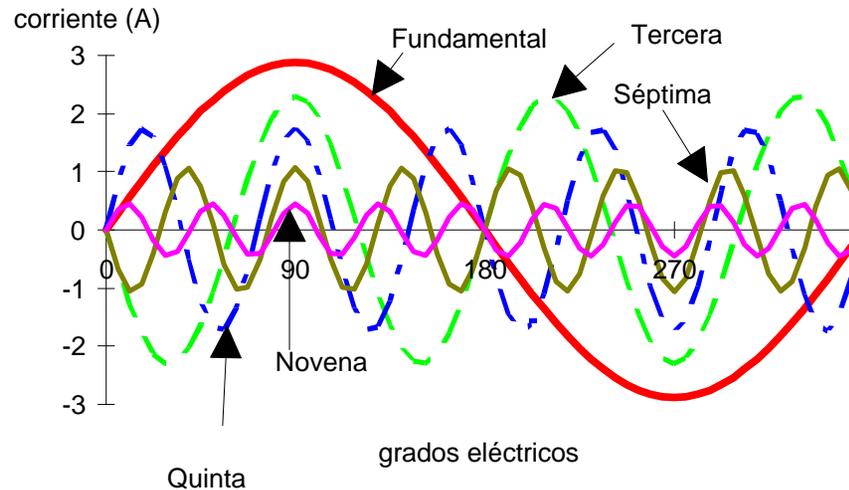
donde $\omega_1 = 2 \pi / T$ es la frecuencia angular en rad / s.

La suma $a_1 \cos (\omega_1 t) + b_1 \sin (\omega_1 t)$ es la componente fundamental y tiene la misma frecuencia y el mismo periodo T que la función que deseamos descomponer en senos y cosenos.

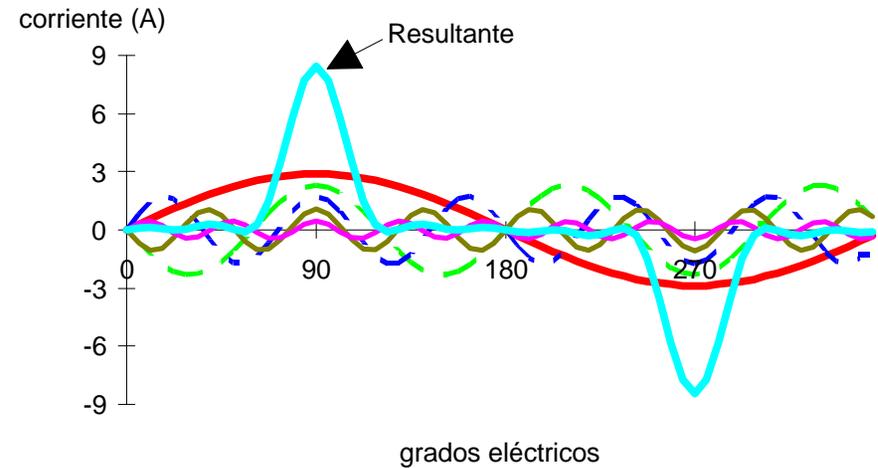


Corriente en computadoras

$$i(\omega_1 \times t) = \begin{matrix} +2.88 \times \sin(1 \times \omega_1 \times t) & -2.31 \times \sin(3 \times \omega_1 \times t) \\ +1.75 \times \sin(5 \times \omega_1 \times t) & -1.07 \times \sin(7 \times \omega_1 \times t) \\ +0.45 \times \sin(9 \times \omega_1 \times t) & \end{matrix}$$



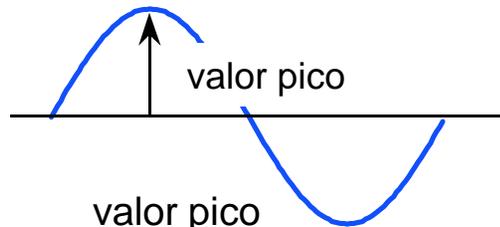
(a) Componentes armónicas



(b) Componentes armónicas y resultante



Factor de cresta y valor promedio



$$\text{valor rms} = \frac{\text{valor pico}}{\sqrt{2}}$$

$$\text{valor promedio} = 0$$

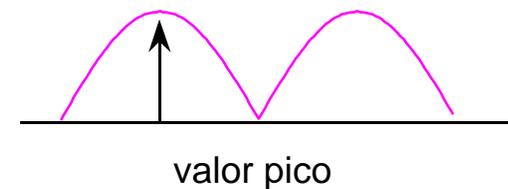
$$\text{factor de cresta} \quad f.c. = \frac{\text{valor pico}}{\text{valor rms}}$$

el factor de cresta de una senoidal es $\sqrt{2}$

$$\text{valor promedio:} \quad F_{\text{prom}} = \frac{\text{área bajo la curva}}{\text{período en segundos}} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$$

el valor promedio de una senoidal es 0

el valor promedio de una senoidal rectificadora es $\frac{2}{\pi} V_p$



Valor efectivo

$$F_{\text{rms}} = \sqrt{\text{promedio de } f^2(t)} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt}$$

$$i(t) = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega_1 t) + \sqrt{2} I_2 \sin(\omega_2 t) + \sqrt{2} I_3 \sin(\omega_3 t)$$

$$I_{\text{rms}} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2}$$

ω_1, ω_2 y ω_3 son distintas

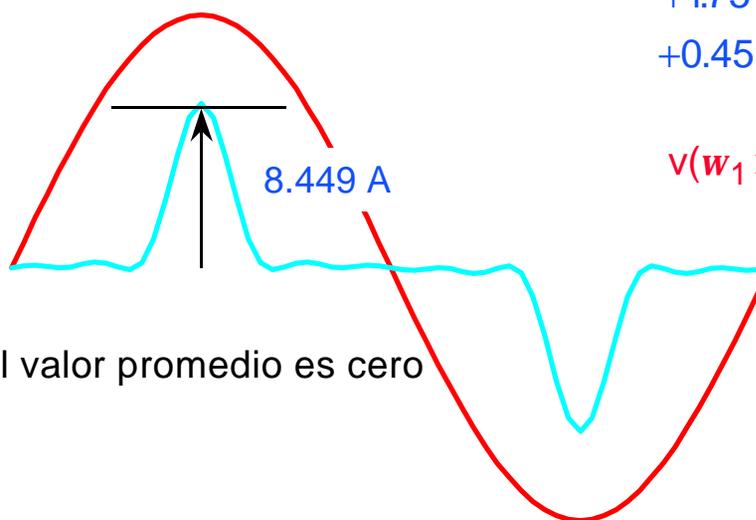




Corriente de un grupo de computadoras

$$i(\omega_1 \times t) = +2.88 \times \sin(1 \times \omega_1 \times t) - 2.31 \times \sin(3 \times \omega_1 \times t) \\ + 1.75 \times \sin(5 \times \omega_1 \times t) - 1.07 \times \sin(7 \times \omega_1 \times t) \\ + 0.45 \times \sin(9 \times \omega_1 \times t)$$

$$v(\omega_1 \times t) = \sqrt{2} \times 120 \times \sin(1 \times \omega_1 \times t)$$



$$f.c. = \frac{\text{valor pico}}{\text{valor rms}} = \frac{8.449}{3} = 2.816$$

h	1	3	5	7	9
I pico, h	2.88	2.31	1.75	1.07	0.45
I rms, h	2.036	1.633	1.237	0.757	0.318
(I rms,h) ²	4.1472	2.66805	1.53125	0.57245	0.10125

$$I_{rms} = \sqrt{4.1472 + 2.66805 + 1.53125 + 0.57245 + 0.10125} = 3.00 \text{ A rms}$$

Valor rms verdadero y en base a promedio

- **Valor rms verdadero.** Algunos instrumentos indican el valor rms sin importar la forma de la onda, por lo general aparece la leyenda “true rms” en dichos instrumentos.
- **Valor rms en base al promedio de la senoidal rectificada.** Algunos instrumentos rectifican una señal proporcional a la cantidad a medir y miden directamente el valor promedio de dicha señal. La escala no indica el valor promedio sino el valor rms que corresponde a una senoidal.

- **para una senoidal:** $I_{\text{rms}} = I_{\text{pico}} / \sqrt{2}$

- **valor promedio de una senoidal con rectificación de onda completa está dado por:**

$$I_{\text{prom}} = 2 \cdot I_{\text{pico}} / p$$

- **valor rms en función del valor promedio está dado por:**

$$I_{\text{rms}} = \frac{p}{2\sqrt{2}} I_{\text{prom}}$$



Corriente de un grupo de computadoras



$I_{\text{true rms}} = 3 \text{ A}$

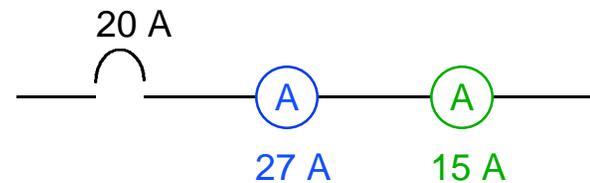
Rectificación de onda completa
Valor promedio = 1.501 A.

En base a valor pico

$$I_{\text{rms}} = \frac{I_{\text{pico}}}{\sqrt{2}} = \frac{8.449}{\sqrt{2}} = 6$$

En base a valor promedio

$$I_{\text{rms}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} I_{\text{prom}} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \times 1.501 = 1.667$$



Distorsión Armónica Total

$$\text{THD} = \frac{\text{valor rms de la distorsión}}{\text{valor rms de la fundamental}} = \frac{I_{\text{dist}}}{I_1}$$

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots + I_{h\text{max}}^2}}{I_1}$$

$$\text{THD} = \sqrt{\left(\frac{I_2}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{I_3}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{I_4}{I_1}\right)^2 + \left(\frac{I_5}{I_1}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_{h\text{max}}}{I_1}\right)^2} = \sqrt{\sum_{h=2}^{h\text{max}} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2}$$



Distorsión Armónica Total

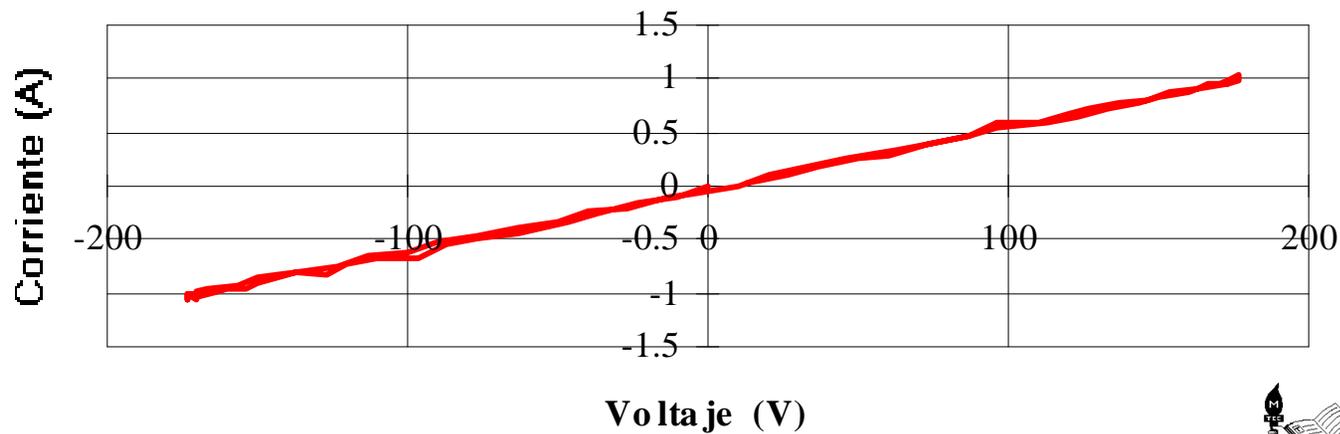
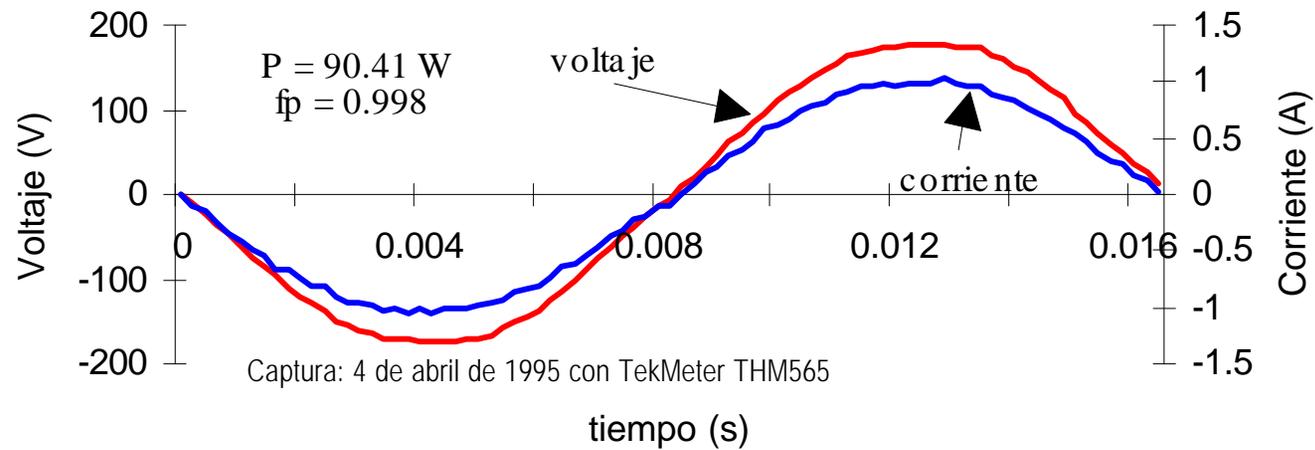
h	1	3	5	7	9
I pico, h	2.88	2.31	1.75	1.07	0.45
I rms, h	2.036	1.633	1.237	0.757	0.318
(I rms,h) ²	4.1472	2.66805	1.53125	0.57245	0.10125
(I rms,h) / I1	1	0.802	0.608	0.372	0.156
{(I rms,h) / I1} ²	1	0.643	0.369	0.138	0.024

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{2.6681 + 1.5313 + 0.5725 + 0.10125}}{2.036} = \frac{2.207}{2.036} = 1.084 = 108.4\%$$

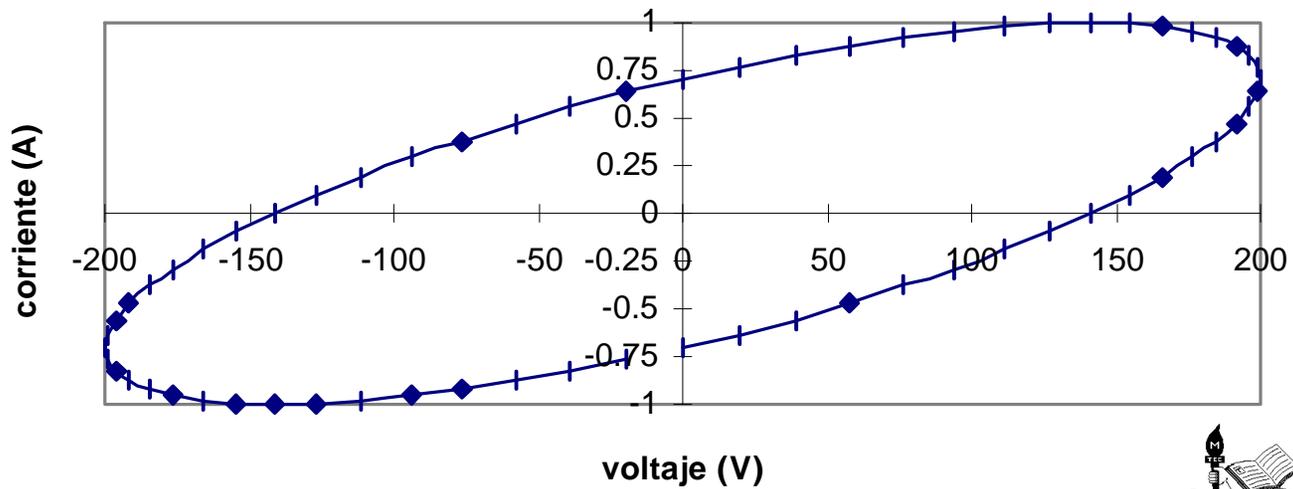
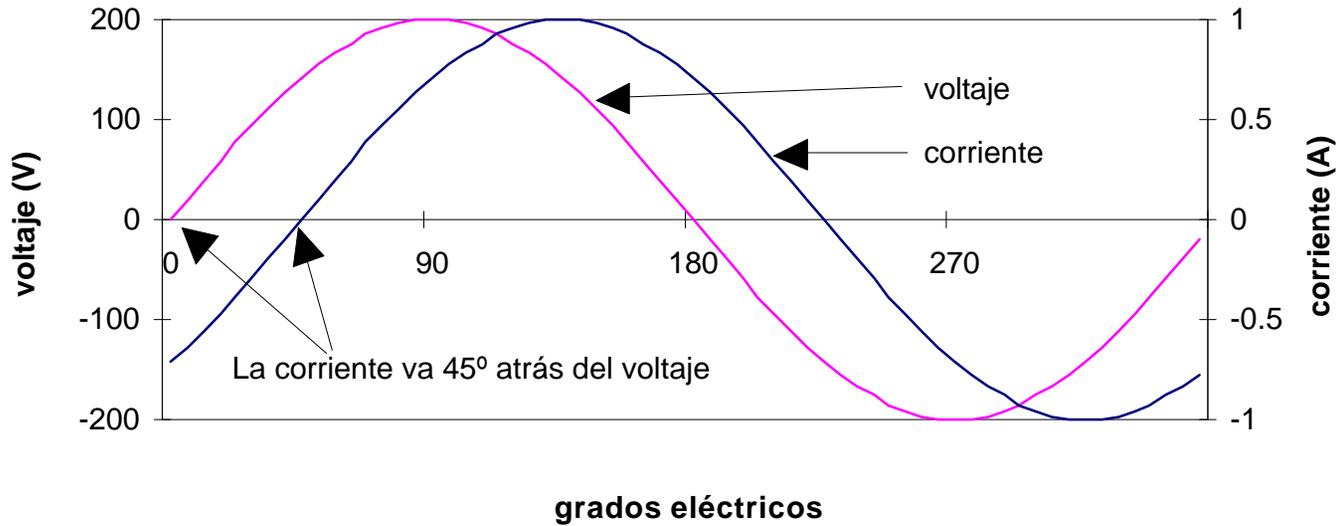
$$\text{THD} = \sqrt{0.643 + 0.369 + 0.138 + 0.024} = 1.084 = 108.4\%$$



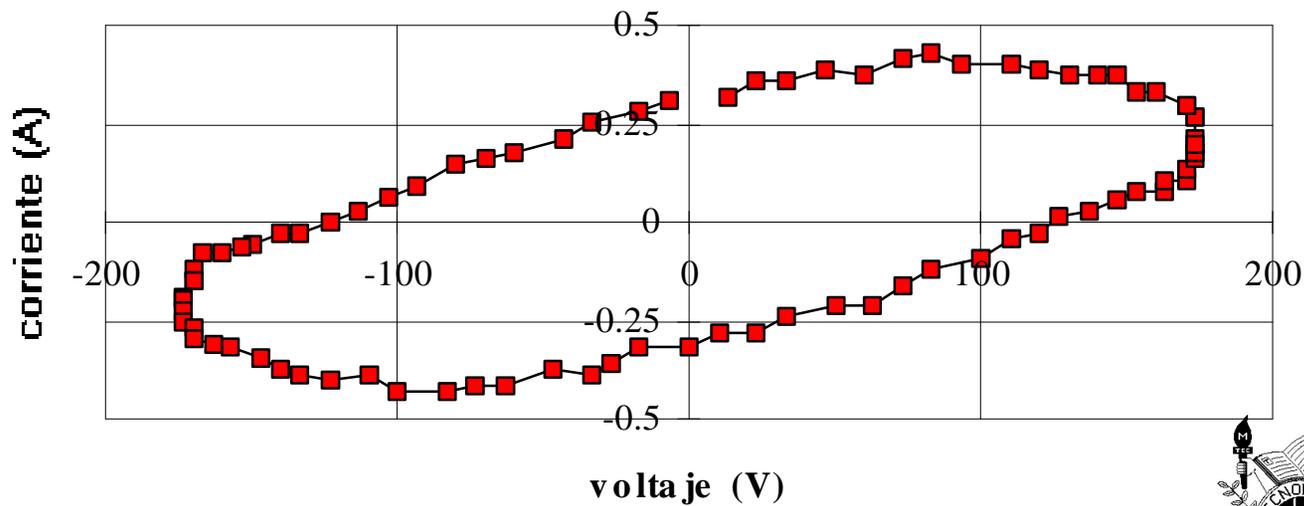
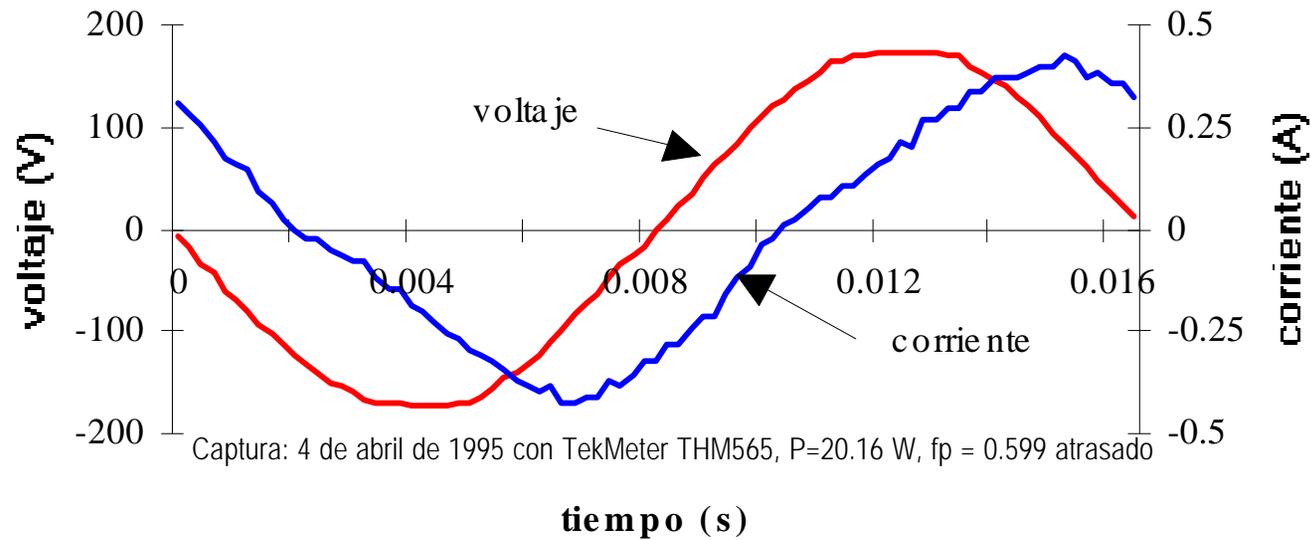
Lámparas de 125 V, 100 W



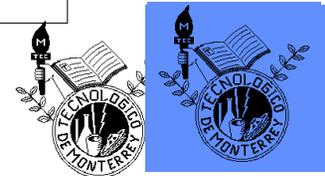
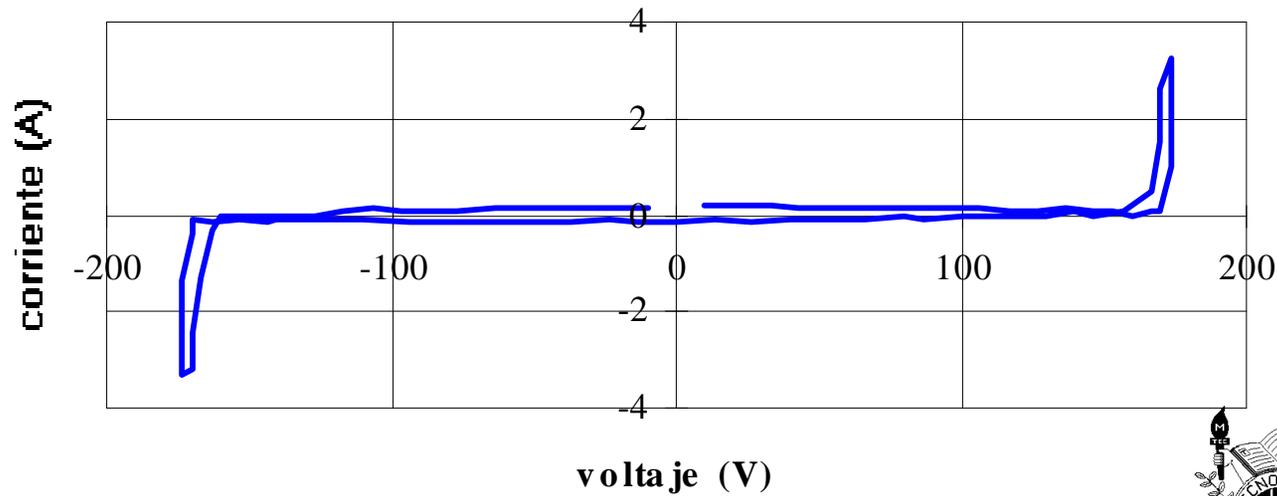
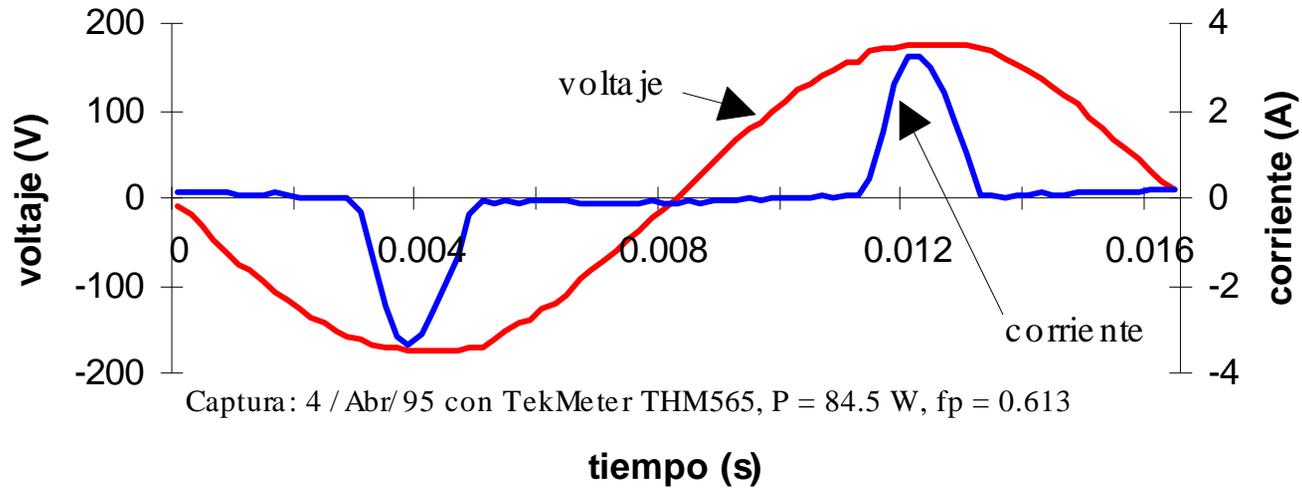
Factor de potencia atrasado



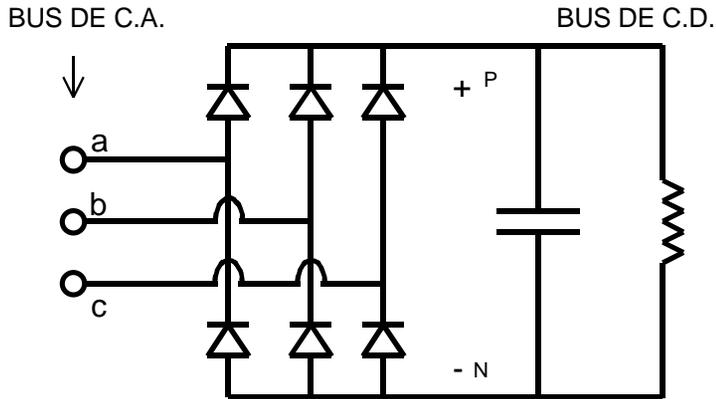
Lámpara fluorescente de 125 V, 22 W



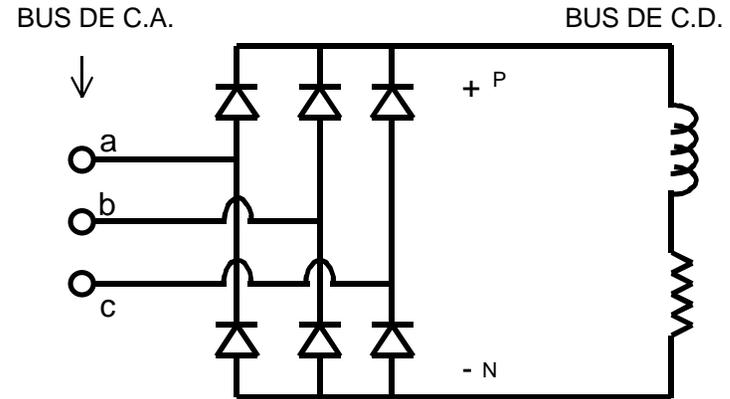
PC y monitor



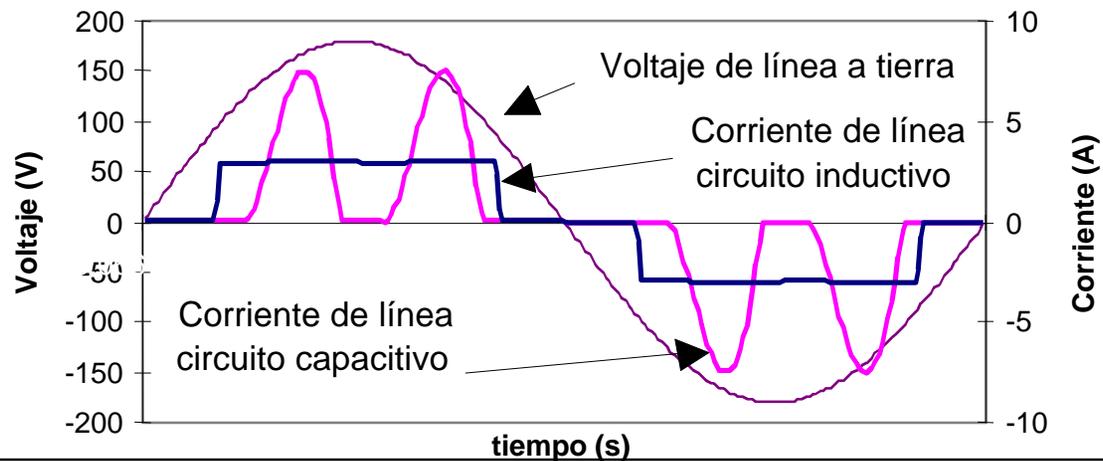
Rectificadores trifásicos



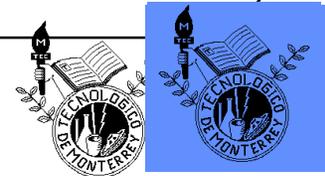
a) Capacitor grande en bus de C.D.



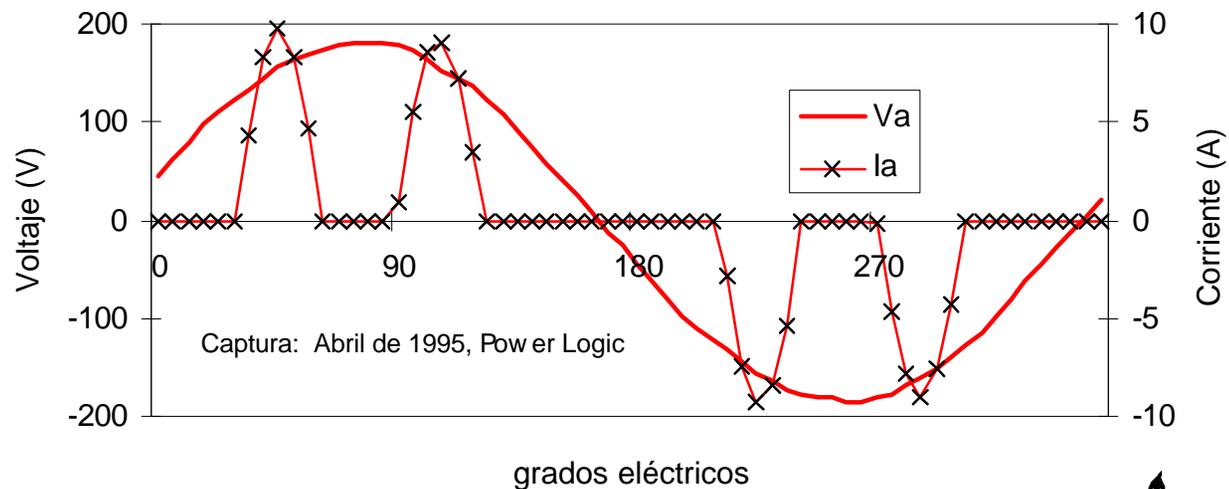
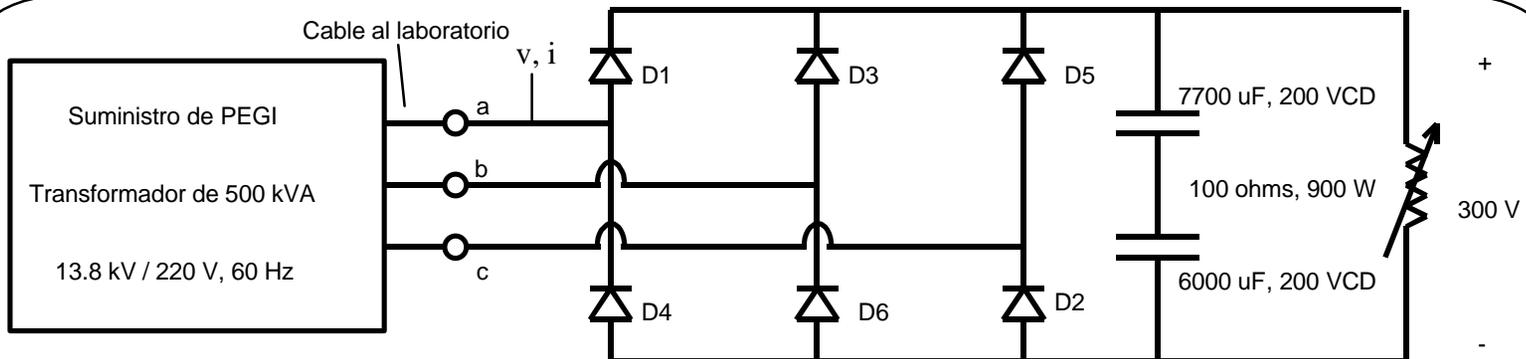
b) Inductancia grande en bus de C.D.



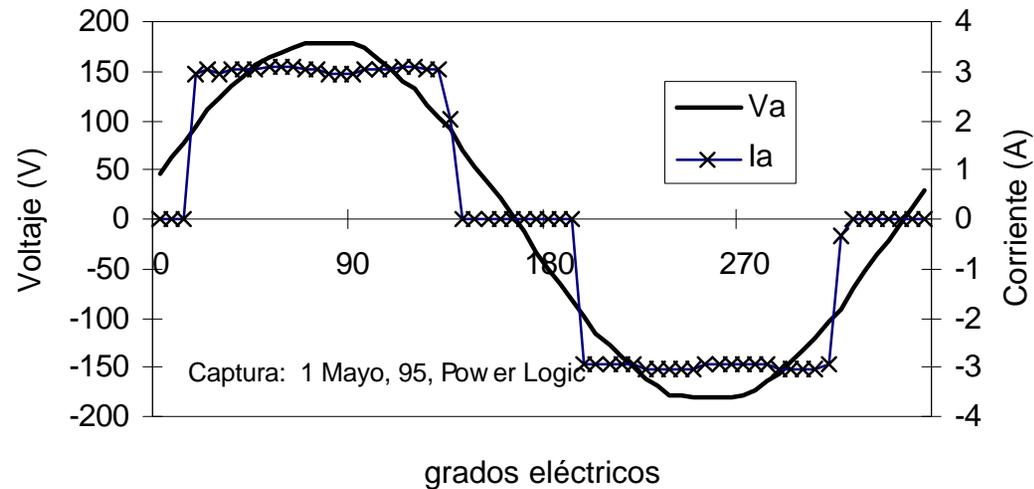
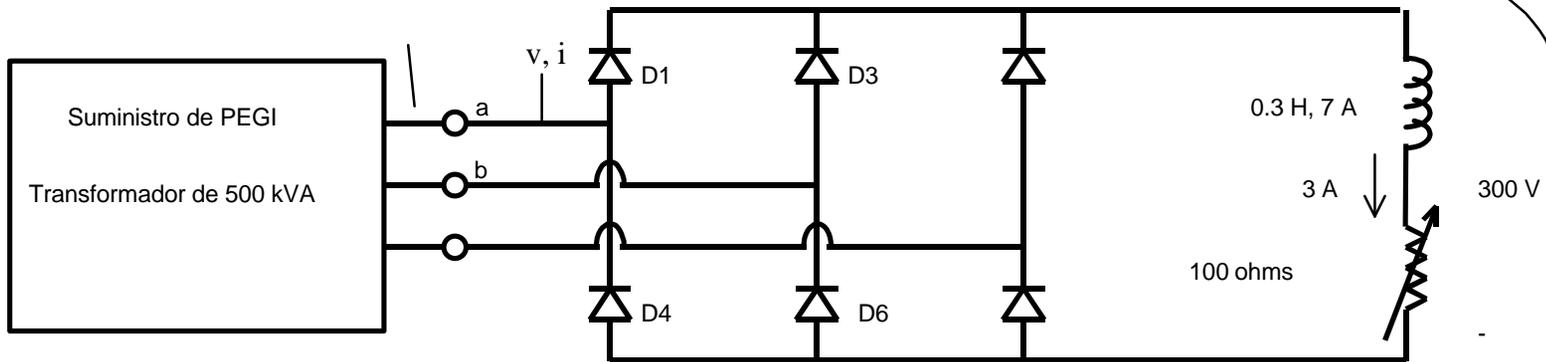
¿ Qué son cargas no lineales ? - Parte 2



Implementación en laboratorio de rectificador con circuito capacitivo



Implementación en laboratorio de rectificador con circuito inductivo

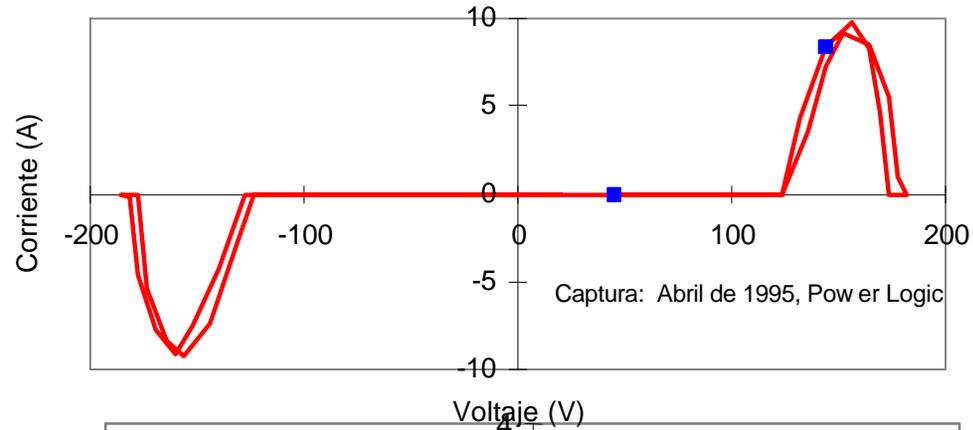


¿ Qué son cargas no lineales ? - Parte 2

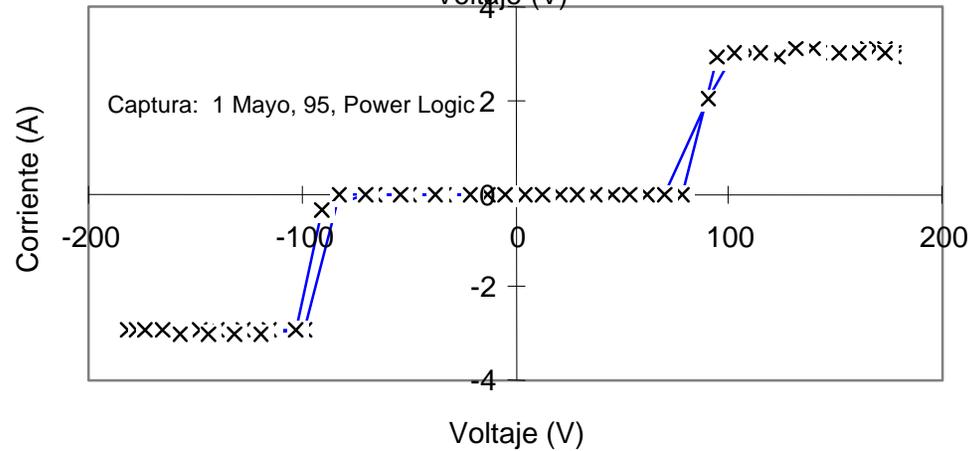


Corriente contra voltaje

Circuito capacitivo



Circuito inductivo



¿ Qué son cargas no lineales ? - Parte 2



Factor de Potencia Total o Verdadero

$$fp = \frac{\text{Potencia Promedio}}{\text{Potencia Aparente}} = \frac{P, (W)}{V I, (VA)}$$

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cdot i(t) \cdot dt}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [v(t)]^2 \cdot dt} \times \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [i(t)]^2 \cdot dt}}$$

libro esmeralda página 31



Factor de Potencia de Desplazamiento

- Factor de potencia de desplazamiento:
 - » es la componente de desplazamiento del factor de potencia
 - » es la relación de la potencia activa de la onda fundamental, (W), a la potencia aparente de la onda fundamental, (VA)

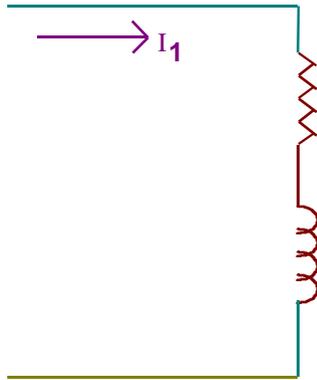
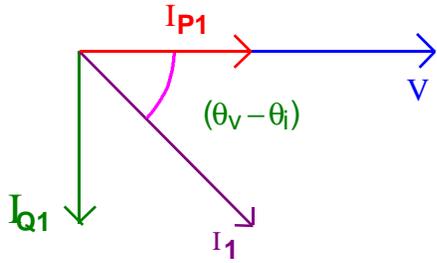
$$fp_{disp} = \frac{V_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1})}{V_1 \cdot I_1}$$

$$fp_{disp} = \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1})$$

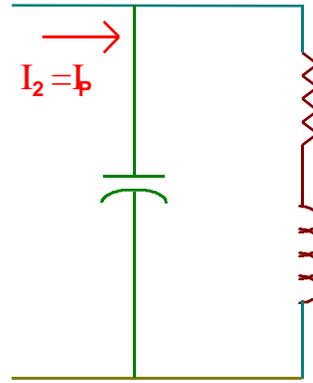
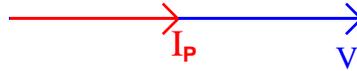
libro esmeralda página 31



fp atrasado

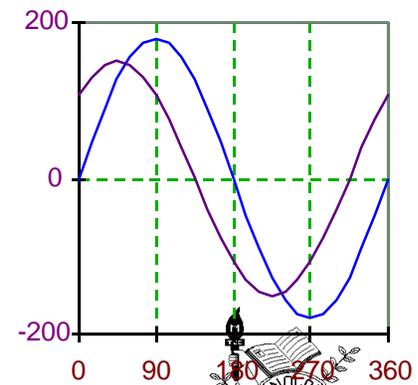
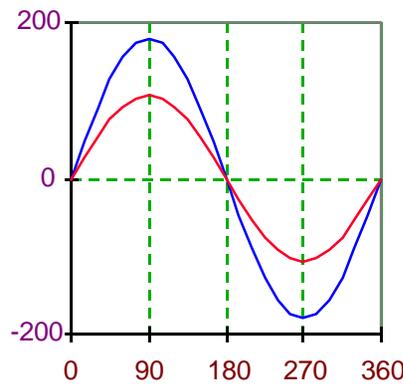
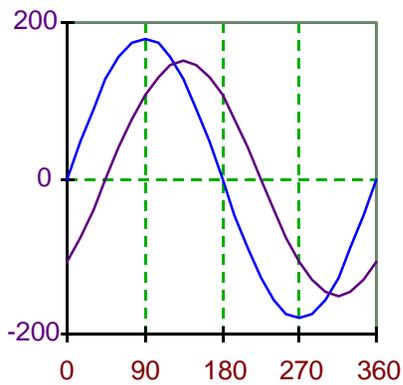
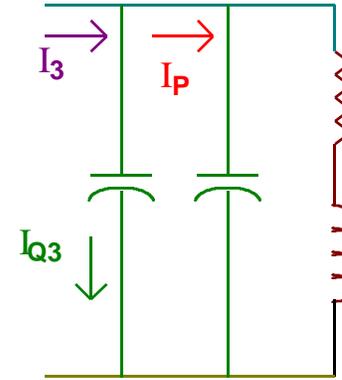
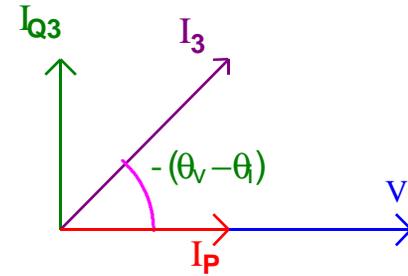


fp unitario



I V

fp adelantado



Departamento de Ingeniería Eléctrica

Desplazamiento



Factor de Potencia de Distorsión

$$fp = \frac{\text{Potencia Promedio}}{\text{Potencia Aparente}} = \frac{P, (W)}{VI, (VA)}$$

$$fp = fp_{\text{disp}} \times fp_{\text{dist}}$$

$$fp_{\text{dist}} = \frac{fp}{fp_{\text{disp}}} = \frac{P}{VI \cdot \cos(\theta_{v1} - \theta_{i1})}$$



Con voltaje senoidal

$$fp_{\text{dist}} = \frac{P}{VI \cdot \cos(\theta_v - \theta_{i1})} = \frac{VI_1 \cdot \cos(\theta_v - \theta_{i1})}{VI \cdot \cos(\theta_v - \theta_{i1})} = \frac{I_1}{I} = \frac{I_1}{I_1 \cdot \sqrt{1 + \text{THD}_i^2}}$$

fp de distorsión

$$fp_{\text{dist}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THD}_i^2}}$$

potencia reactiva
de desplazamiento

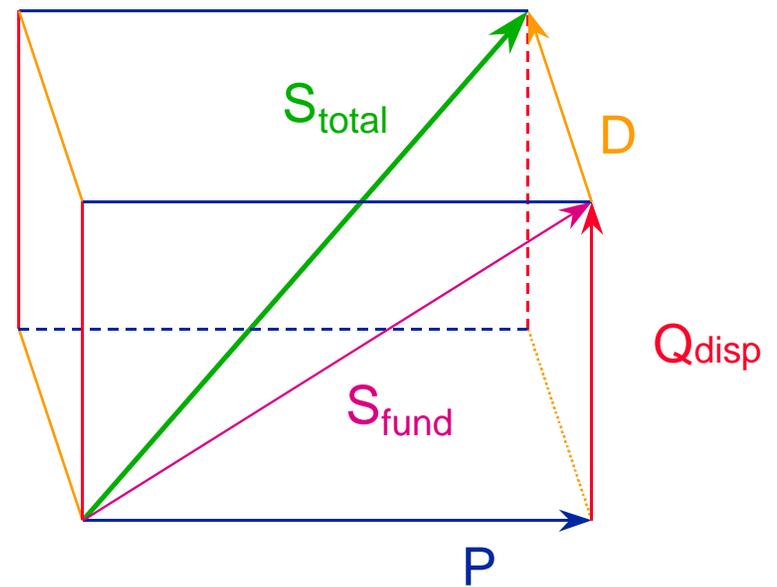
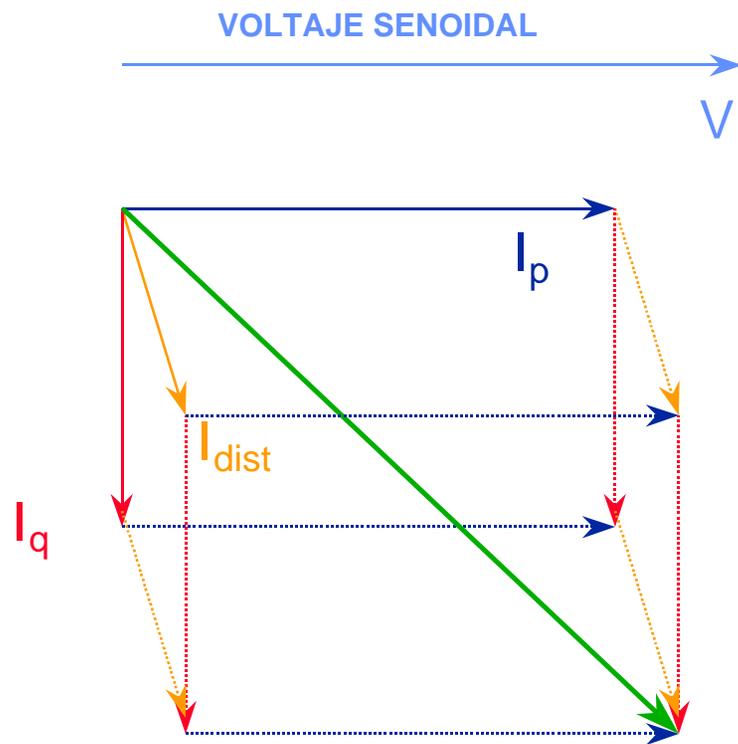
$$Q_{\text{disp}} = VI_1 \cdot \sin(\theta_v - \theta_{i1})$$

potencia de distorsión

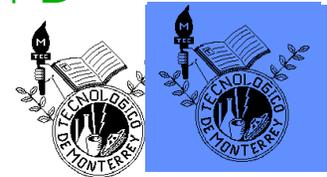
$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_{\text{disp}}^2}$$



Potencia de distorsión

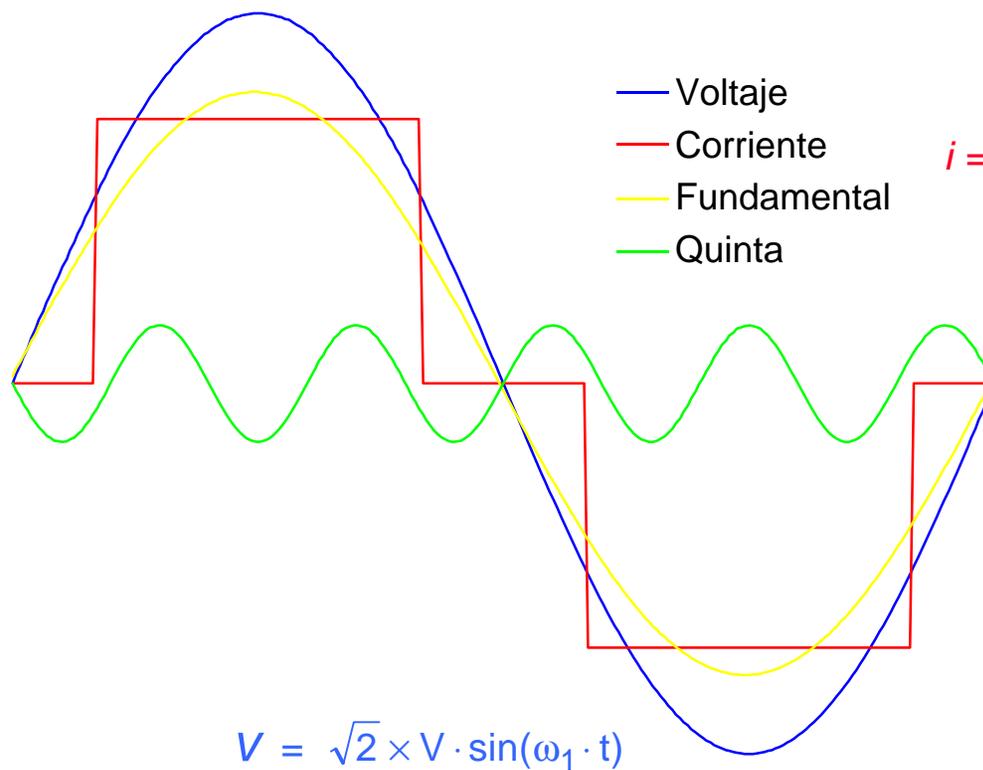


$$S^2 = P^2 + Q_{disp}^2 + D^2$$





Corriente con distorsión, sin desplazamiento



$$i = \sqrt{2} \times \{I_1\} \times \left[\begin{array}{l} \sin(\omega_1 \cdot t) - \frac{1}{5} \sin(\omega_5 \cdot t) \\ -\frac{1}{7} \sin(\omega_7 \cdot t) + \frac{1}{11} \sin(\omega_{11} \cdot t) \\ + \frac{1}{13} \sin(\omega_{13} \cdot t) + \dots \end{array} \right]$$

$$fp_{\text{disp}} = \cos(\theta_v - \theta_{i1}) = 1$$

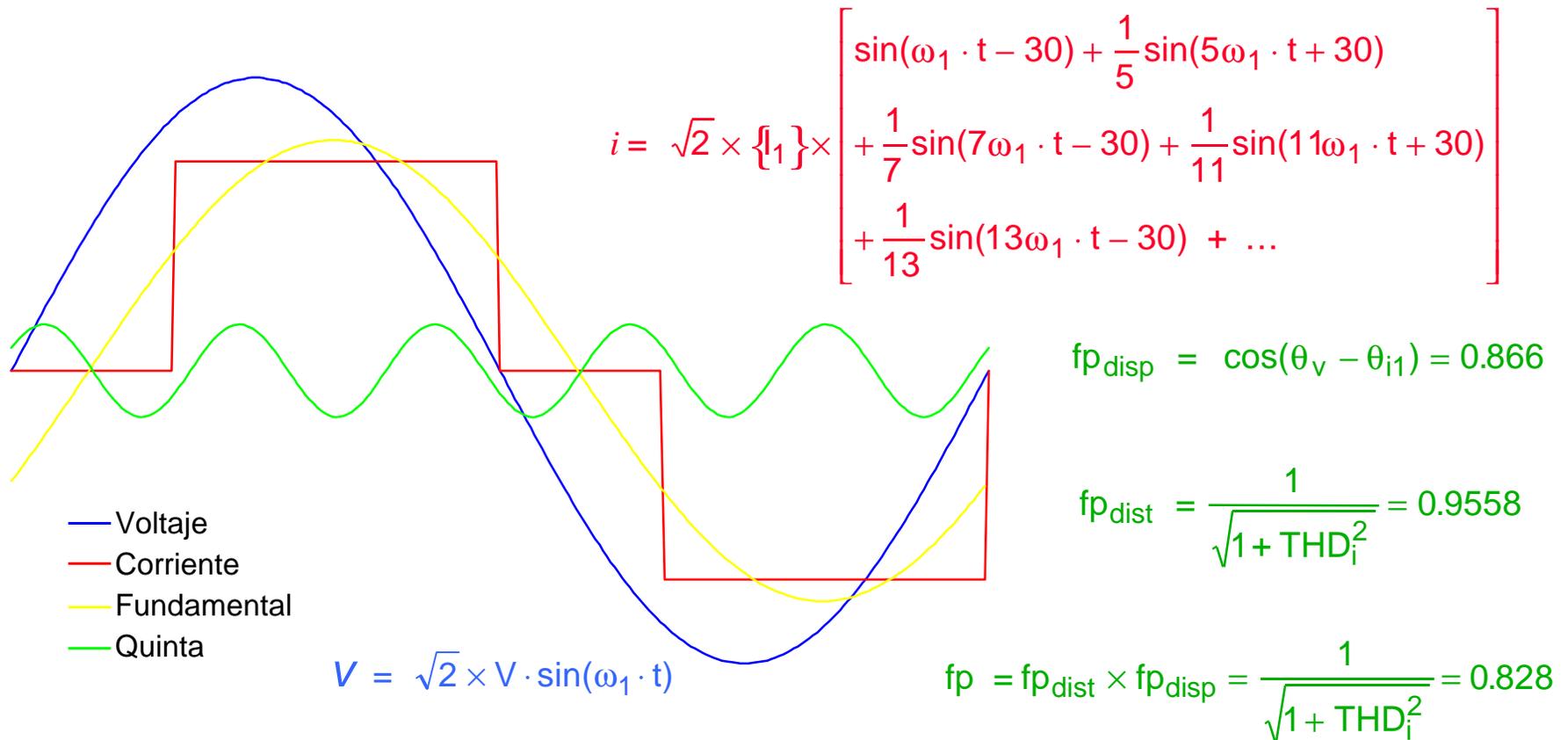
$$fp_{\text{dist}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THD}_i^2}} = 0.9558$$

$$fp = fp_{\text{dist}} \times fp_{\text{disp}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THD}_i^2}}$$





Corriente con distorsión y desplazamiento



$$Q_{disp} = V_1 \times I_1 \times \sin(\theta_v - \theta_{i1})$$

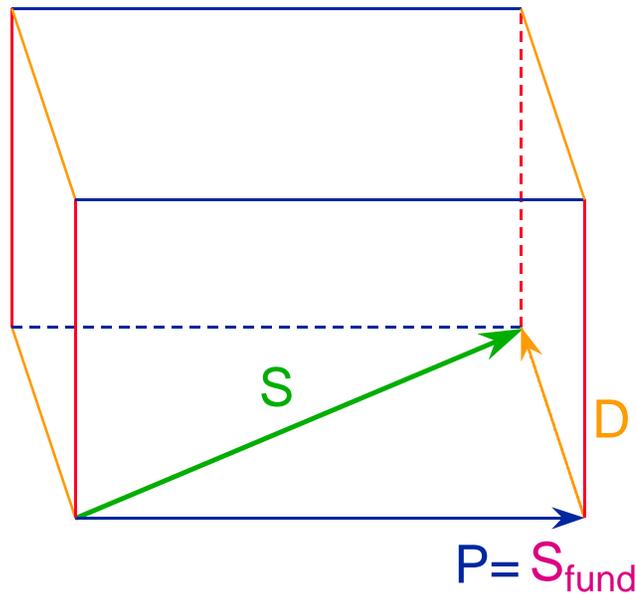
Departamento de Ingeniería Eléctrica

$$S = V \cdot I_1 \sqrt{1 + THD_i^2}; \quad P = V \cdot I_1; \quad D = V \cdot I_1 \cdot THD_i$$



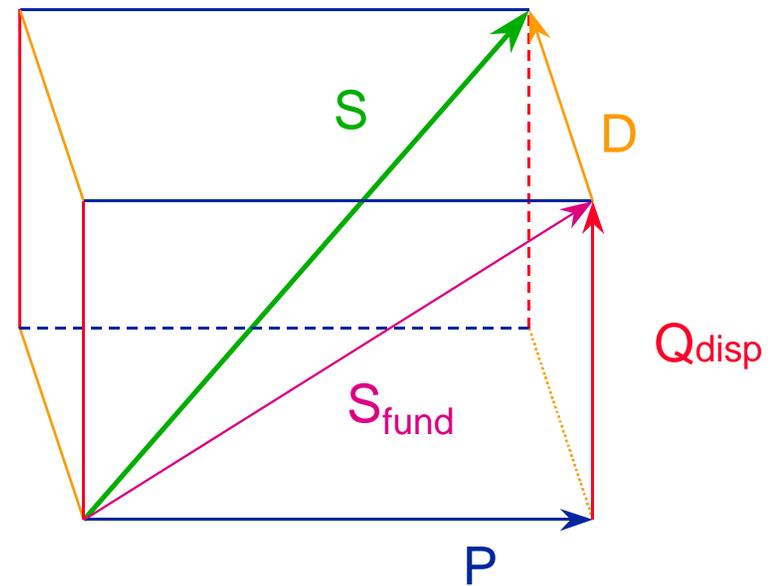
Carga con Distorsión

Sin desplazamiento



$Q_{disp} = 0$

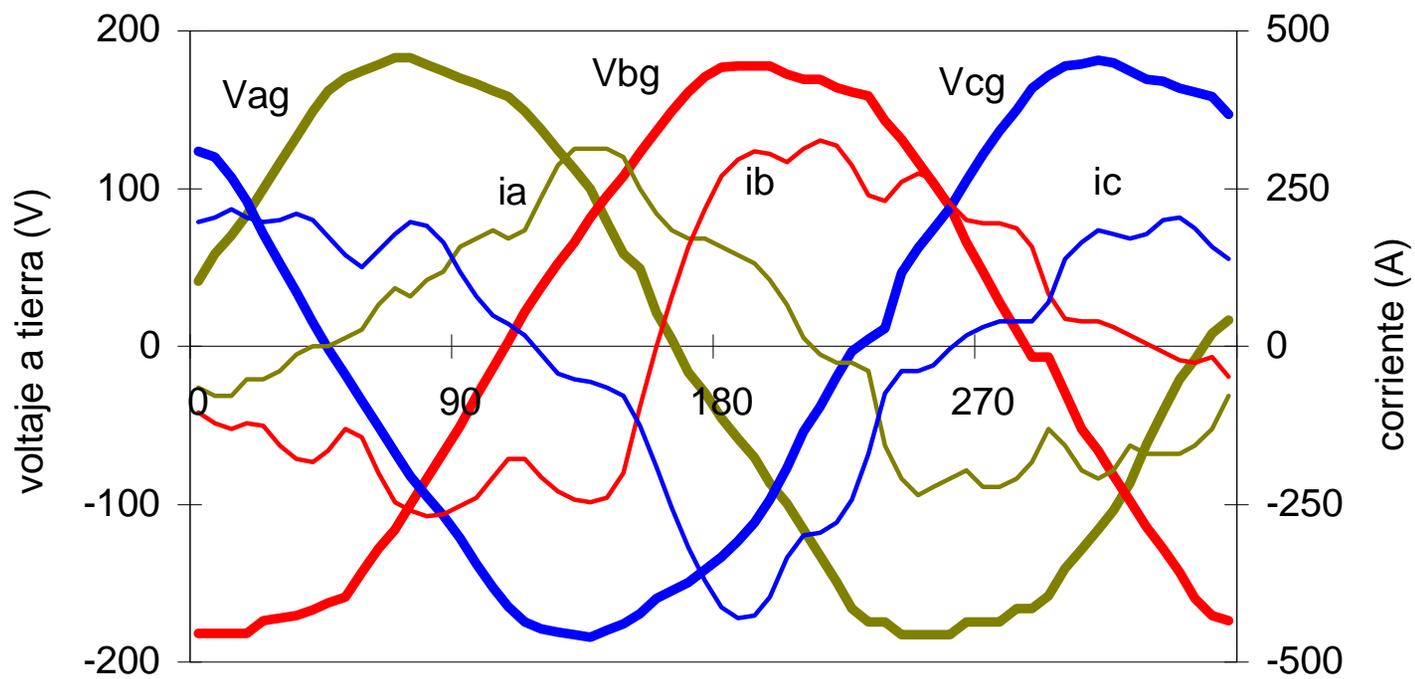
Con desplazamiento



$$S^2 = P^2 + Q_{disp}^2 + D^2$$

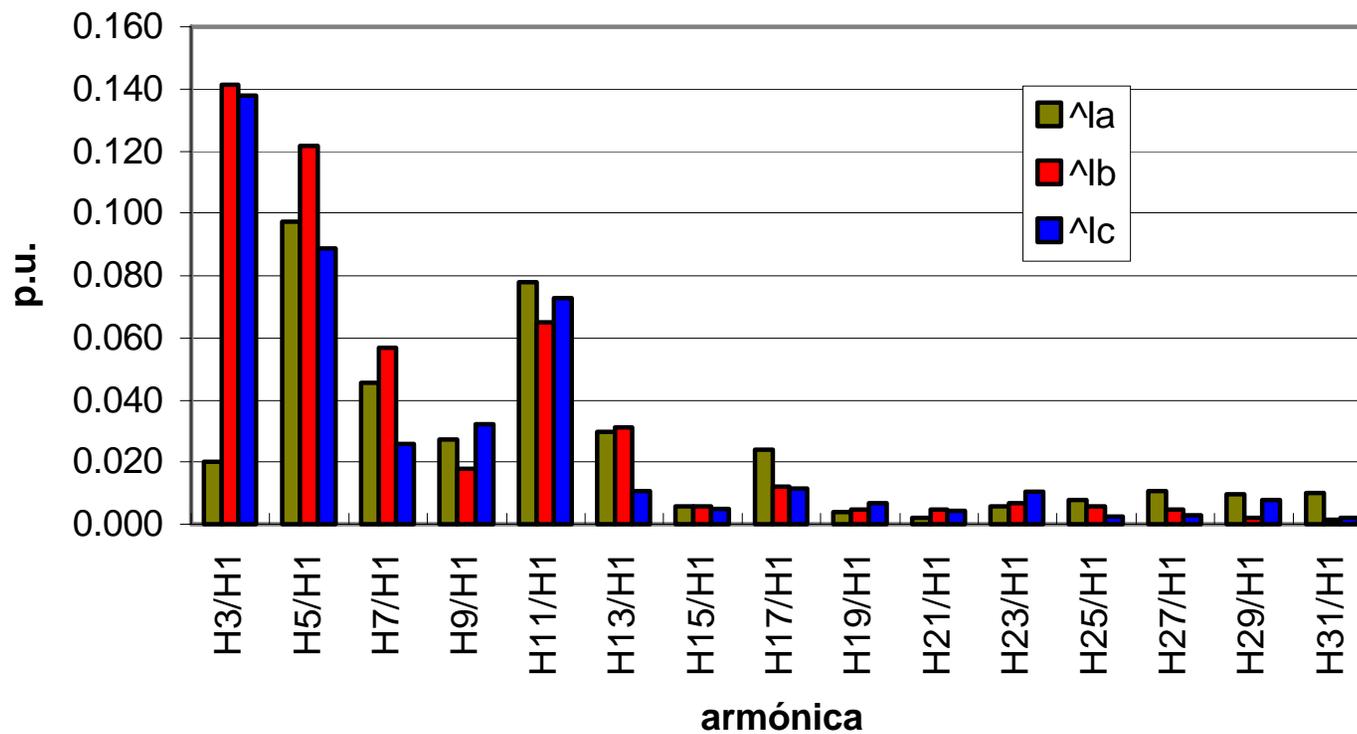


Formas de onda de voltajes a tierra y corrientes de línea en un UPS dañado

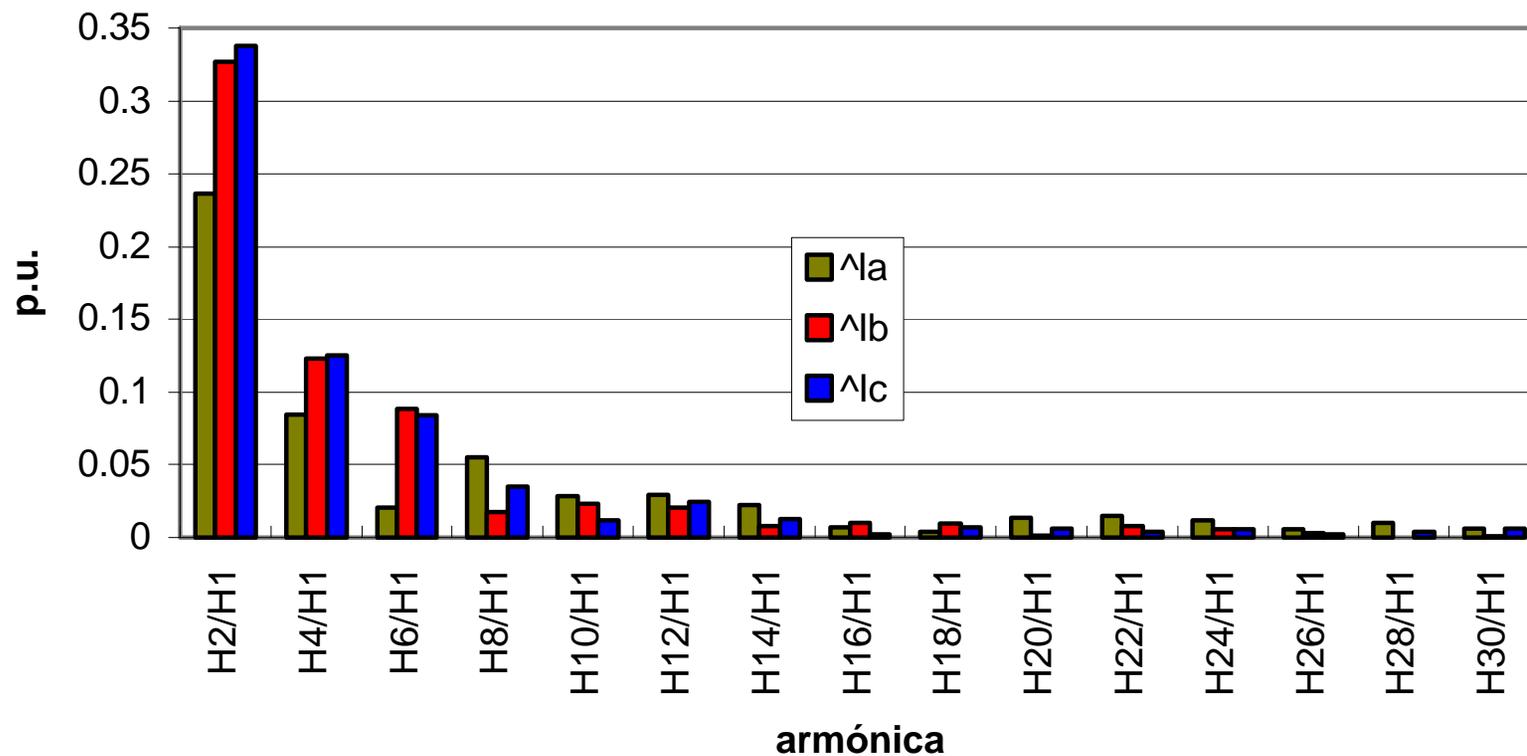


Captura: Power Logic CM250, 18 AGO 94, ALL

Espectro normalizado de las corrientes armónicas impares

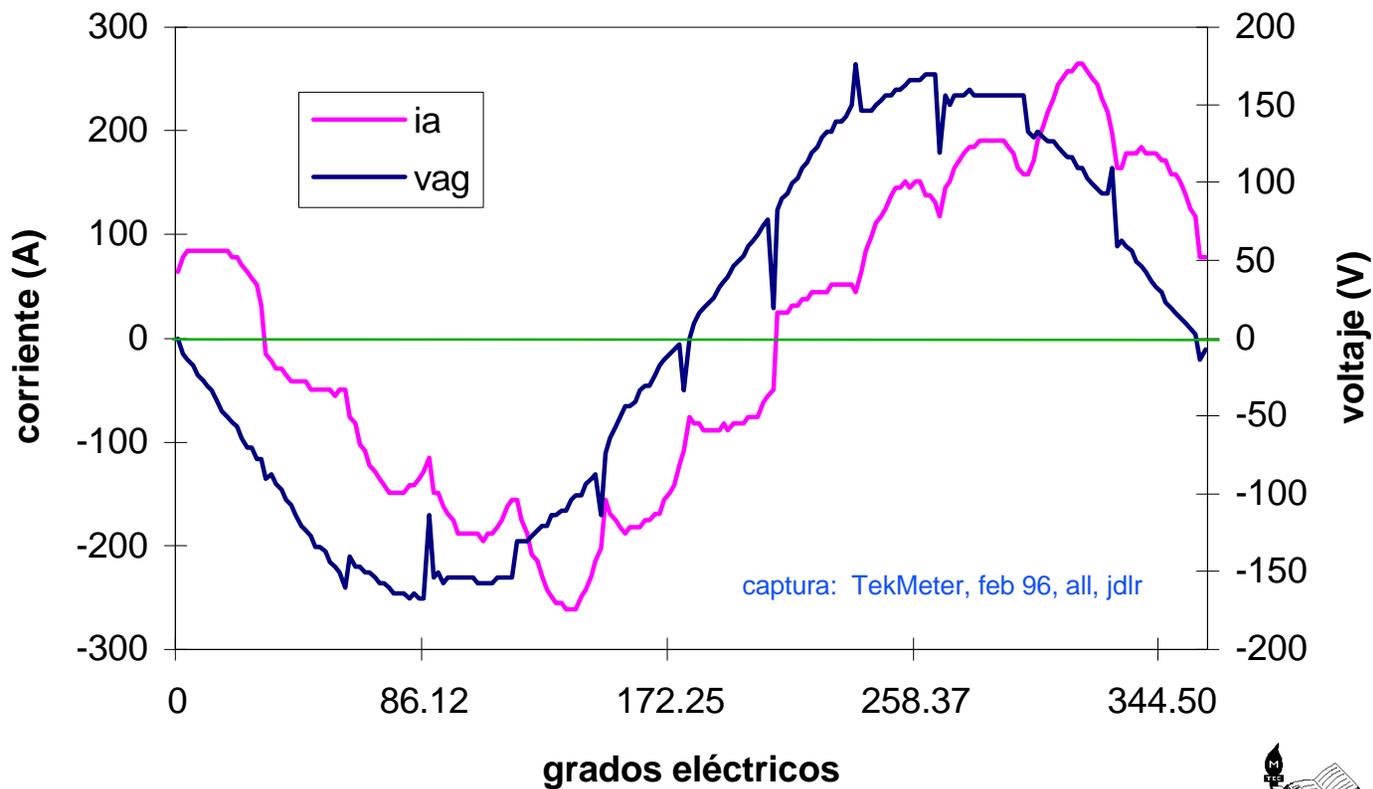


Espectro normalizado de las corrientes armónicas pares



Formas de onda de voltaje a tierra y corriente de línea en UPS después de cambiar los cuatro SCRs de una fase

UPS 250 kVA



Fuentes de Armónicas

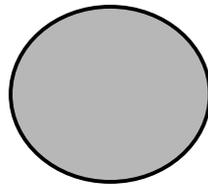
- Saturación de transformadores
- Corrientes de energización de transformadores
- Conexiones al neutro de transformadores
- Fuerzas magnetomotrices en máquinas rotatorias de corriente alterna
- Hornos de arco eléctrico
- Lámparas fluorescentes
- Fuentes reguladas por conmutación
- Cargadores de baterías
- Compensadores estáticos de VAR's
- Variadores de frecuencia para motores ("drives")
- Convertidores de estado sólido



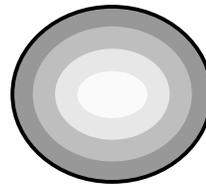
Efecto de las armónicas en Cables y Conductores

- Aumento en las pérdidas I^2R por efecto piel, $R_{ac} > R_{dc}$ por el aumento de la corriente en la periferia del conductor

(a) Corriente directa



(b) Corriente alterna de alta frecuencia



 Densidad mínima
 Densidad máxima

- Ejemplo de la variación del efecto piel en conductores

Tamaño del conductor	Resistencia AC / Resistencia DC	
	60 Hz	300 Hz
300 MCM	1.01	1.21
450 MCM	1.02	1.35
600 MCM	1.03	1.50
750 MCM	1.04	1.60

Efecto de las armónicas en Transformadores

- Aumento en sus pérdidas:
 1. Pérdidas I^2R (efecto Joule)
 2. Pérdidas por corrientes de eddy

$$P_e = P_{e,R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h^2$$

I_h = corriente de la armónica h , en amperes

I_R = corriente nominal, en amperes

$P_{e,R}$ = pérdidas de eddy a corriente y frecuencia nominal

3. Pérdidas adicionales

$$P_{ex} = P_{ex,R} \sum_{h=1}^{h=h_{\max}} \left[\frac{I_h}{I_R} \right]^2 h$$

$P_{e,R}$ = pérdidas adicionales a corriente y frecuencia nominal

Efecto de las armónicas en Transformadores

- En conexiones delta-estrella que alimenten cargas no lineales monofásicas se puede tener:
 - a. Sobrecalentamiento del neutro por la circulación de armónicas “triplen”
 - b. Sobrecalentamiento del devanado conectado en delta
- En caso de que alimenten cargas no lineales que presenten componente de corriente directa es posible:
 - a. Aumento ligero en las pérdidas de núcleo o sin carga
 - b. Aumento en el nivel de sonido audible
 - c. Incremento sustancial en la corriente de magnetización
- Para los transformadores que alimenten a cargas no lineales se recomienda:
 - a. Disminuir su capacidad nominal
 - b. Utilizar transformadores con factor K



Transformadores con factor K

- Diferencias entre transformadores convencionales y transformadores con factor K:
 - a. El tamaño del conductor primario se incrementa para soportar las corrientes armónicas “triplen” circulantes. Por la misma razón se dobla el conductor neutro.
 - b. Se diseña el núcleo magnético con una menor densidad de flujo normal, utilizando acero de mayor grado, y
 - c. Utilizando conductores secundarios aislados de menor calibre, devanados en paralelo y transpuestos para reducir el calentamiento por el efecto piel.
- Transformadores con factor K disponibles comercialmente

K- 4
K- 9
K- 13
K- 20
K- 30
K- 40

Efecto de las armónicas en los motores

- **Calentamiento excesivo por el aumento en todas sus pérdidas**
 - a. **Pérdidas I^2R en el estator:** por el aumento de la corriente de magnetización y por el efecto piel
 - b. **Pérdidas I^2R en el rotor:** por el aumento en la resistencia efectiva del rotor por el efecto piel
 - c. **Pérdidas de núcleo:** aumentan relativamente poco debido al aumento en las densidades de flujo pico alcanzadas
 - d. **Pérdidas adicionales:** aumentan, pero son extremadamente complejas de cuantificar y varían con cada máquina
- **Dependiendo del voltaje aplicado puede haber una reducción en el par promedio de la máquina**
- **Se producen torques pulsantes por la interacción de las corrientes del rotor con los campos magnéticos en el entrehierro**
- **Menor eficiencia y reducción de la vida de la máquina**

Efecto de las armónicas en otros equipos

- **Barras de neutros**

Calentamiento por la circulación de corrientes de secuencia cero (armónicas “triplen”)

- **Interruptores**

Los fusibles e interruptores termomagnéticos protegen en forma efectiva contra sobrecargas por corrientes armónicas. Su capacidad interruptiva no se ve afectada por armónicas

- **Bancos de capacitores**

Se pueden tener problemas de resonancia serie o paralelo al instalar bancos de capacitores en presencia de armónicas, lo que ocasiona la operación de dispositivos de protección y el daño o envejecimiento prematuro de los bancos

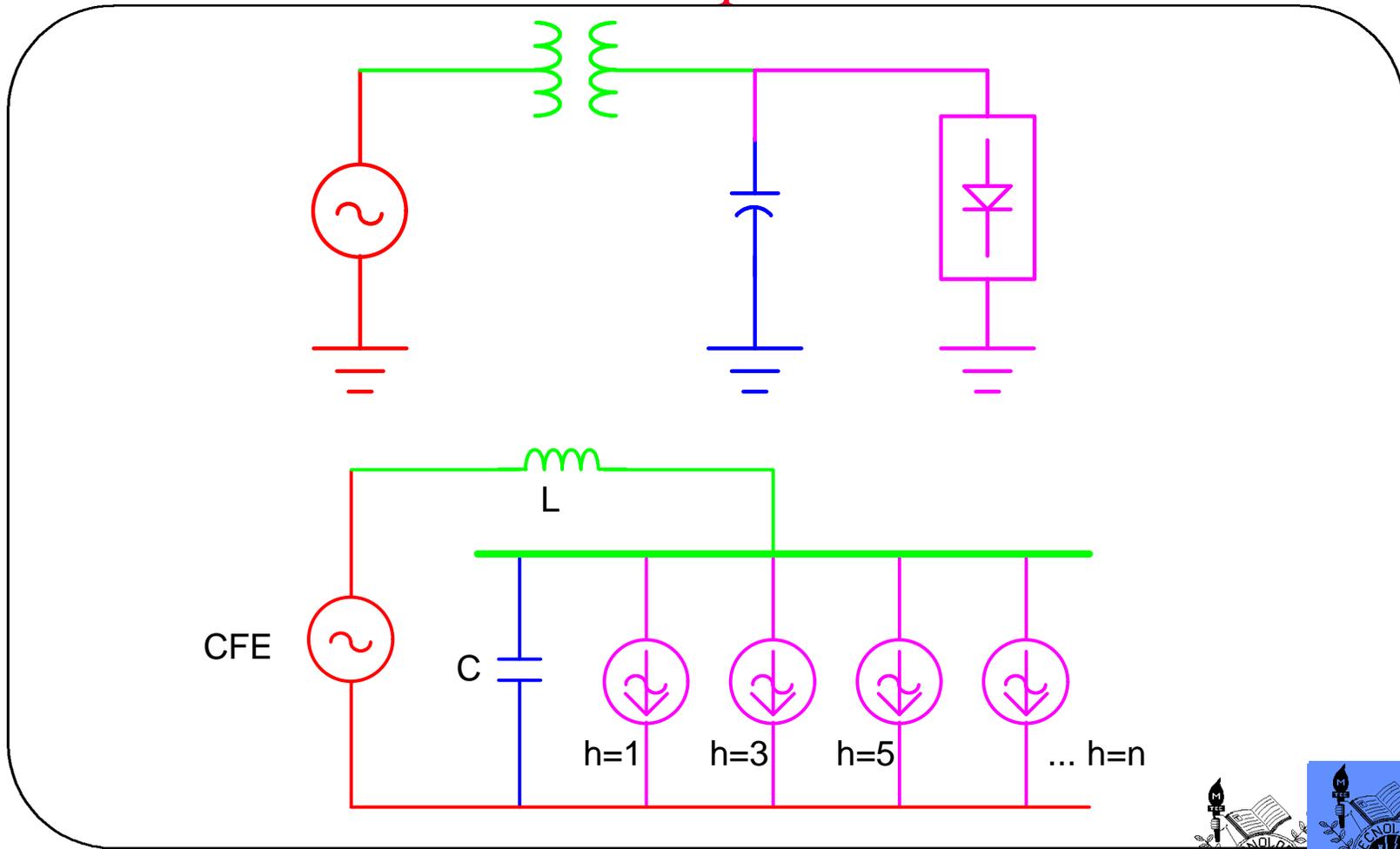
- **Equipos electrónicos sensitivos**

Las armónicas pueden afectar la operación en estos equipos

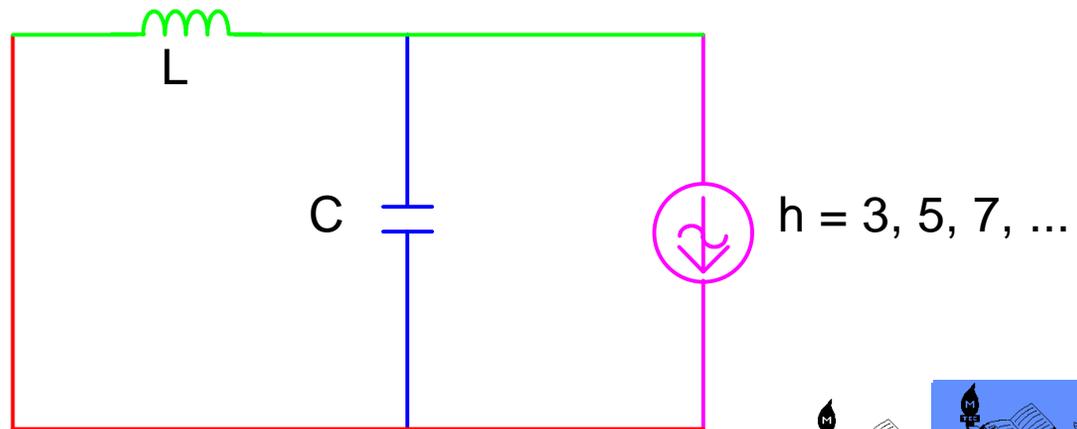
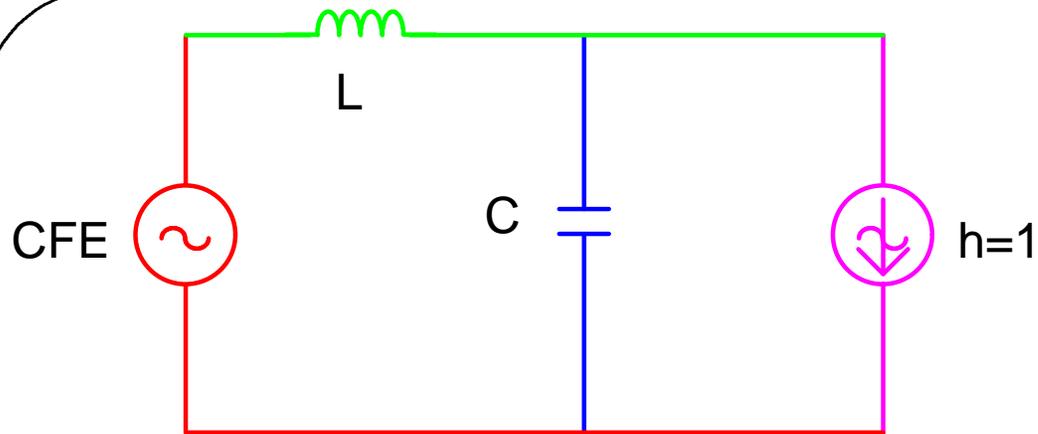
- **Valores erróneos en los equipos de medición**



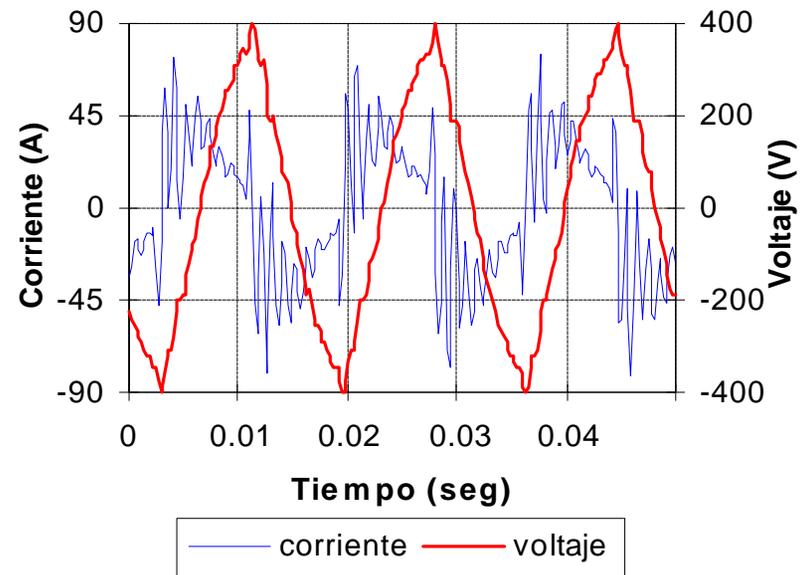
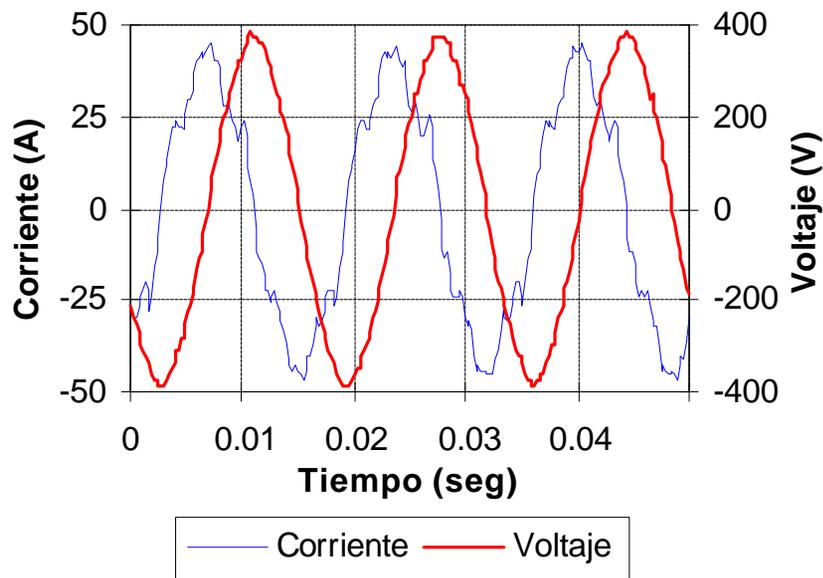
Diagrama Unifilar de un Sistema de Potencia que alimenta a una Carga no Lineal y su Circuito Eléctrico Equivalente



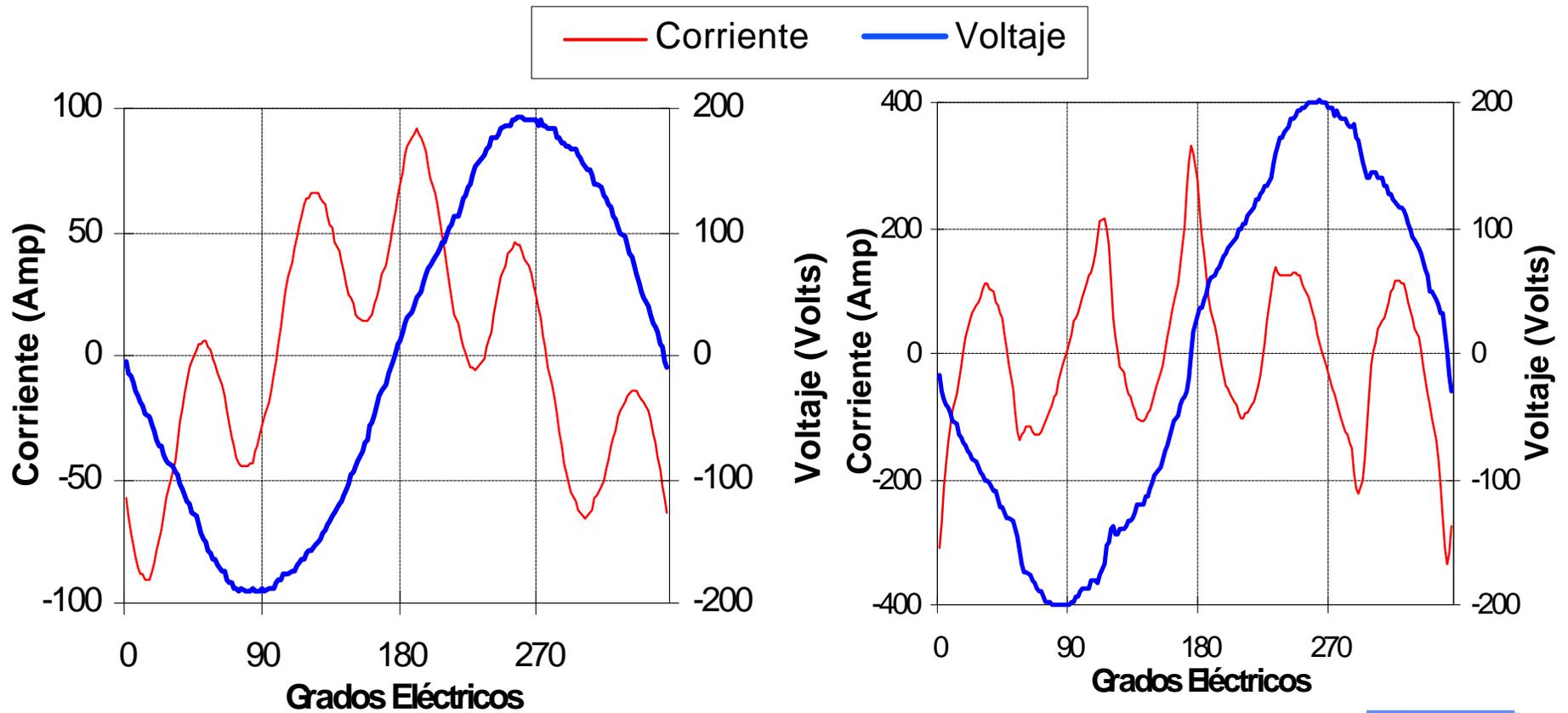
Circuitos Eléctricos Equivalentes para la primera armónica y otras armónicas



Corriente y Voltaje en los Capacitores con y sin carga no lineal



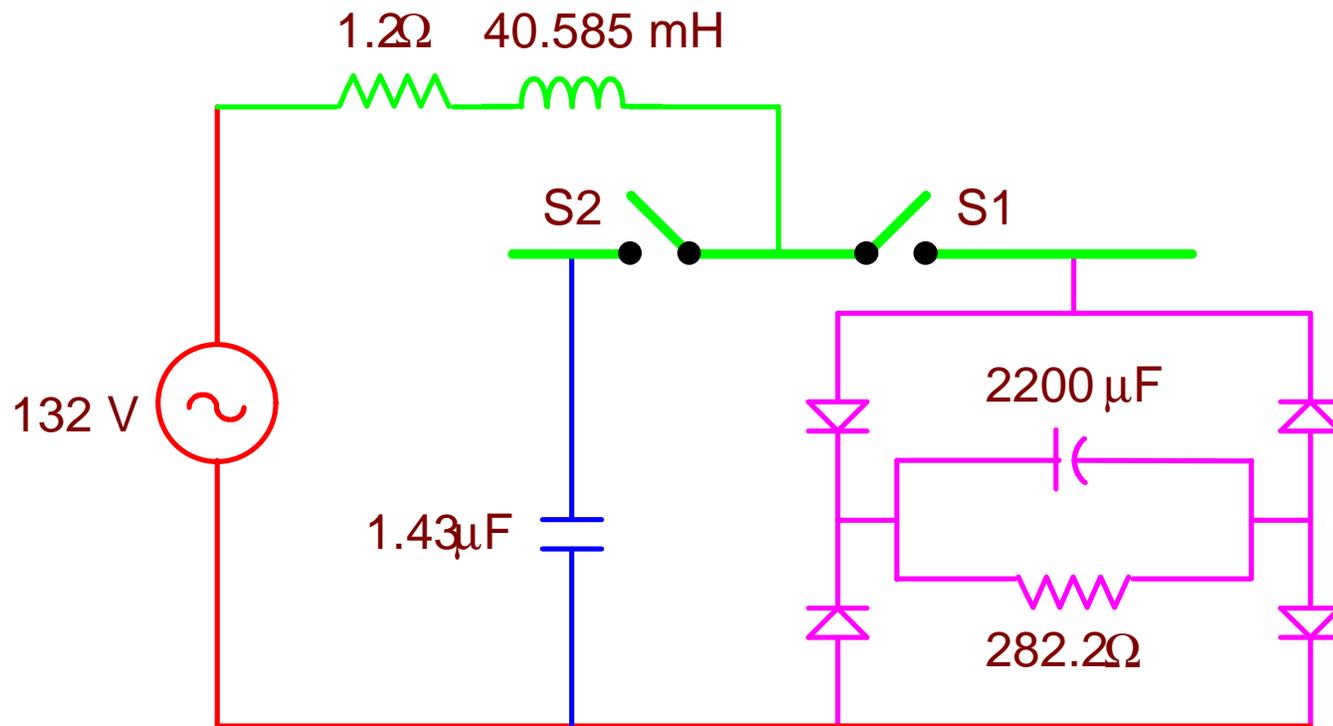
Corriente y Voltaje en un filtro bien y mal sintonizado



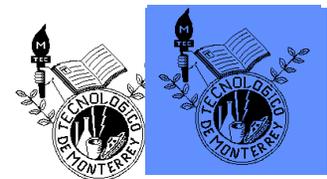
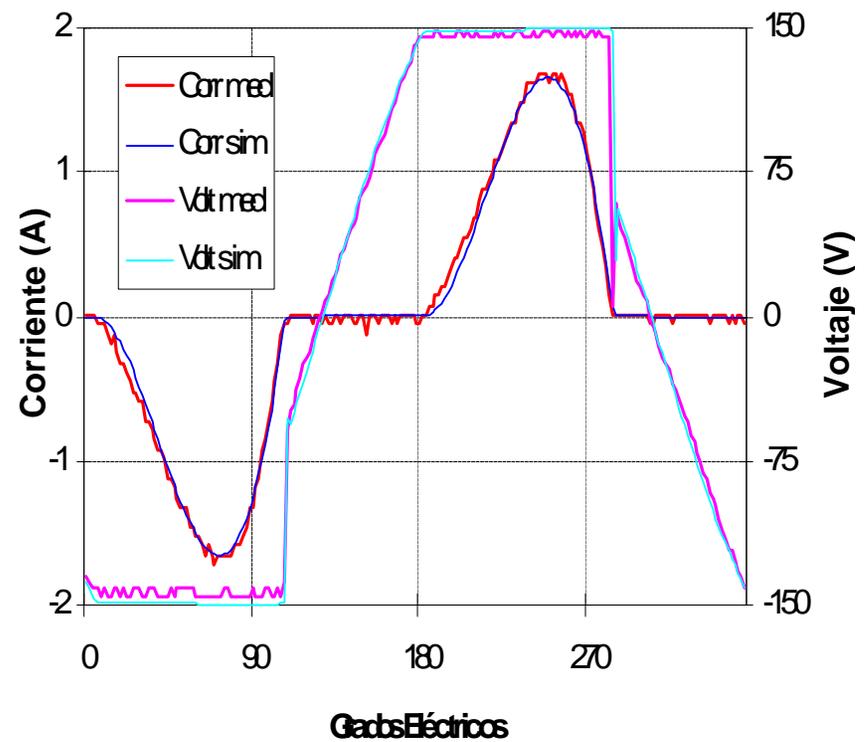
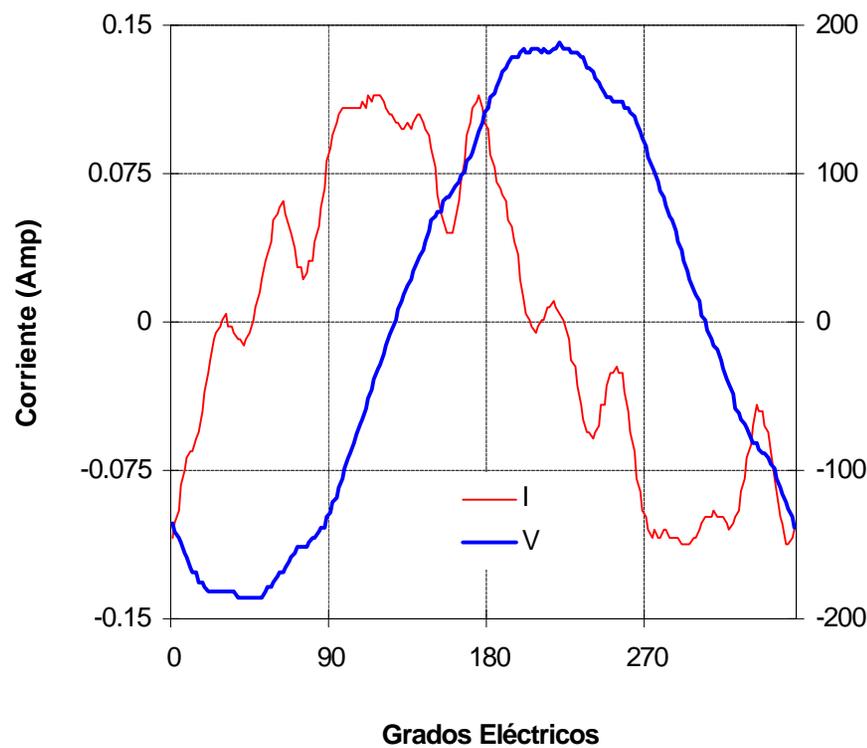
Departamento de Ingeniería Eléctrica



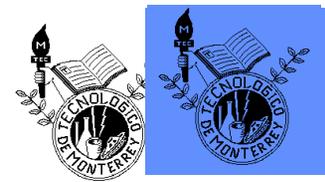
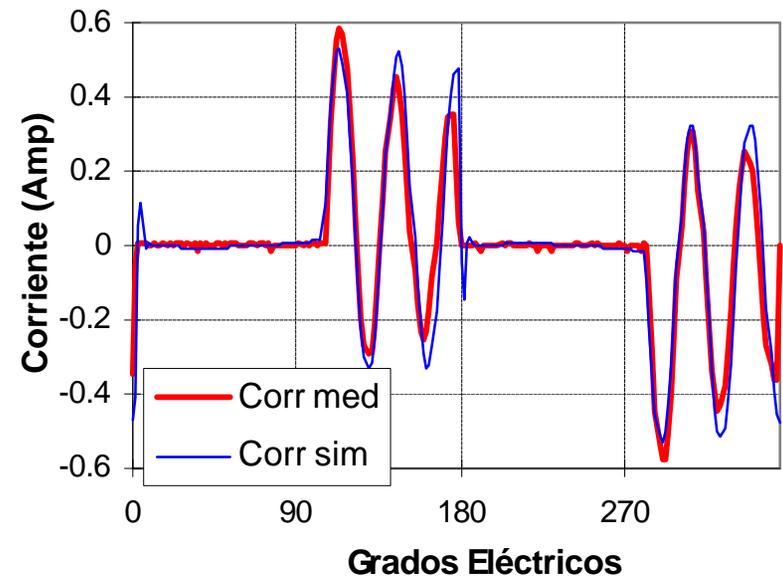
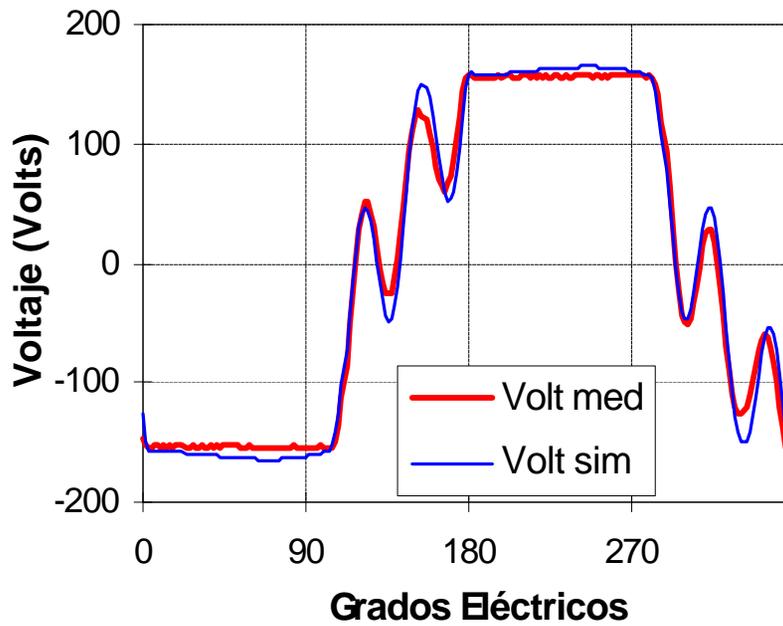
Circuito Monofásico que presenta Resonancia en la Armónica 11



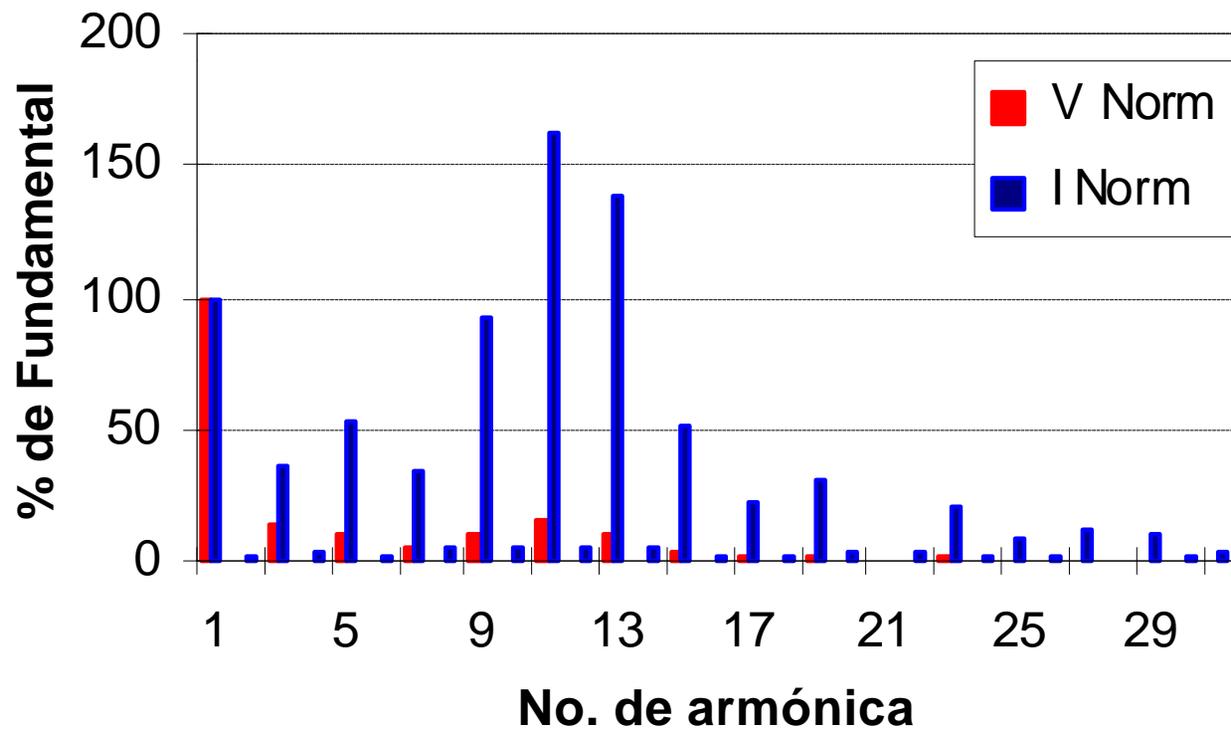
Voltaje y Corriente con S2 cerrado y S1 abierto y S2 abierto y S1 cerrado



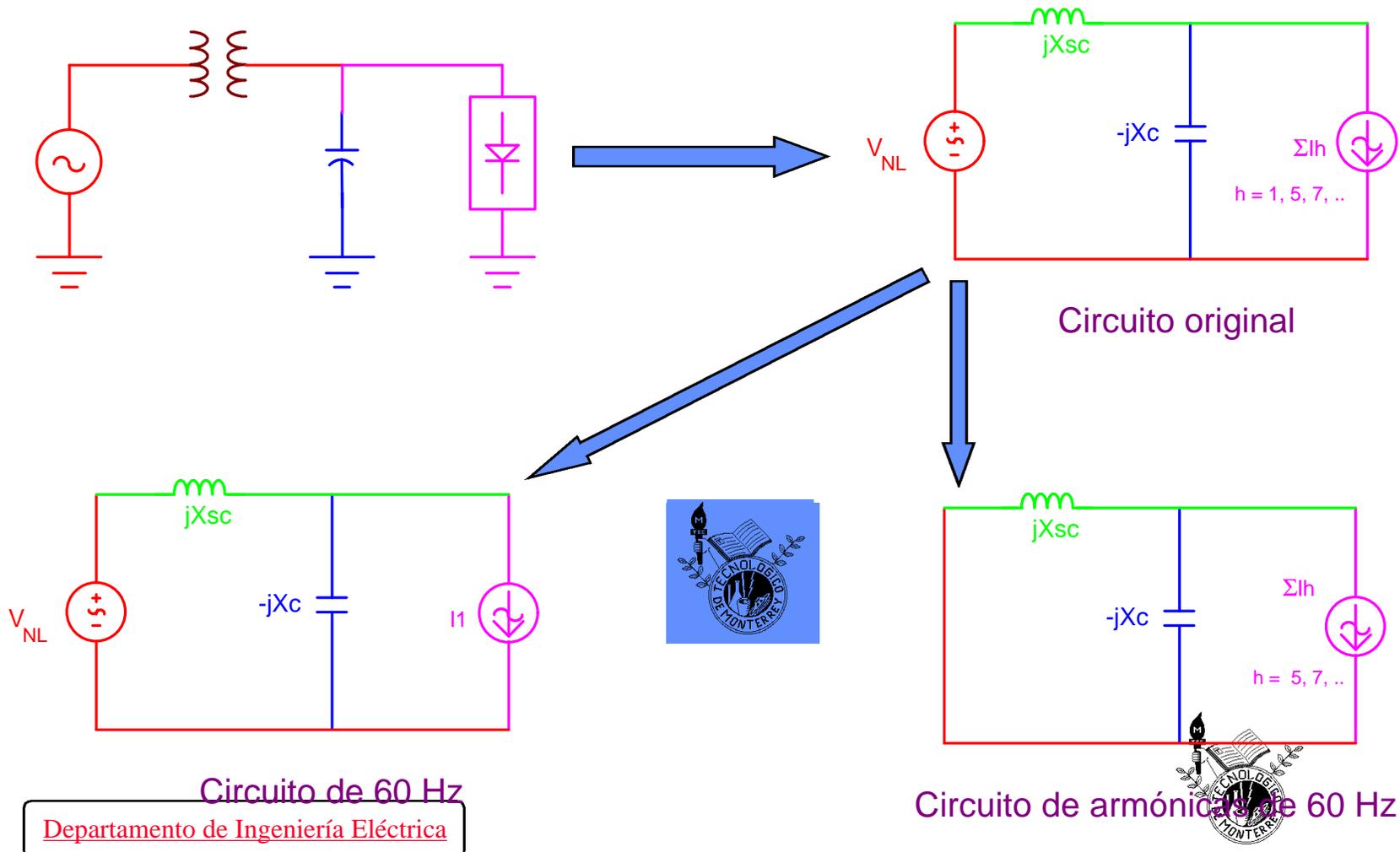
Voltaje y Corriente en el Capacitor cuando se alimenta a la carga no lineal



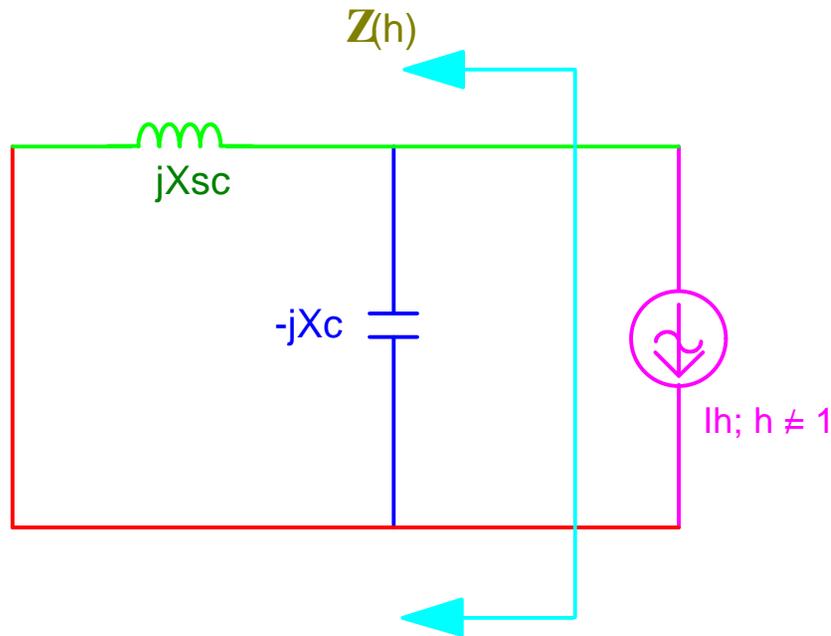
Espectro Normalizado del Voltaje y la Corriente en el Capacitor



Capacitores en Cargas con Distorsión



Circuito de armónicas de 60 Hz



$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_{sc} \cdot C}}$$

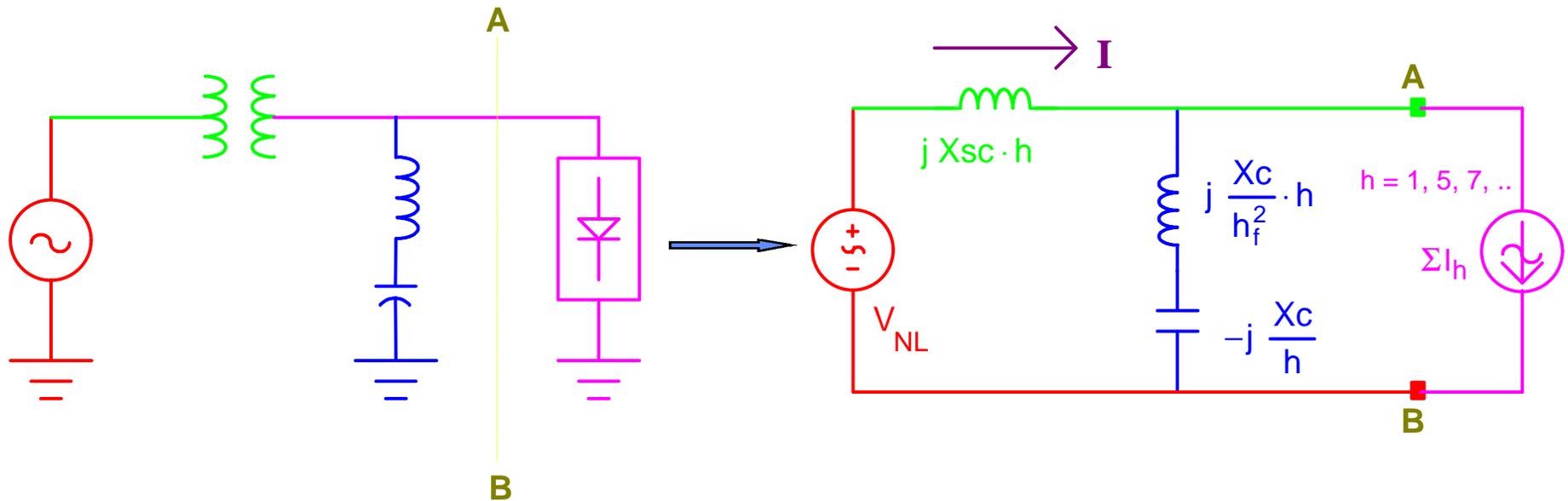
$$h_r = \sqrt{\frac{1}{(120\pi \cdot L_{sc})(120\pi \cdot C)}}$$

$$h_r = \sqrt{\frac{X_c}{X_{sc}}} = \sqrt{\frac{MVA_{sc}}{MVA_r}}$$

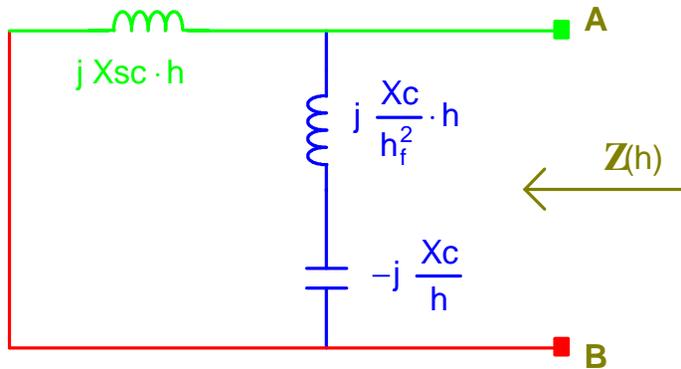
En resonancia: $\longrightarrow X_{sc} = X_c$



Filtros en Sistemas de Potencia



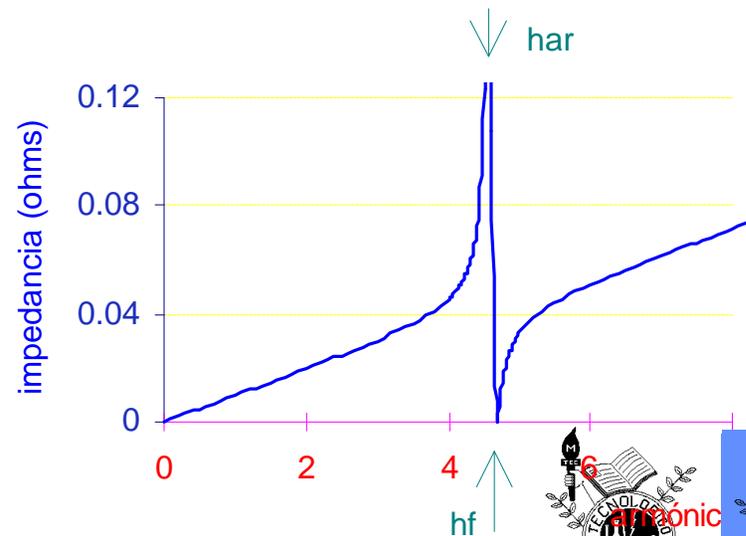
Filtros en Sistemas de Potencia



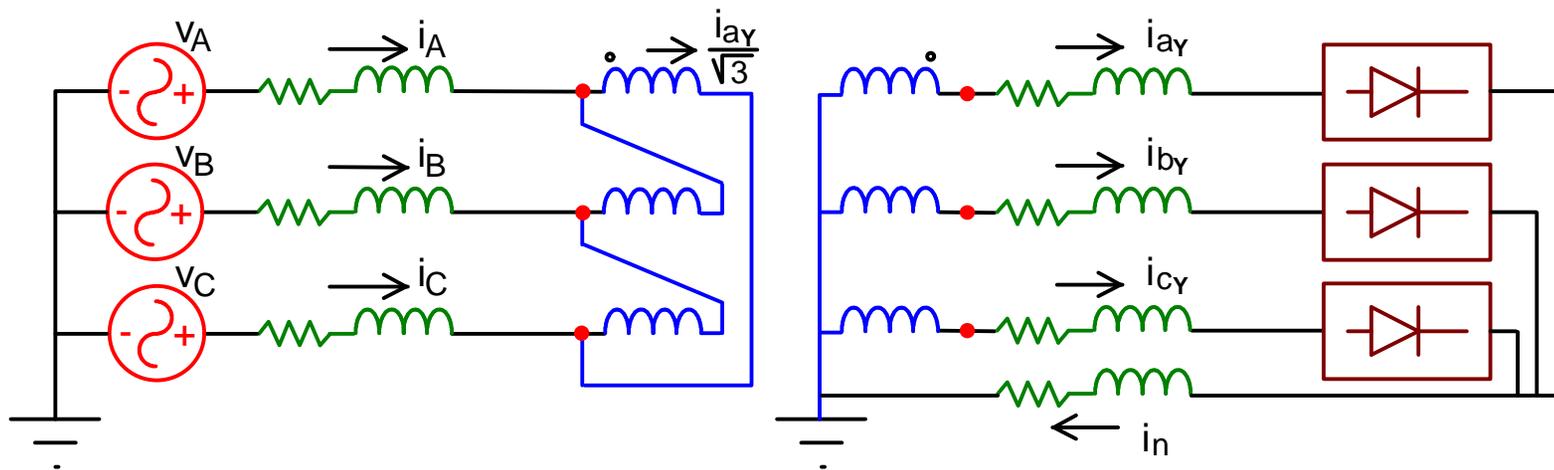
$$Z(h) = j \left(\frac{h \cdot X_{sc} \cdot X_c}{X_{sc} \cdot h_f^2 + X_c} \right) \cdot \left(\frac{h^2 - h_f^2}{h^2 - \frac{1}{\frac{X_{sc}}{X_c} + \frac{1}{h_f^2}}} \right)$$

$$h_{ar} = \sqrt{\frac{1}{\frac{MVA_r}{MVA_{sc}} + \frac{1}{h_f^2}}}$$

$$h_0 = h_f$$



Transformador Delta Estrella con Cargas No Lineales Monofásicas



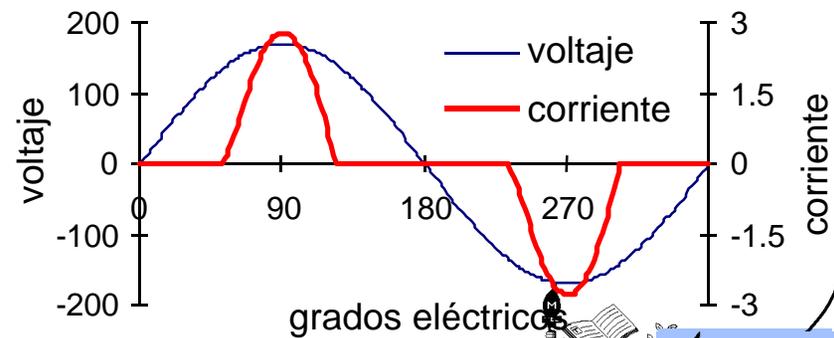
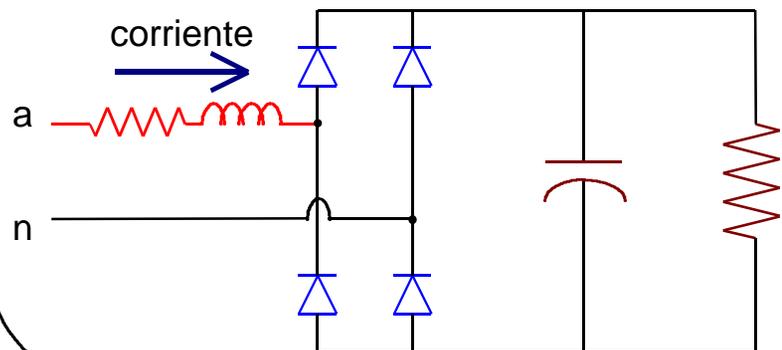
- Las cargas no lineales son iguales, por lo que el circuito es trifásico balanceado

Cargas No Lineales Monofásicas

Espectro típico de una fuente regulada por conmutación.

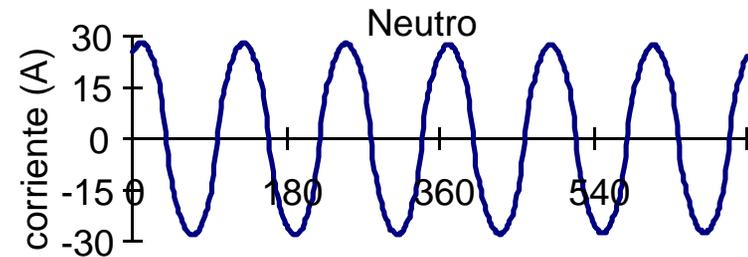
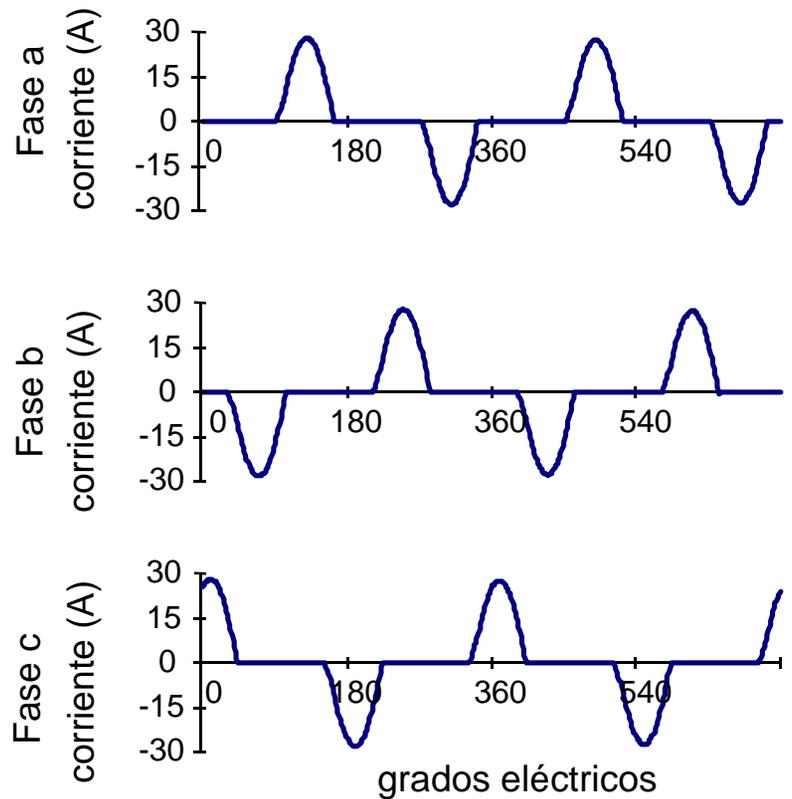
Armónica	Magnitud	Armónica	Magnitud
1	1.000	9	0.157
3	0.810	11	0.024
5	0.606	13	0.063
7	0.370	15	0.079

Circuito modelado en ATP para obtener un espectro similar



Resultados de la simulación en ATP

- Corrientes en cada fase en el lado de la carga y en el neutro común de retorno, para 2 ciclos de 60 Hz

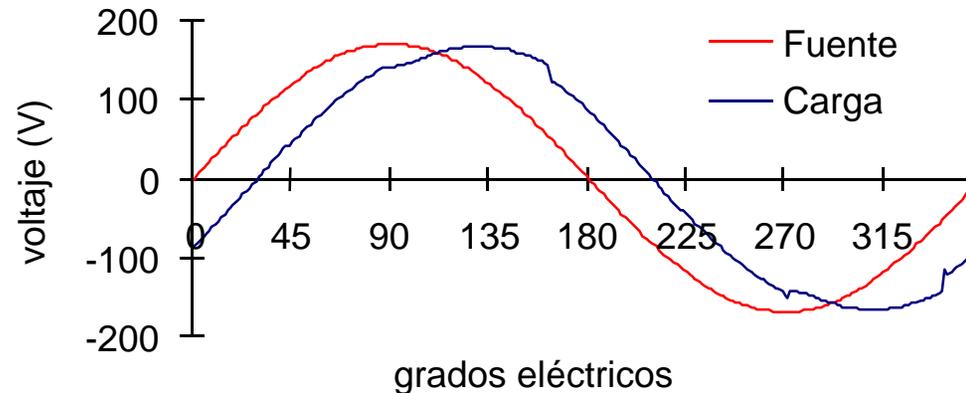


La corriente en el neutro es de una frecuencia de 180 Hz y en este caso su valor rms es 1.72 veces el valor rms de cualquiera de las fases

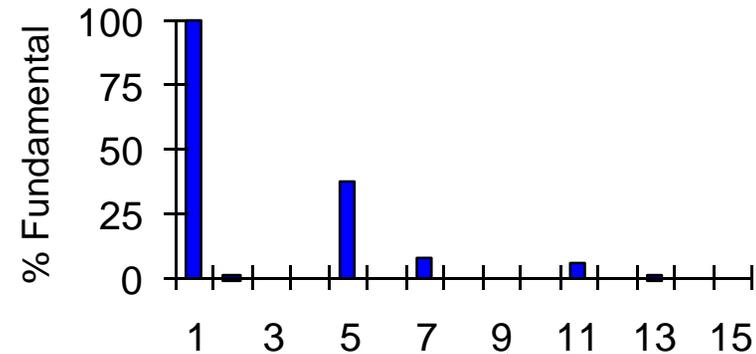
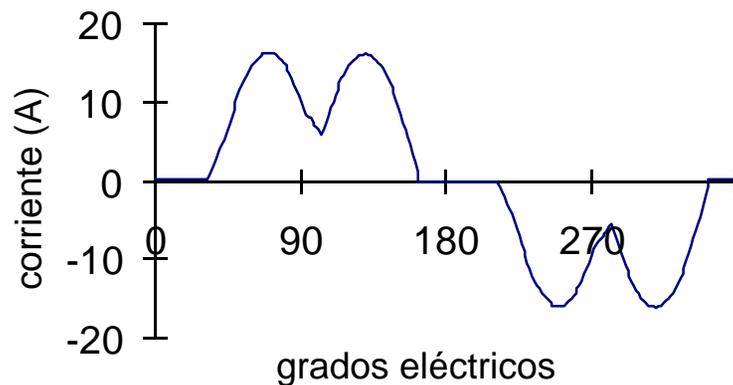


Resultados de la simulación en ATP

- Voltajes en la fuente y la carga



- Corriente en la fuente de alimentación junto con el espectro armónico



Resumen de los resultados de la simulación

a. Voltajes y corrientes

	Valor rms	Valor pico	Factor de Cresta	% de THD
V carga	119.70	166.85	1.39	4.93
V fuente	120.00	169.70	1.41	0.00
I carga	12.26	27.88	2.27	84.24
I fuente	10.09	16.33	1.62	38.95
I neutro	21.12	28.11	1.33	N. A.

b. Potencias

	Potencia real (W)	Potencia reactiva (VAr)	Potencia Aparente (VA)
Carga	3326.29	2883.61	4402.20
Fuente	3342.85	1418.50	3631.37

c. Factor de potencia

	Desplazamiento	Distorsión	Verdadero
Carga	0.989	0.764	0.756
Fuente	0.988	0.932	0.921

