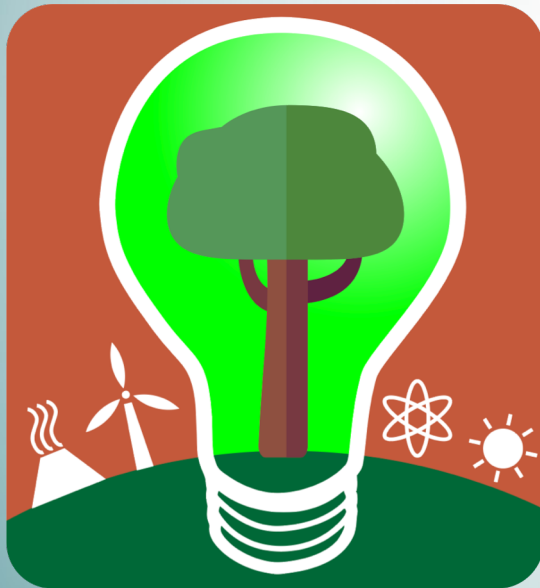


Transformación y Uso Eficiente de la Energía

BLOQUE II. ELECTRICIDAD

4. Armónicos en sistemas de potencia



Juan Carcedo Haya

Departamento de Ingeniería
Eléctrica y Energética

Este material se publica con licencia:

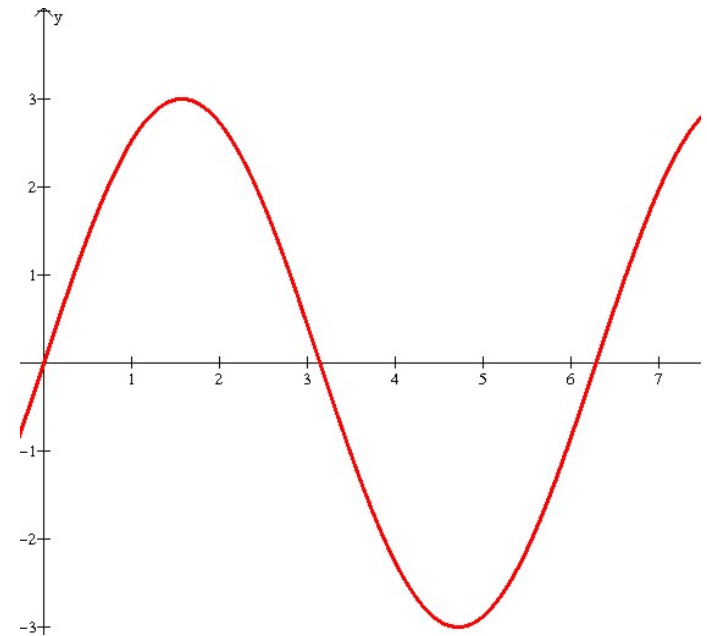
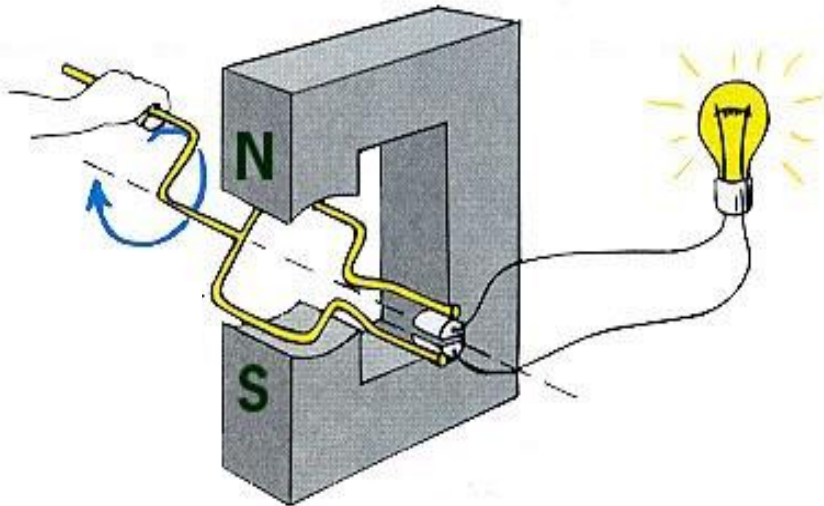
[Creative Commons BY-NC-SA 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)



GENERACIÓN Y UTILIZACIÓN DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA

La guerra de las corrientes «enfrentó» a Edison y Tesla a finales del siglo XIX.

https://es.wikipedia.org/wiki/Guerra_de_las_corrientes



Fuente: Mind42.com

RÉGIMEN PERMANENTE SINUSOIDAL

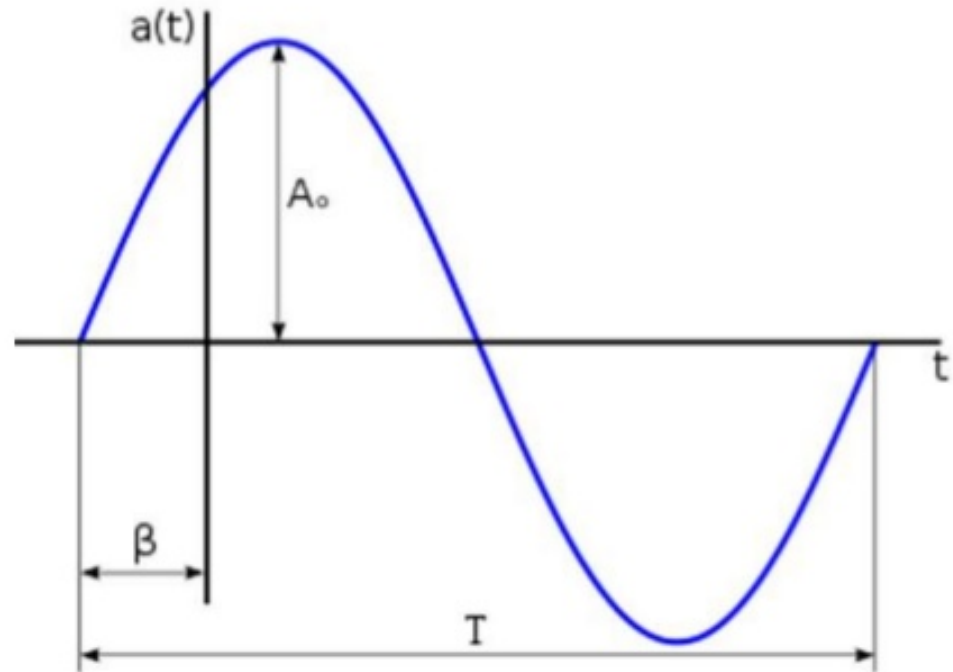
Caracterización de la onda senoidal. Magnitudes básicas.

- Amplitud (valor de pico)
- Frecuencia (periodo)
- Fase

$$a(t) = A_0 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \beta)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}$$

$$f = \frac{1}{T}$$



RÉGIMEN PERMANENTE SINUSOIDAL

Caracterización de la onda senoidal. Otras magnitudes.

- Valor medio: Es la media algebraica de los valores de una señal durante un periodo.

$$V_m = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T v(t) \cdot dt$$

RÉGIMEN PERMANENTE SINUSOIDAL

Caracterización de la onda senoidal. Otras magnitudes.

- Valor eficaz: Es la media cuadrática de los valores de una señal durante un periodo.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T [v(t)]^2 \cdot dt}$$

RÉGIMEN PERMANENTE SINUSOIDAL

Caracterización de la onda senoidal. Otras magnitudes.

- Aproximación del valor eficaz (instrumentación de valor medio)

$$V_{m, \frac{T}{2}} = \frac{2}{T} \cdot \int_0^{T/2} v(t) \cdot dt$$

- Factor de forma $FF = \frac{V_{rms}}{V_{m, \frac{T}{2}}}$

RÉGIMEN PERMANENTE SINUSOIDAL

Caracterización de la onda senoidal. Otras magnitudes.

- Factor de cresta

$$FC = \frac{V_{\max}}{V_{rms}}$$

EJEMPLO

Forma de onda de tensión: $v(t) = 325 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 50 \cdot t)$

Valor medio:

$$V_m = \frac{1}{0,02} \cdot \int_0^{0,02} 325 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{0,02} \cdot t\right) \cdot dt = -\frac{325}{0,02} \cdot \frac{0,02}{2\pi} \cdot \left[\cos \frac{2\pi \cdot 0,02}{0,02} - \cos \frac{2\pi \cdot 0}{0,02} \right] = 0$$

EJEMPLO

Forma de onda de tensión: $v(t) = 325 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 50 \cdot t)$

Valor eficaz:

$$\begin{aligned}
 V_{rms} &= \sqrt{\frac{1}{0,02} \cdot \int_0^{0,02} \left[325 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{0,02} \cdot t\right) \right]^2 \cdot dt =} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{0,02} \cdot 325^2 \cdot \int_0^{0,02} \frac{1}{2} \cdot \left(1 - \cos\left(2 \cdot \frac{2\pi}{0,02} \cdot t\right) \right) \cdot dt =} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{0,02} \cdot 325^2 \cdot \left(\int_0^{0,02} \frac{1}{2} \cdot dt - \int_0^{0,02} \frac{1}{2} \cdot \cos\left(2 \cdot \frac{2\pi}{0,02} \cdot t\right) dt \right) =}
 \end{aligned}$$

EJEMPLO

Forma de onda de tensión: $v(t) = 325 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 50 \cdot t)$

Valor eficaz:

$$= \sqrt{\frac{1}{0,02} \cdot 325^2 \cdot \left(\left[\frac{1}{2} \cdot (0,02 - 0) \right] - \frac{0,02}{8\pi} \cdot \left[\text{sen} \frac{4\pi}{0,02} \cdot 0,02 - 0 \right] \right)} =$$

$$= \sqrt{\frac{1}{0,02} \cdot 325^2 \cdot \frac{0,02}{2}} = \frac{325}{\sqrt{2}} = 230V$$

$$FC = \frac{V_{\max}}{V_{rms}} = \frac{V_{\max}}{V_{\max} / \sqrt{2}} = \sqrt{2}$$

EJEMPLO

Forma de onda de tensión: $v(t) = 325 \cdot \text{sen}(2\pi \cdot 50 \cdot t)$

Aproximación al valor eficaz (valor medio en medio periodo)

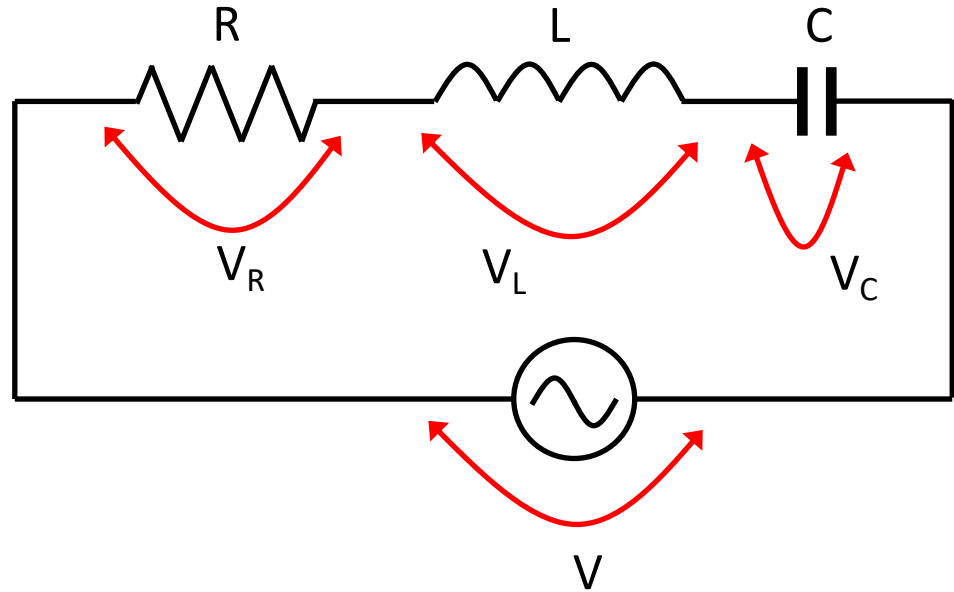
$$V_{m, \frac{T}{2}} = \frac{2}{0,02} \cdot \int_0^{0,01} 325 \cdot \text{sen}\left(\frac{2\pi}{0,02} \cdot t\right) \cdot dt = \frac{2 \cdot 325}{0,02} \cdot \frac{0,02}{2\pi} \left(\cos 0 - \cos \frac{2\pi \cdot 0,01}{0,02} \right) =$$

$$= \frac{2 \cdot 325}{0,02} \cdot \frac{0,02}{2\pi} (\cos 0 - \cos \pi) = \frac{2}{\pi} \cdot 325 = 206,9 V$$

$$FF = \frac{V_{rms}}{V_{m, \frac{T}{2}}} = \frac{\frac{325}{\sqrt{2}}}{\frac{2}{\pi} \cdot 325} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1,11$$

ELEMENTOS PASIVOS. IMPEDANCIA

$$\bar{Z} = R + j \cdot X$$



$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} \right)^2}$$

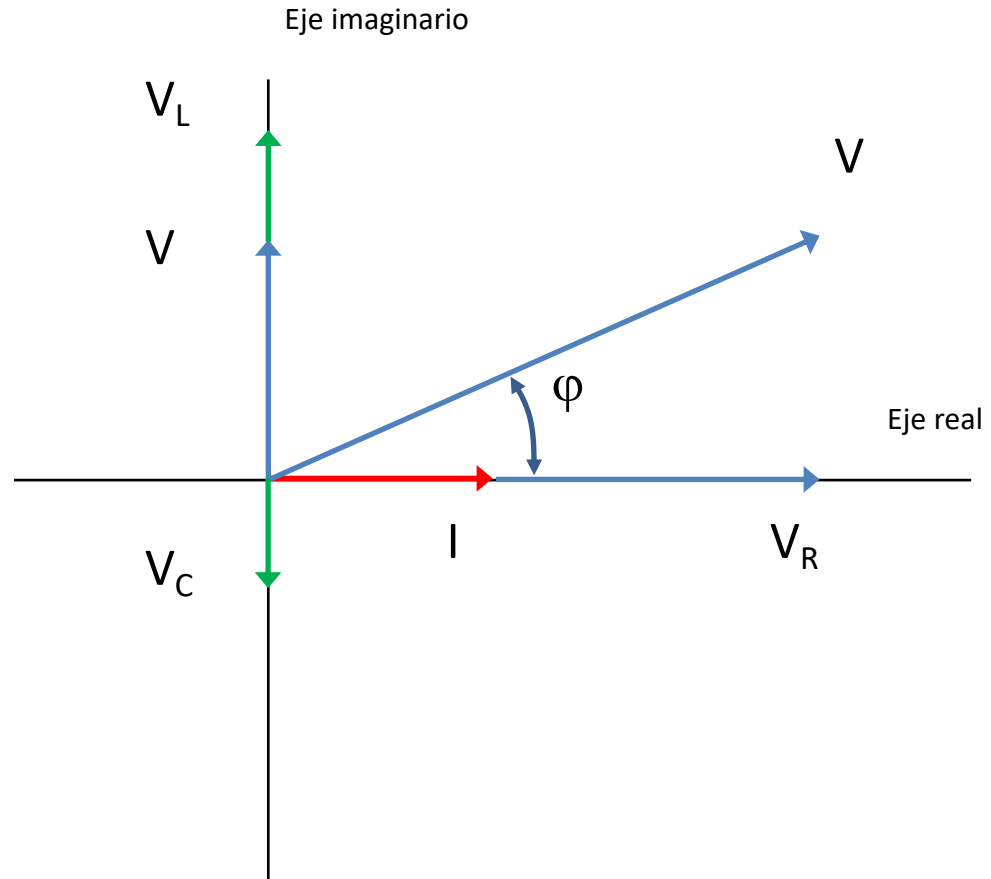
ELEMENTOS PASIVOS. IMPEDANCIA

Diagrama fasorial

R: En fase

L: Adelanta $\frac{1}{4}$ de T

C: Retrasa $\frac{1}{4}$ de T



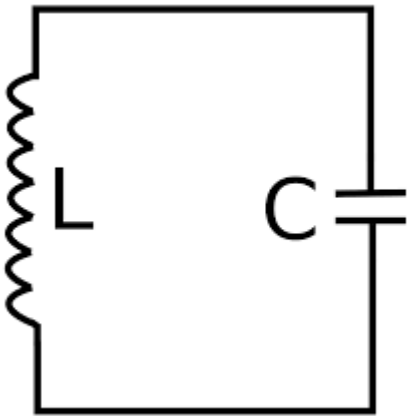
ELEMENTOS PASIVOS. IMPEDANCIA DE CIRCUITOS LC



$$\bar{Z} = j\omega \cdot L + \frac{1}{j\omega \cdot C} = \frac{1 - \omega^2 \cdot LC}{j\omega \cdot C}$$

$$\bar{Z} = 0 \Leftrightarrow 1 - \omega^2 \cdot LC = 0 \Rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

ELEMENTOS PASIVOS. IMPEDANCIA DE CIRCUITOS LC



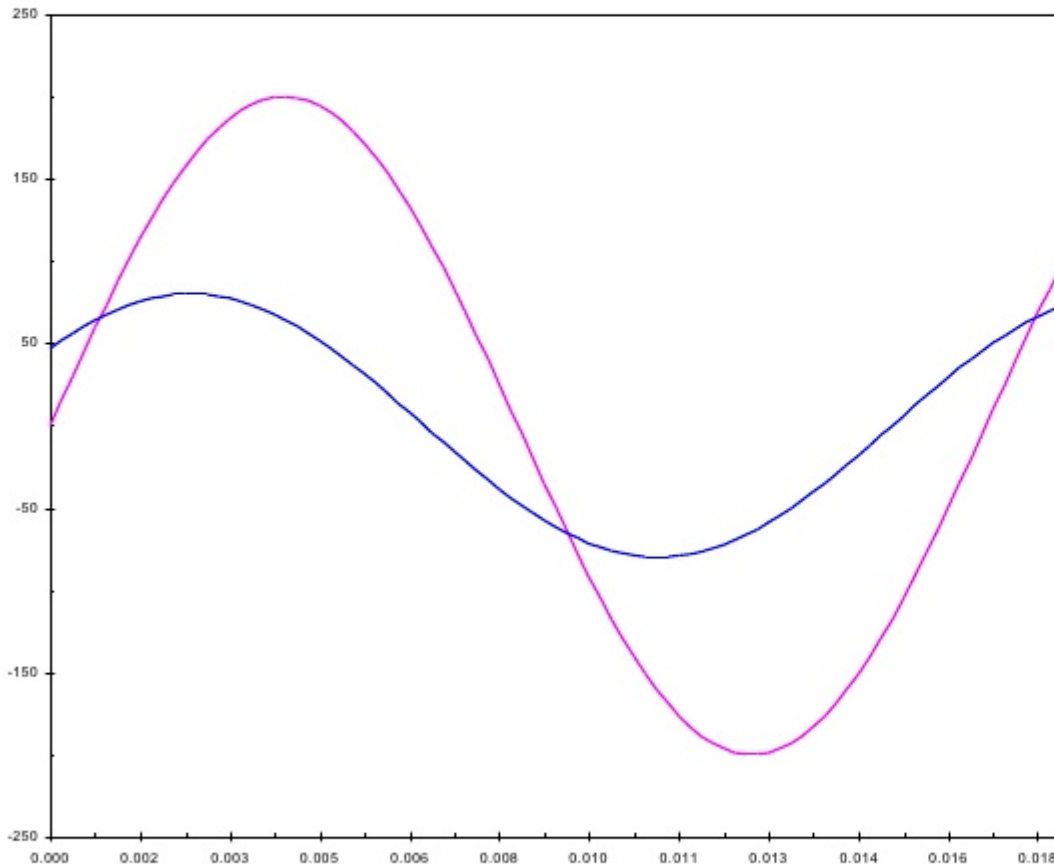
$$\frac{1}{\bar{Z}} = \frac{1}{j\omega \cdot L} + j\omega \cdot C = \frac{1 - \omega^2 \cdot LC}{j\omega \cdot L}$$

$$\bar{Z} = \frac{j\omega \cdot L}{1 - \omega^2 \cdot LC}$$

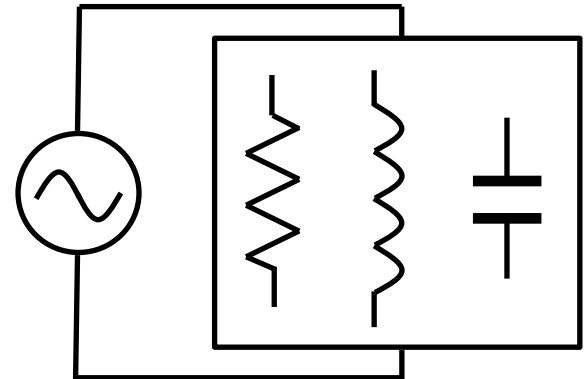
$$\bar{Z} \rightarrow \infty \Leftrightarrow 1 - \omega^2 \cdot LC = 0 \Rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

ELEMENTOS PASIVOS. LINEALIDAD

Se dice que una carga es lineal cuando su **impedancia** permanece **constante** en todo el periodo de la onda de tensión aplicada. R, L y C son cargas lineales.

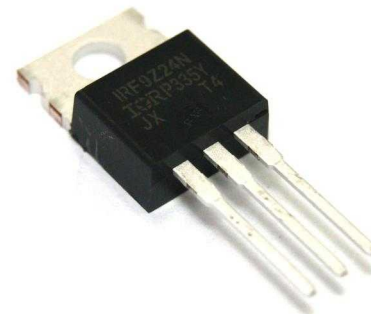
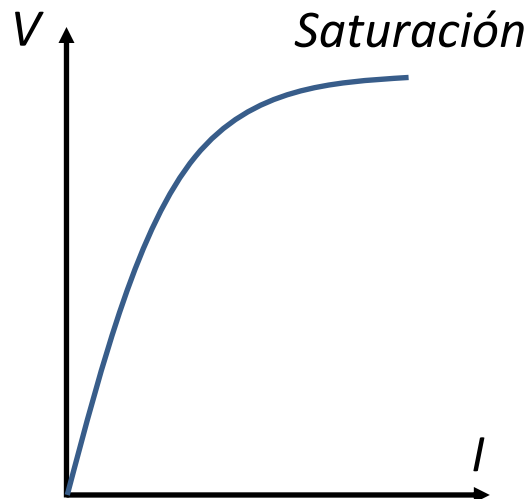


$$v \sim \Rightarrow i \sim$$



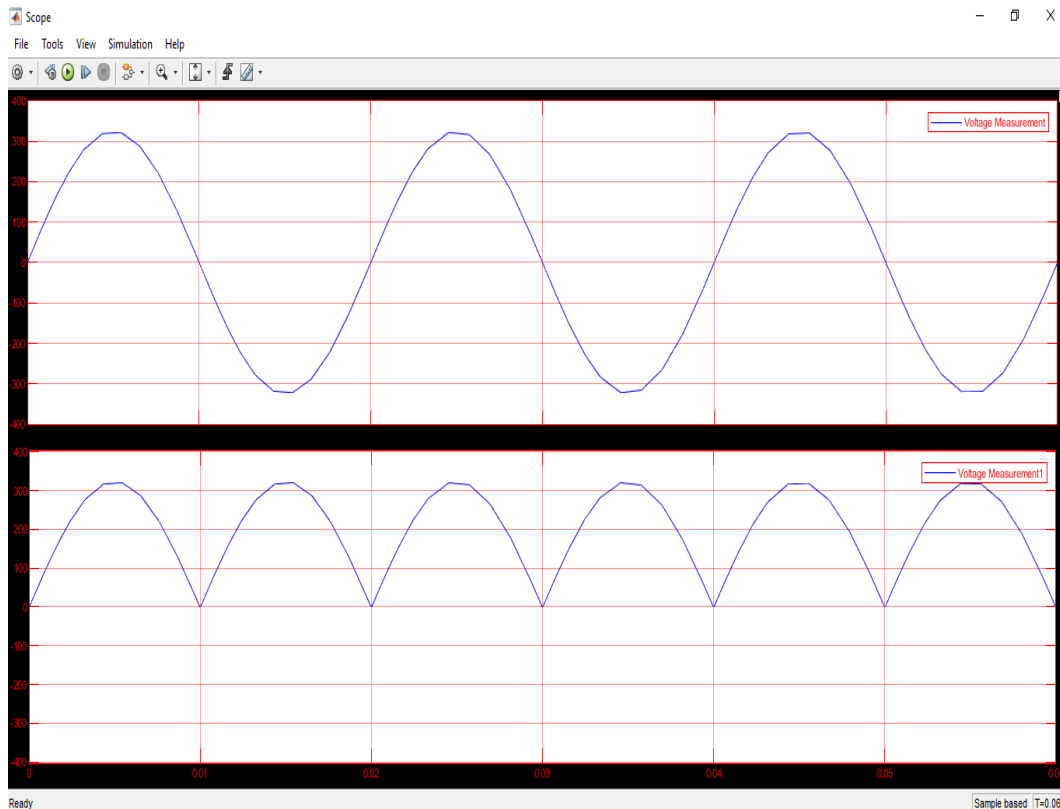
CARGAS NO LINEALES

Se dice que una carga es NO lineal cuando su **impedancia** es **variable** durante el periodo de la onda de tensión aplicada.

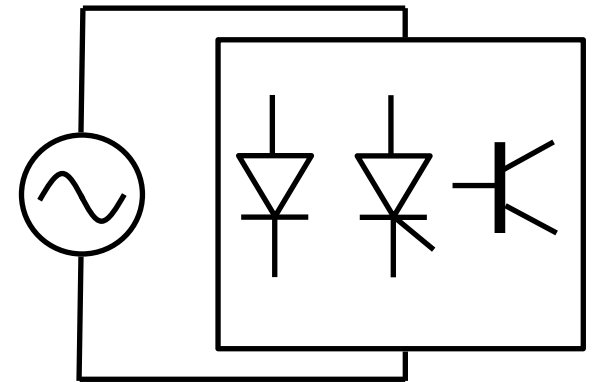


CARGAS NO LINEALES

Efecto de una carga no lineal: Las formas de onda de tensión y de corriente «dejan de parecerse»



$$V \sim \Rightarrow I \sim$$



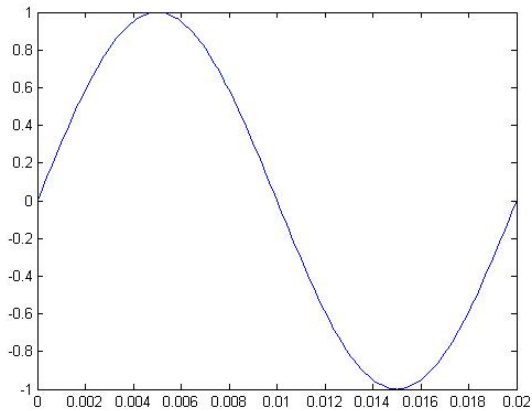
TEORÍA DE FOURIER

Cualquier señal periódica, por compleja que sea, se puede descomponer en suma de señales senoidales cuya frecuencia es múltiplo de la fundamental.

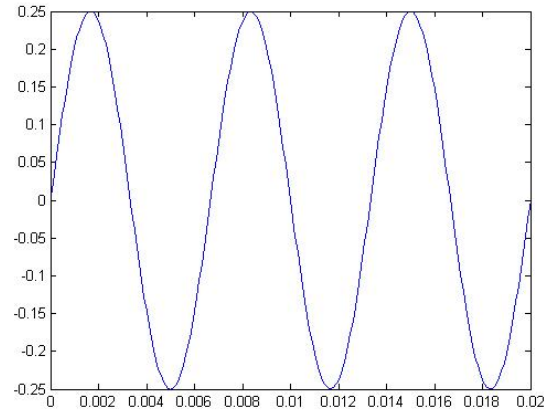
Esta es precisamente la definición de ARMÓNICO según UNE EN 50160.

$$v(t) = \sum V_n \cdot \text{sen}(n\omega t + \theta_n)$$

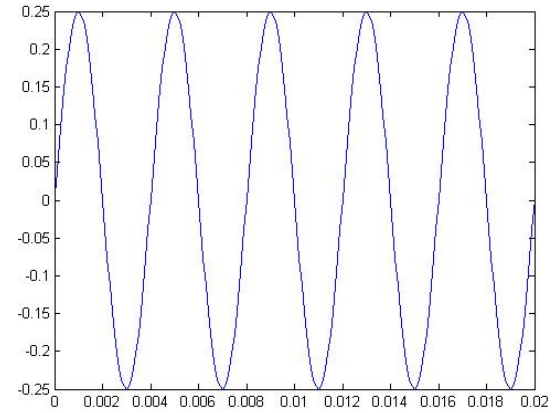
EJEMPLO



+

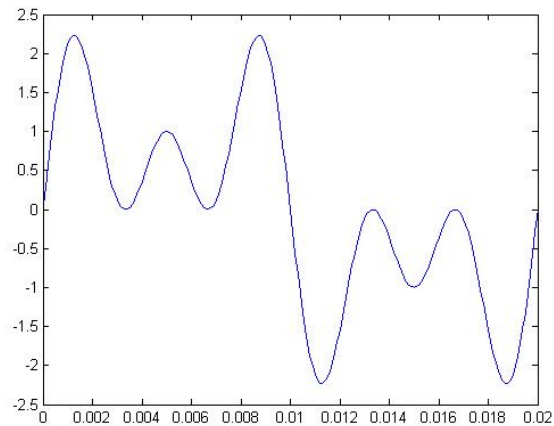


+

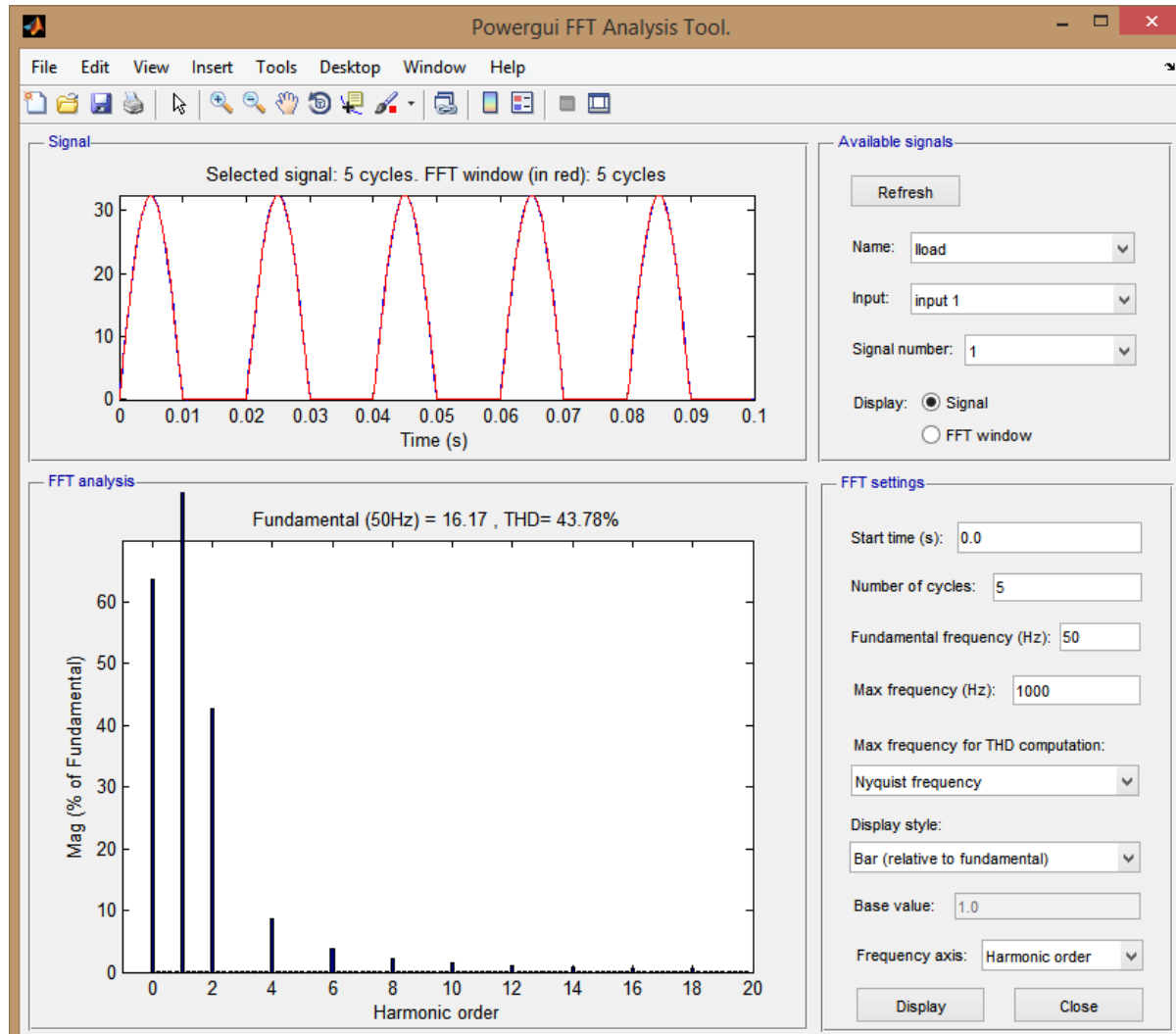


=

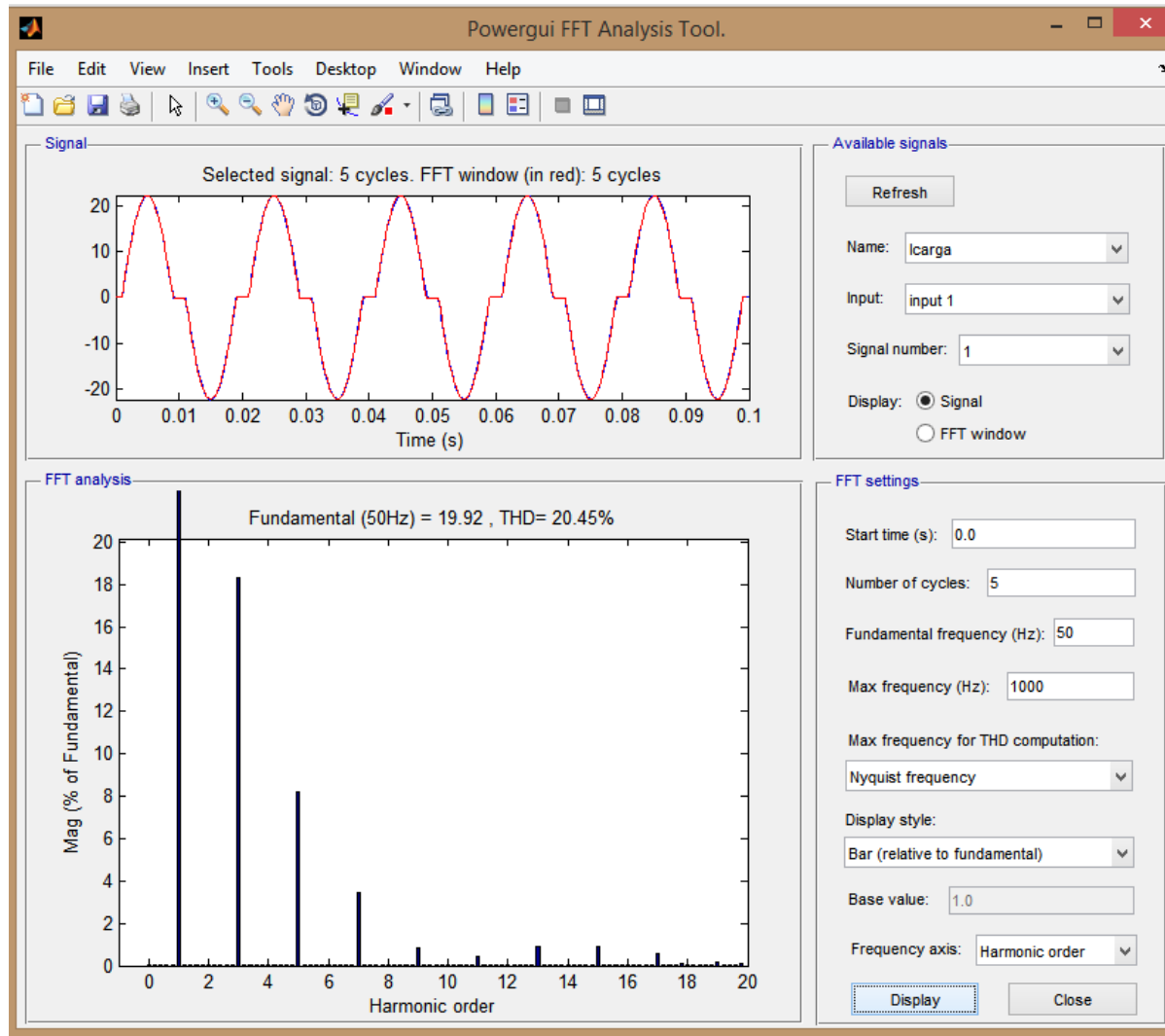
```
>> t=0:0.0001:0.02;
>> w=2*pi*50;
>> v1=sin(w*t);
>> v3=sin(3*w*t);
>> v5=sin(5*w*t);
>> v=v1+v3+v5;
>> plot(t,v1)
>> plot(t,v3)
>> plot(t,v5)
>> plot(t,v)
>>
```



ARMÓNICOS PARES



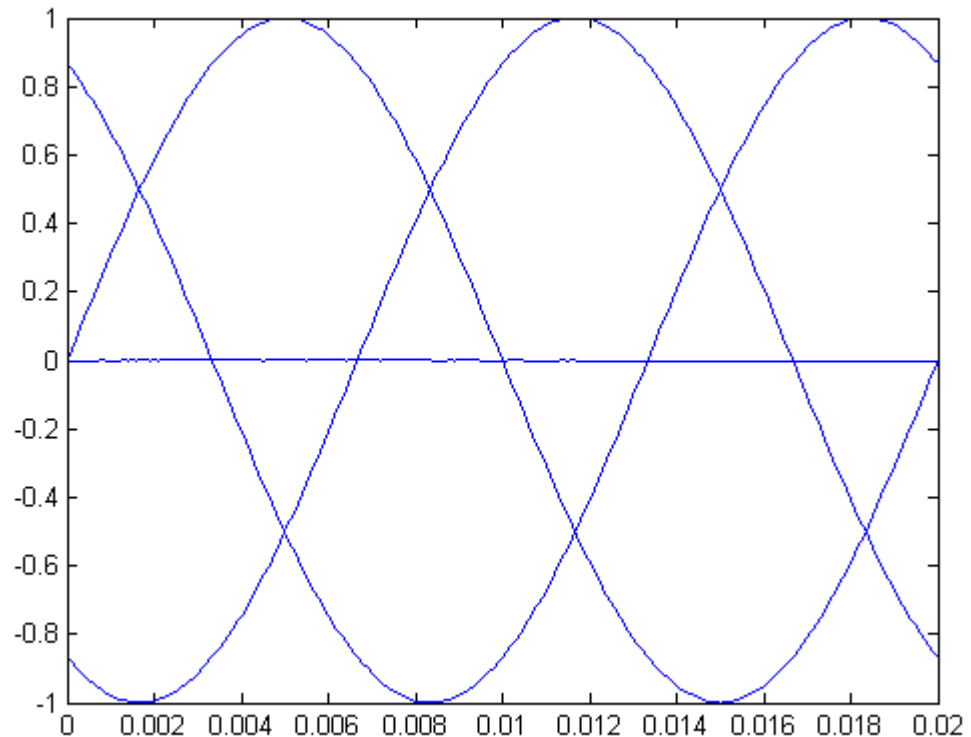
ARMÓNICOS IMPARES



ARMÓNICOS EN REDES TRIFÁSICAS

¿Y si elimino el neutro?

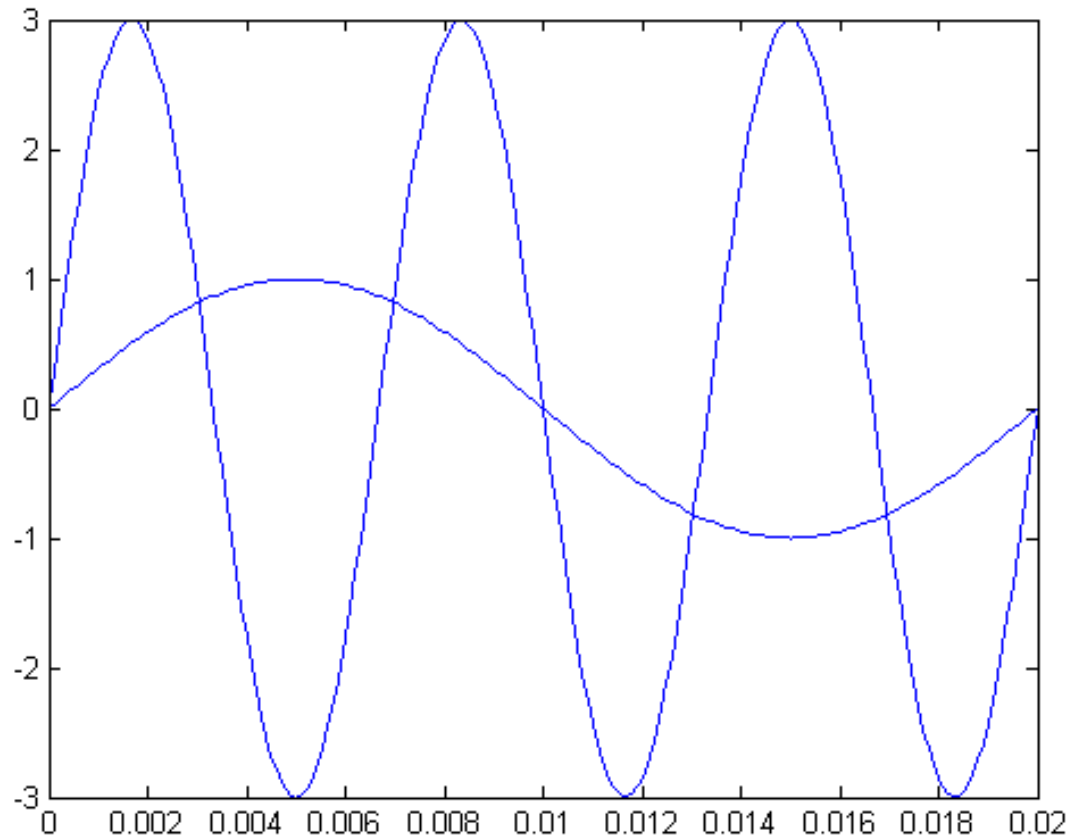
```
>> t=0:0.0001:0.02;
>> w=2*pi*50;
>> df=2/3*pi;
>> r1=sin(w*t);
>> s1=sin(w*t+df);
>> t1=sin(w*t-df);
>> n1=r1+s1+t1;
>> plot(t,r1)
>> hold on
>> plot(t,s1)
>> plot(t,t1)
>> plot(t,n1)
>>
```



ARMÓNICOS EN REDES TRIFÁSICAS

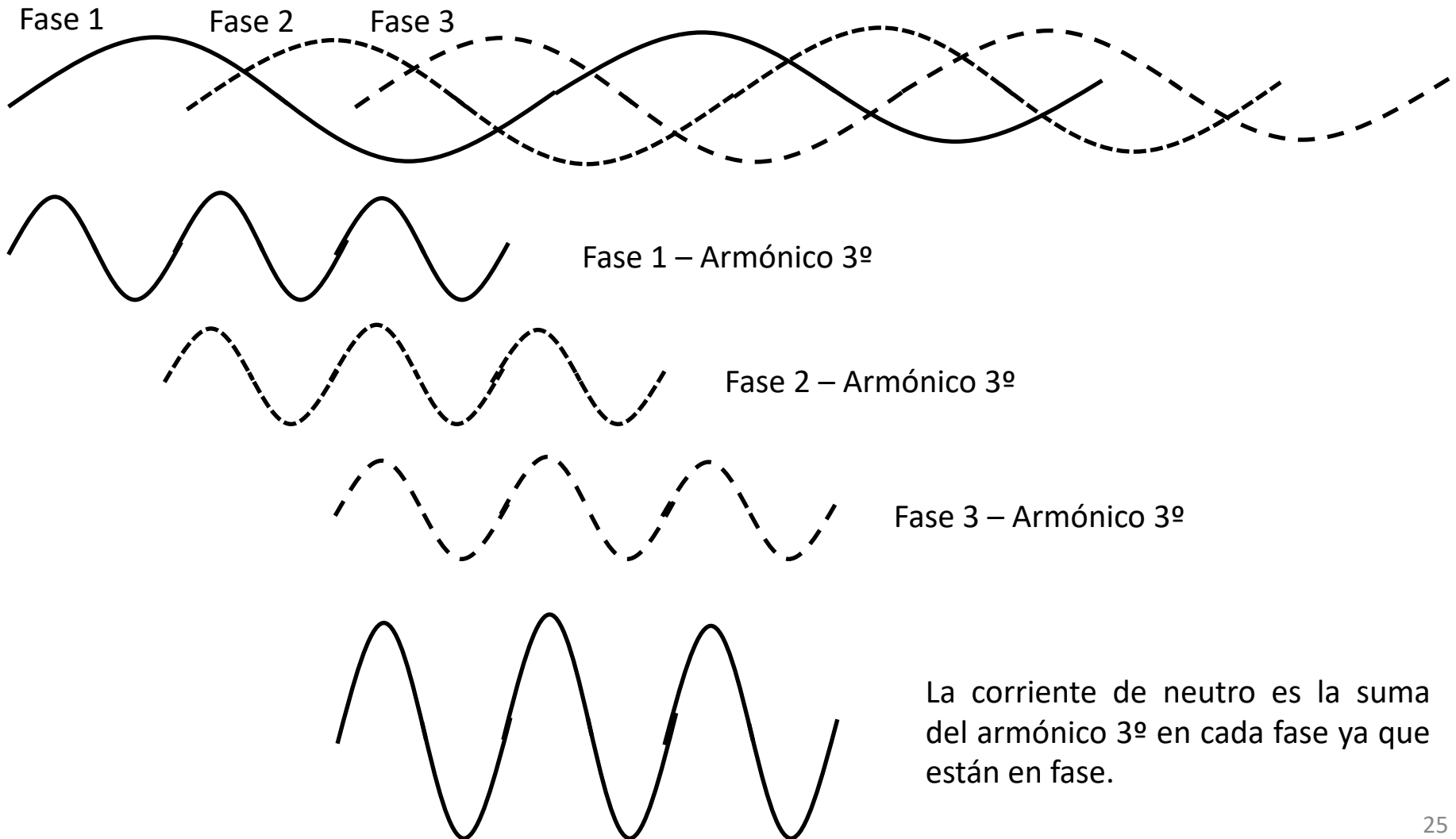
Tercer armónico

```
r3=sin(3*w*t);
s3=sin(3*w*t+3*df);
t3=sin(3*w*t-3*df);
n3=r3+s3+t3;
hold off
>> plot(t,r1)
>> hold on
>> plot(t,n3)
```



¡HOMOPOLAR!

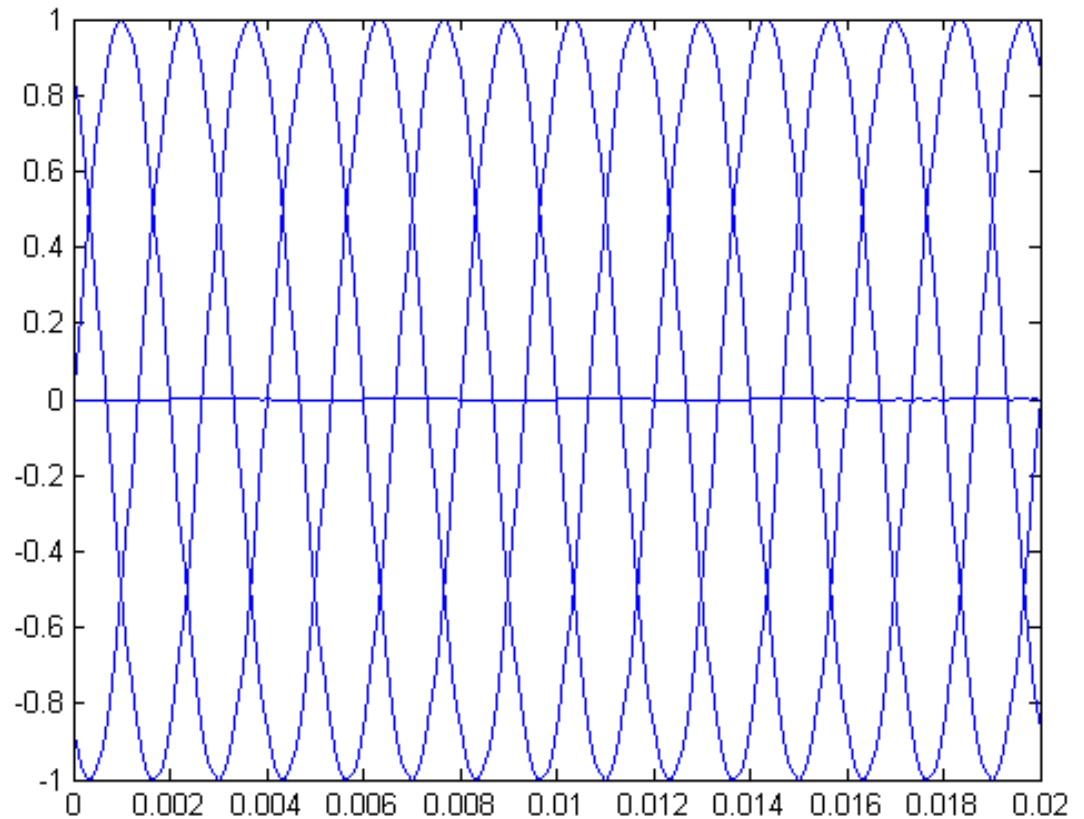
ARMÓNICOS EN REDES TRIFÁSICAS



ARMÓNICOS EN REDES TRIFÁSICAS

Quinto armónico

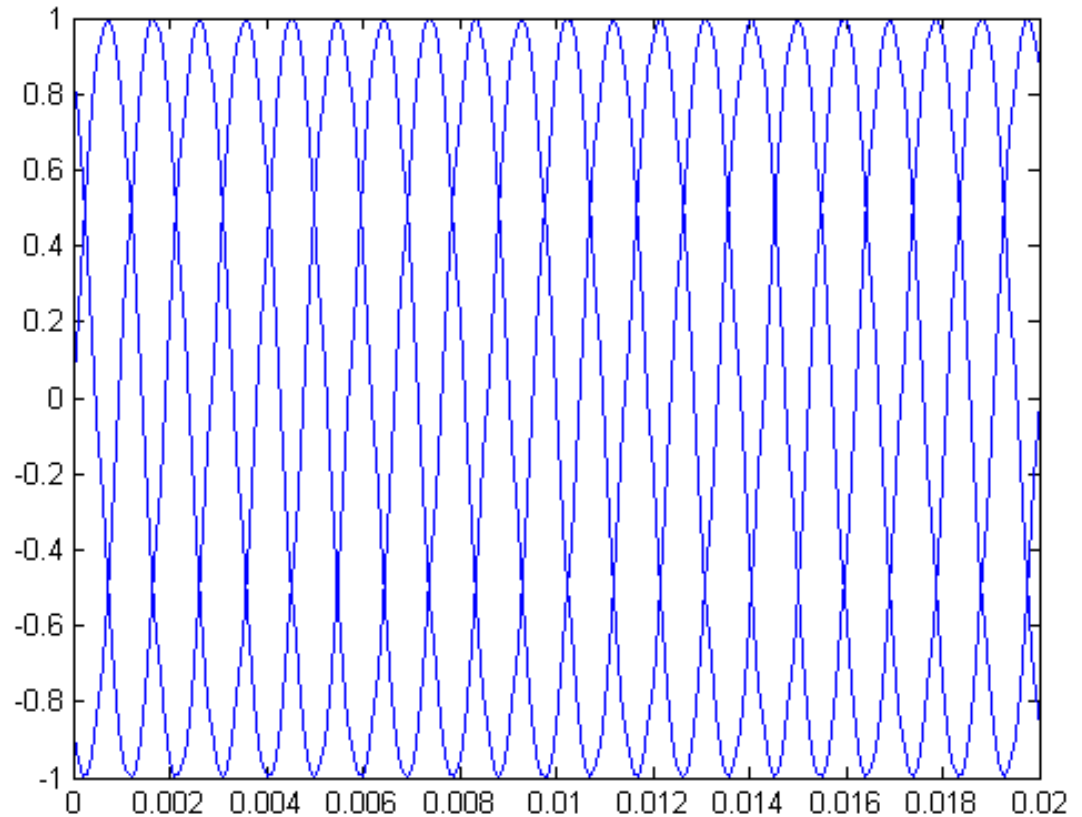
```
>> r5=sin(5*w*t);
>> s5=sin(5*w*t+5*df);
>> t5=sin(5*w*t-5*df);
>> n5=r5+s5+t5;
>> plot(t,r5)
>> hold on
>> plot(t,s5)
>> plot(t,t5)
>> plot(t,n5)
```



ARMÓNICOS EN REDES TRIFÁSICAS

Séptimo armónico

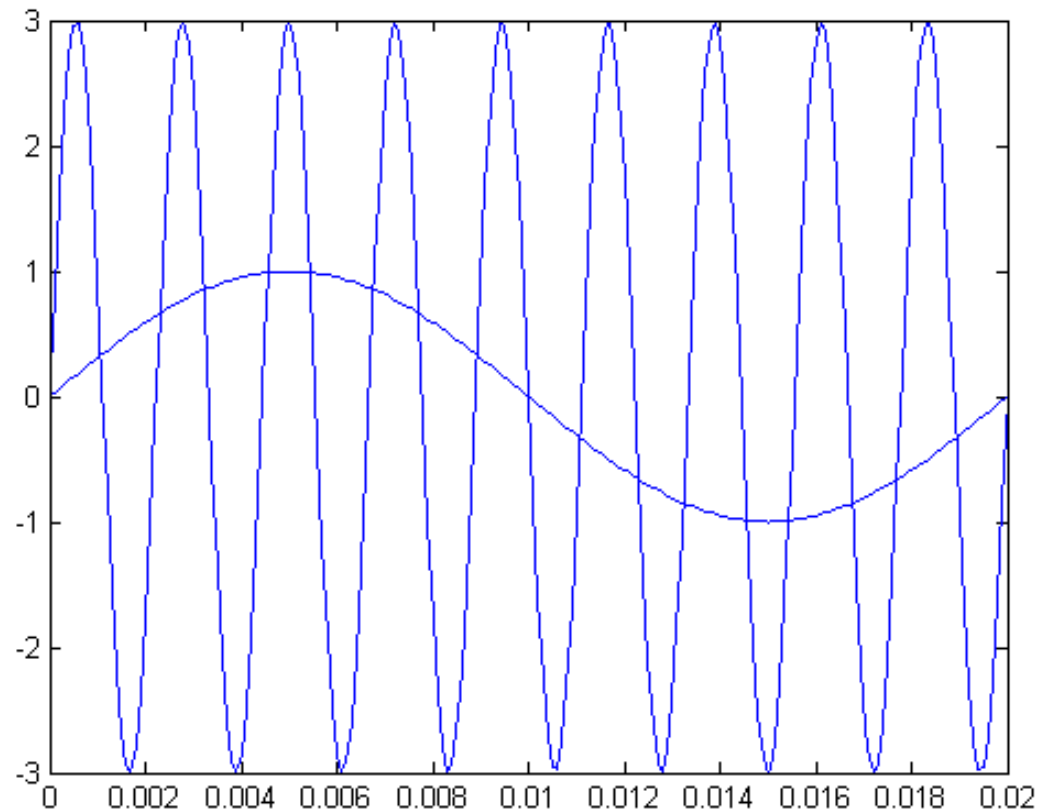
```
>> r7=sin(7*w*t);
>> s7=sin(7*w*t+7*df);
>> t7=sin(7*w*t-7*df);
>> n7=r7+s7+t7;
>> plot(t,r7)
>> hold on
>> plot(t,s7)
>> plot(t,t7)
```



ARMÓNICOS EN REDES TRIFÁSICAS

Noveno armónico

```
>> r9=sin(9*w*t);
>> s9=sin(9*w*t+9*df);
>> t9=sin(9*w*t-9*df);
>> n9=r9+s9+t9;
>> plot(t,r1)
>> hold on
>> plot(t,n9)
```

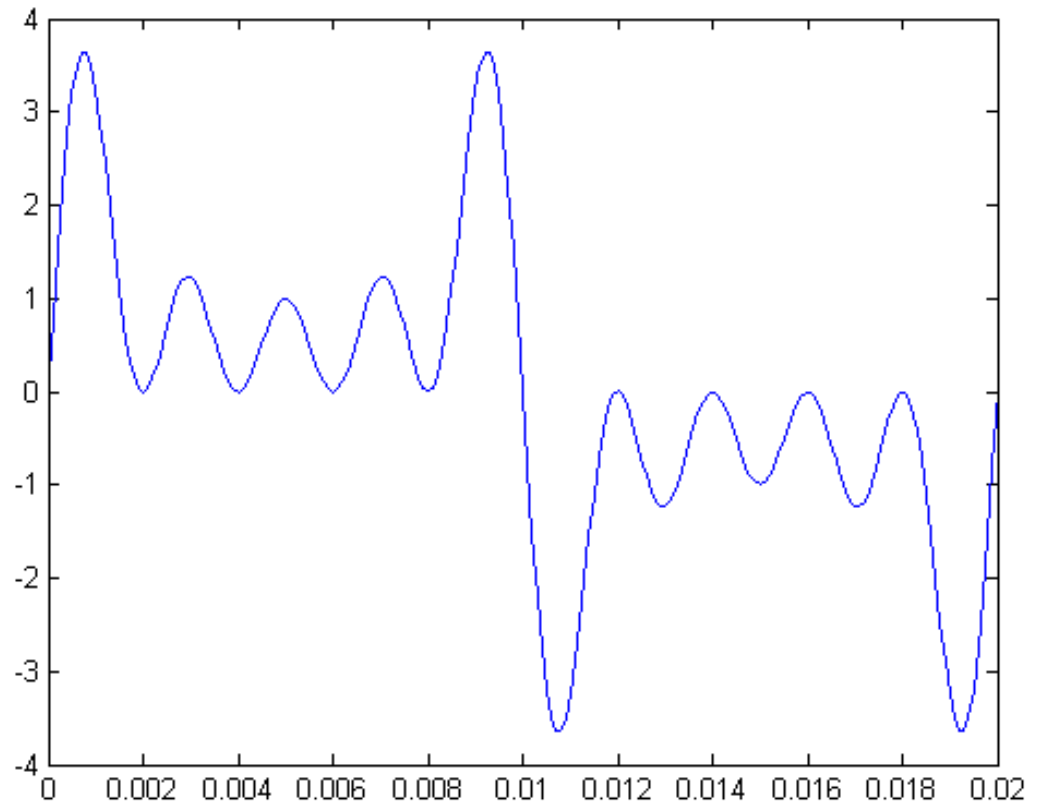


¡HOMOPOLAR!

ARMÓNICOS EN REDES TRIFÁSICAS

CUIDADO CON armónicos impares múltiplos de 3 (triple N)

```
>> r=r1+r3+r5+r7+r9;  
>> plot(t,r)
```



FUNDAMENTALES

$$V_A = A \angle 0^\circ$$

$$V_B = A \angle -120^\circ$$

$$V_C = A \angle 120^\circ$$

ARMÓNICOS

$$V_{Ak} = A_k \angle \varphi_k \quad V_{Bk} = A_k \angle (\varphi_k + k(-120^\circ)) \quad V_{Ck} = A_k \angle (\varphi_k + k(120^\circ))$$

ARMÓNICOS de orden 3n

$$V_{A(3n)} = A_{(3n)} \angle \varphi_{(3n)}$$

$$V_{B(3n)} = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + (3n) * (-120^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + n * (-360^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)})$$

$$V_{C(3n)} = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + (3n) * (120^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)} + n * (360^\circ)) = A_{(3n)} \angle (\varphi_{(3n)})$$

ARMÓNICOS de orden $3n+1$

$$V_{A(3n+1)} = A_{(3n+1)} \angle \varphi_{(3n+1)}$$

$$V_{B(3n+1)} = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + (3n+1) * (-120^\circ)) = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + n * (-360^\circ) - 120^\circ) =$$

$$A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} - 120^\circ)$$

$$V_{C(3n+1)} = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + (3n+1) * (120^\circ)) = A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + n * (360^\circ) + 120^\circ) =$$

$$A_{(3n+1)} \angle (\varphi_{(3n+1)} + 120^\circ)$$

ARMÓNICOS de orden $3n-1$

$$V_{A(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle \varphi_{(3n-1)}$$

$$V_{B(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + (3n-1) * (-120^\circ)) = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + n * (-360^\circ) + 120^\circ) =$$

$$A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + 120^\circ)$$

$$V_{C(3n-1)} = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + (3n-1) * (120^\circ)) = A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} + n * (360^\circ) - 120^\circ) =$$

$$A_{(3n-1)} \angle (\varphi_{(3n-1)} - 120^\circ)$$

CUANTIFICACIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA

THD = Total Harmonic Distortion

$$THD = \frac{\sqrt{h_2^2 + h_3^2 + \dots + h_n^2}}{h_1}$$

THD de la tensión:

$$THD_v = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1}$$

THD de la corriente:

$$THD_i = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1}$$

CUANTIFICACIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA

Factor de potencia: Relación entre la potencia activa y la potencia aparente.

$$PF = \frac{P}{S}$$

Cos φ : Relación entre las componentes fundamentales de la potencia activa y la potencia aparente.

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1}$$

El factor de potencia y el cos φ sólo son iguales cuando no existen armónicos. Lo normal es que sean parecidos, ya que la distorsión de la tensión es normalmente muy inferior a la distorsión de corriente.

EFFECTOS DE LOS ARMÓNICOS

- Sobrecalentamiento de los conductores. Corriente de neutro, debida a desequilibrios y, sobre todo, a armónicos **homopolares**.

REBT 1973

Para la sección del conductor neutro se tendrá en cuenta el máximo desequilibrio que pueda preverse y su adecuado comportamiento, en función de las protecciones establecidas, ante las sobrecargas y cortocircuitos que pudieran presentarse.

REBT 2002

En instalaciones interiores, para tener en cuenta las corrientes armónicas debidas a cargas no lineales y posibles desequilibrios, salvo justificación por cálculo, la sección del conductor neutro será como mínimo igual a la de las fases.

Recomendación: Sobredimensionar el conductor neutro.

EFFECTOS DE LOS ARMÓNICOS

- Efecto piel en los conductores, agravado al aumentar la frecuencia por encima de 350 Hz.

Recomendación: Múltiples conductores o pletinas.

- Disparo intempestivo de elementos de protección. Las altas frecuencias pueden «confundir» a una protección electromecánica. Los propios filtros que incorporan algunas cargas no lineales derivan pequeñas corrientes, del orden de 3,5 mA.

Recomendación: Subdividir circuitos y utilizar protecciones inmunizadas.

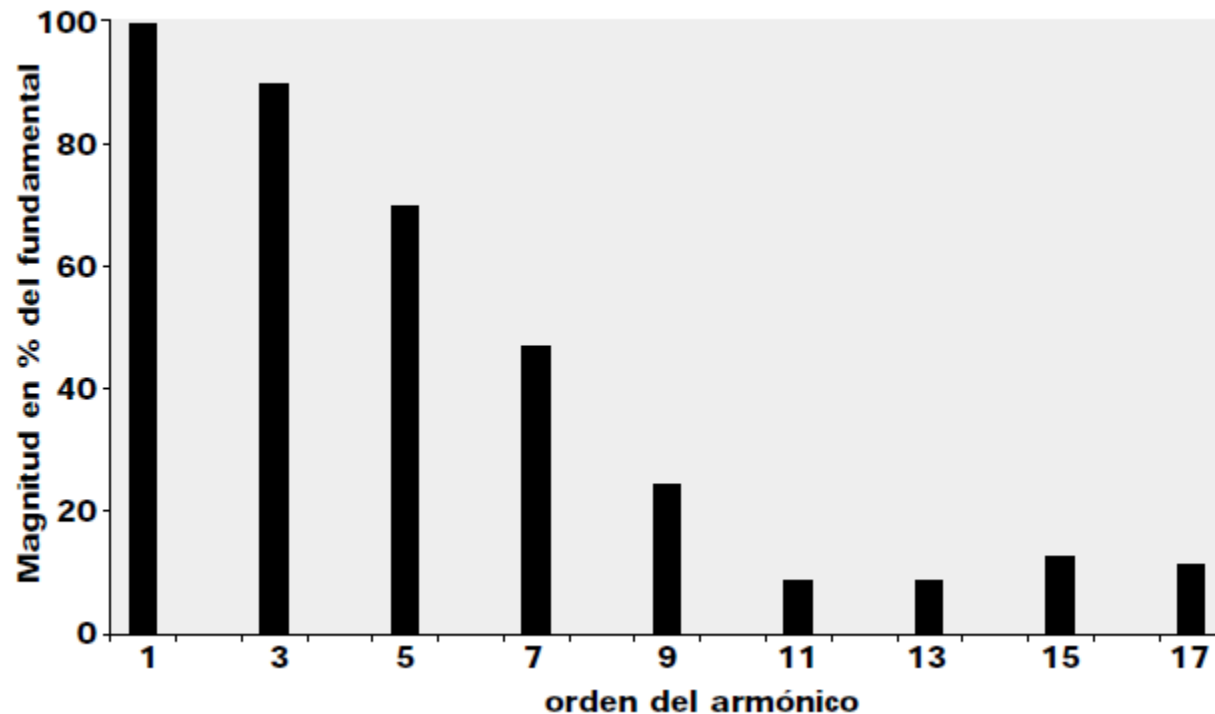
- Armónicos de tensión con secuencia inversa causan problemas a los motores de inducción.
- Resonancia en baterías de condensadores, al crear un camino de baja impedancia.

FUENTES DE ARMÓNICOS

Cargas monofásicas:

Fuentes de alimentación de funcionamiento conmutado

Ejemplo: Espectro armónico de un PC

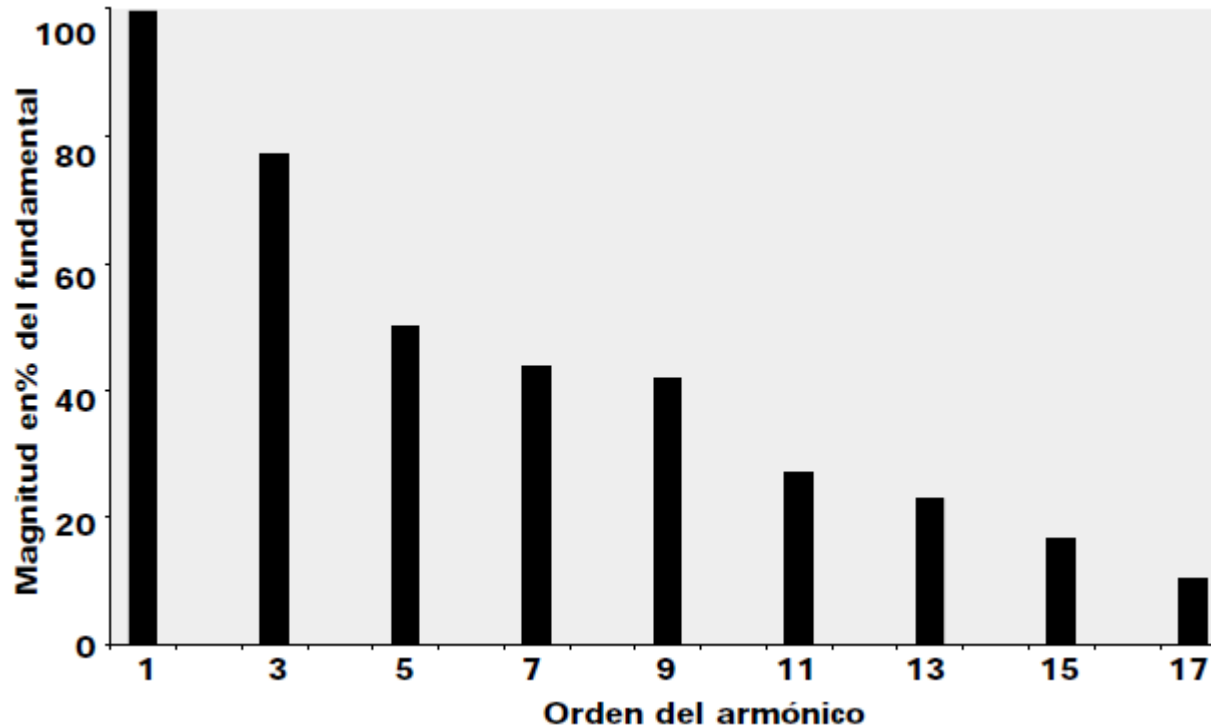


FUENTES DE ARMÓNICOS

Cargas monofásicas:

Balastos electrónicos

Ejemplo: Espectro armónico de una lámpara fluorescente compacta



ARMÓNICOS

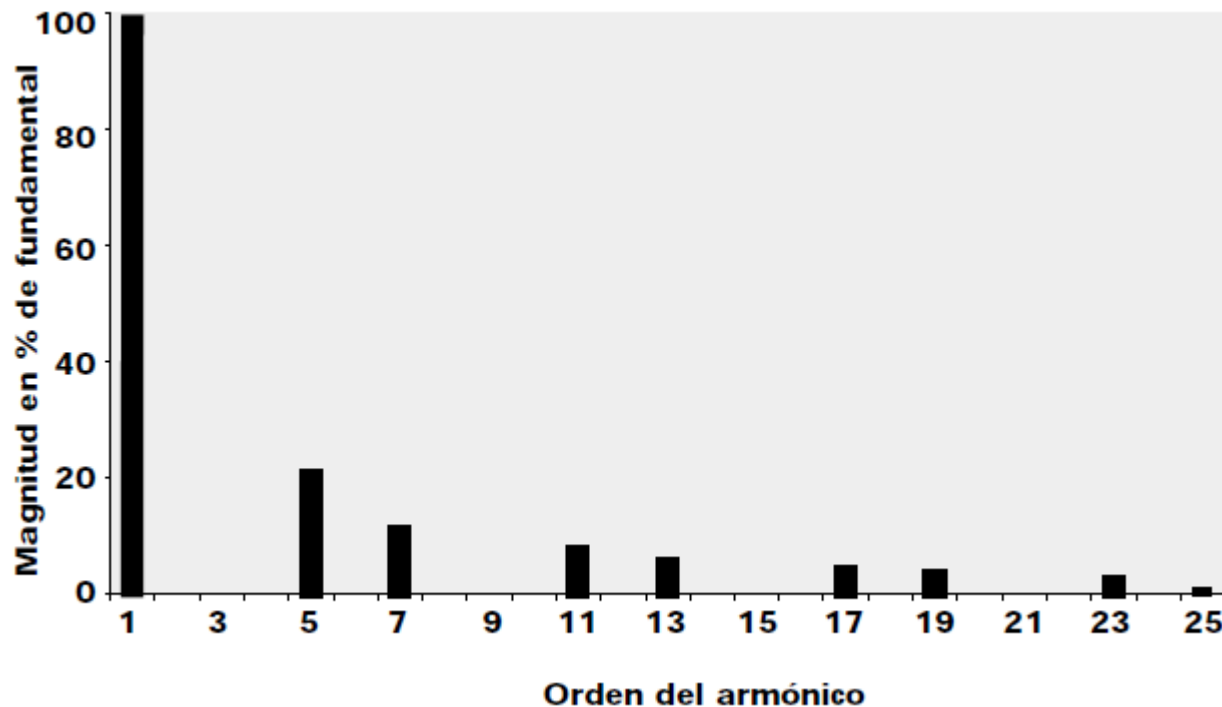
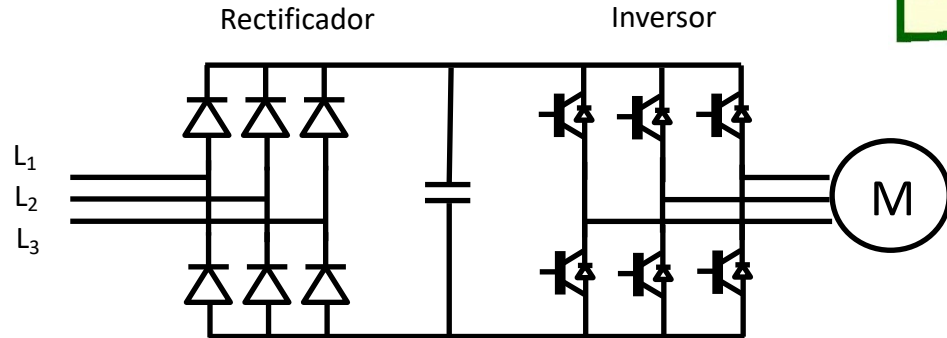


FUENTES DE ARMÓNICOS

Cargas trifásicas:

Variadores de velocidad

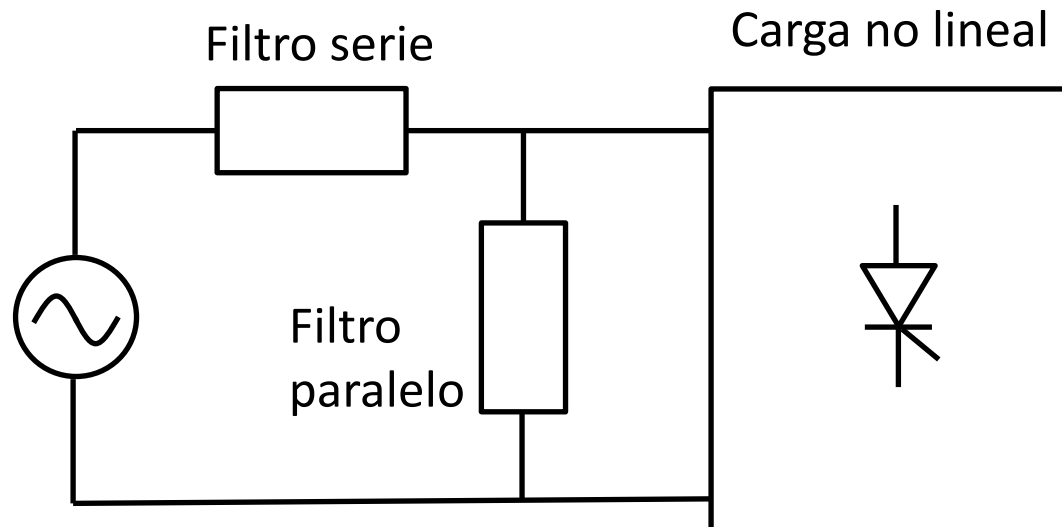
Ejemplo: Espectro armónico de un puente de seis pulsos



FILTRADO DE ARMÓNICOS

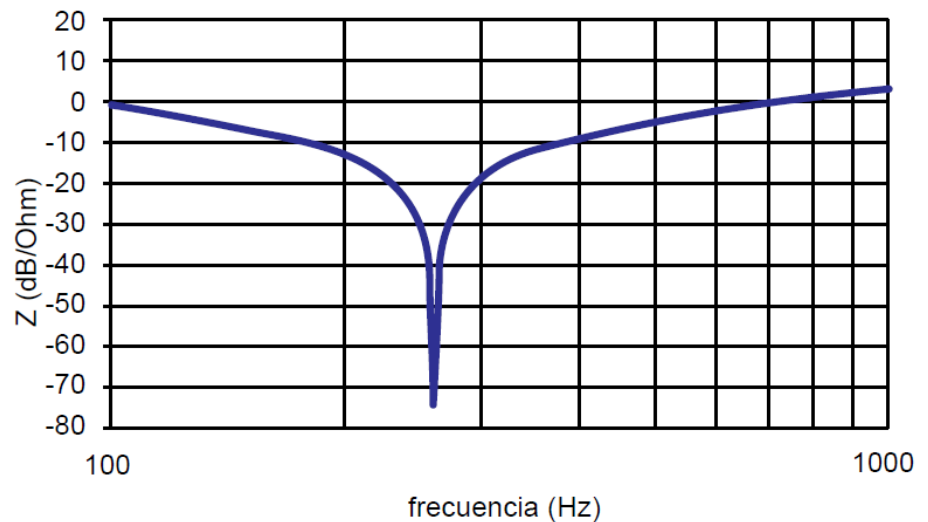
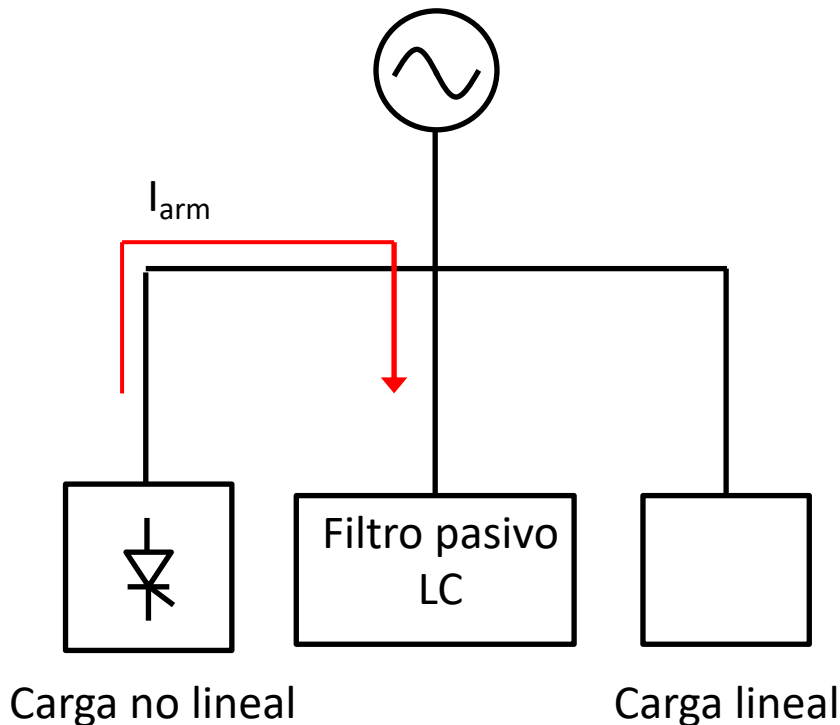
Filtros pasivos. Se basan en la impedancia de elementos lineales L y C.

$$\bar{Z} = j\omega \cdot L + \frac{1}{j\omega \cdot C}$$



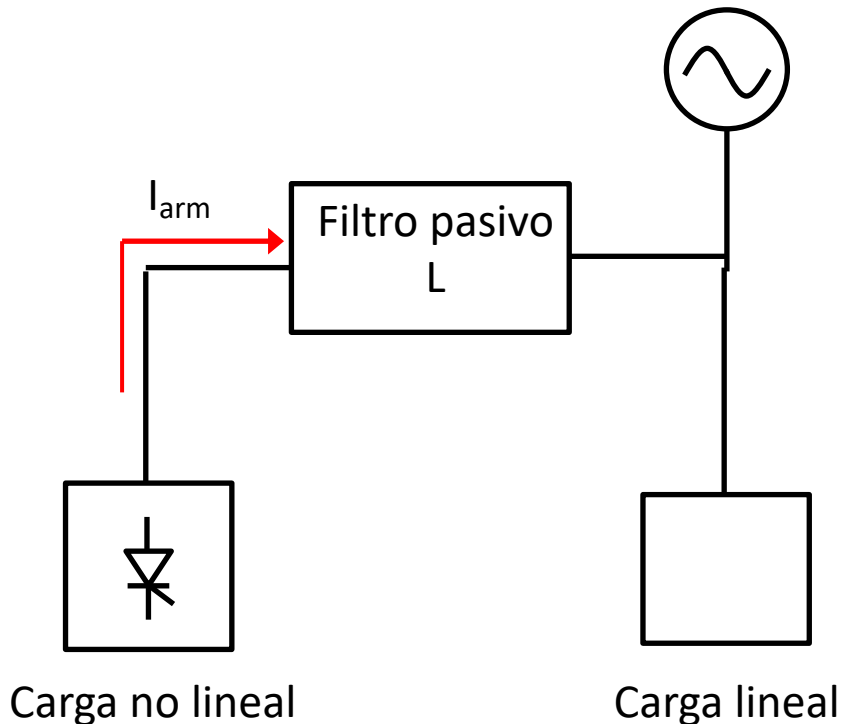
FILTRADO DE ARMÓNICOS

Filtros pasivos sintonizados a CADA UNA de las frecuencias que se pretende eliminar. Conexión en paralelo con la carga. Camino de **baja impedancia**. Absorbe los armónicos, evitando la contaminación aguas arriba.



FILTRADO DE ARMÓNICOS

Filtros pasivos sintonizados a CADA UNA de las frecuencias que se pretende eliminar. Conexión en serie con la carga. Camino de **alta impedancia**. Bloquea los armónicos, evitando la contaminación aguas arriba. Produce caída de tensión armónica. OJO con equipos sensibles a la distorsión de la tensión.



FILTRADO DE ARMÓNICOS

Filtros activos. Adecuados cuando el contenido de armónicos es impredecible. Genera los mismos armónicos que la carga no lineal pero desfasada 180°

