



# ***PERTURBACIONES ELECTROMAGNÉTICAS***

***“Armónicos”***

***Johann F. Petit Suárez***  
***[jfpetit@uis.edu.co](mailto:jfpetit@uis.edu.co)***



**a l u r e**

**Cartagena de Indias, 6,7,8 de feb de 2002**

# CONTENIDO

---



**Introducción**



**Compatibilidad Electromagnética**



**Análisis general de Armónicos**



**Definiciones básicas de potencia**



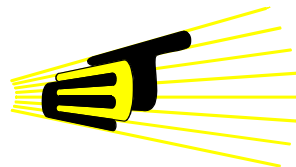
**Modelo Propuesto**



**Aplicación**



**Observaciones y Conclusiones**



# Introducción

**ENERGÍA ELÉCTRICA**



**CALIDAD DE SERVICIO**

- **Confiabilidad**
- **Seguridad**
- **Calidad**

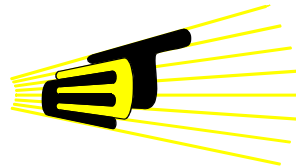
- **Continuidad**
- **Forma de Onda**

**Armónicos**

# CONTENIDO

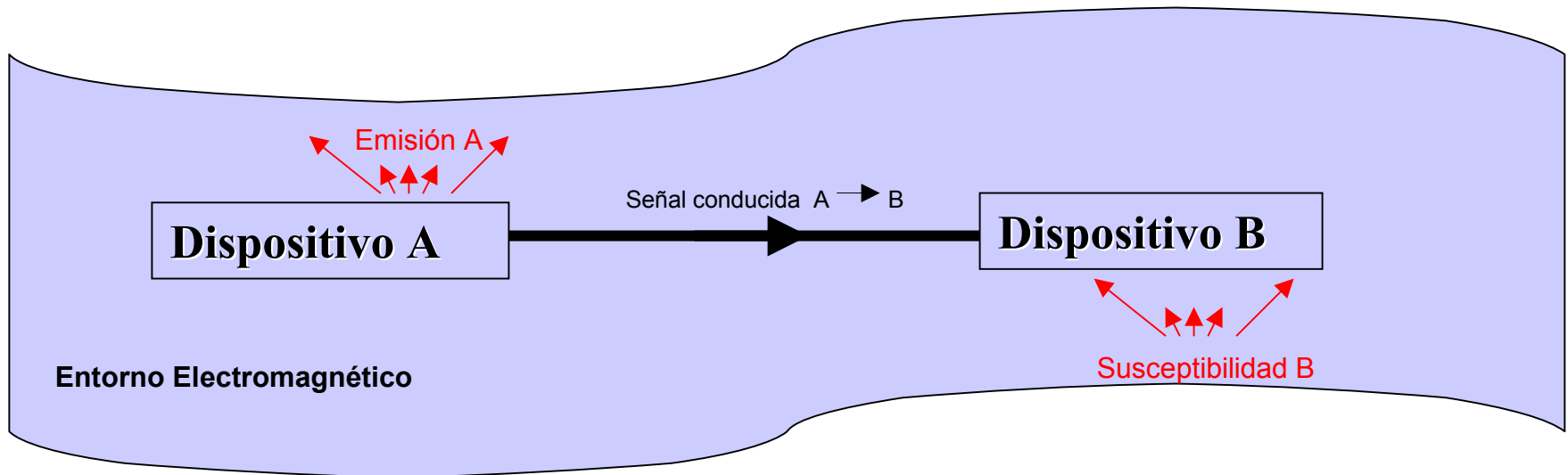
---

- **Introducción**
- ➔ ● **Compatibilidad Electromagnética**
- **Análisis general de Armónicos**
- **Definiciones básicas de potencia**
- **Modelo Propuesto**
- **Aplicación**
- **Observaciones y Conclusiones**

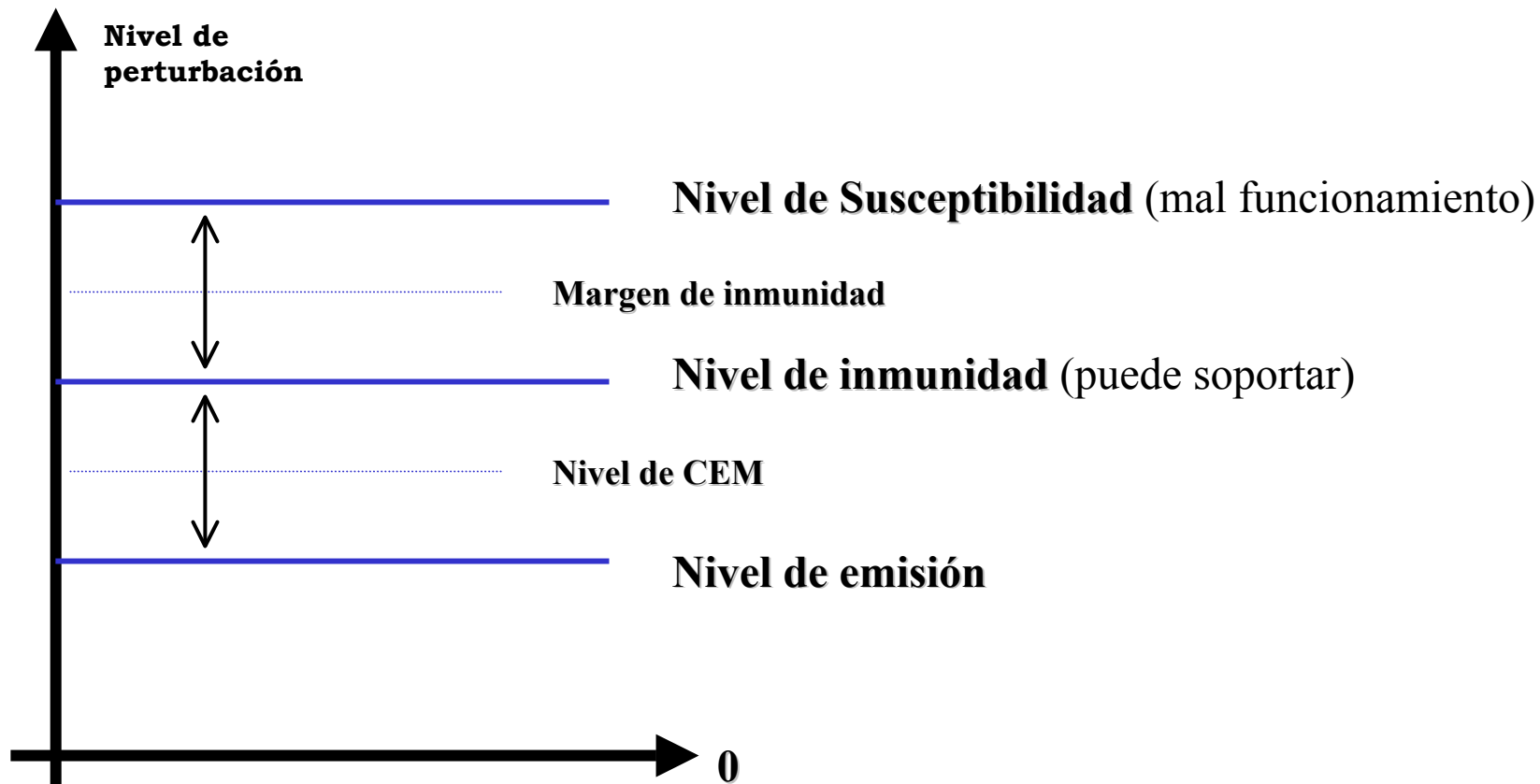


# Compatibilidad Electromagnética (CEM):

Es la aptitud de un dispositivo, aparato o sistema para funcionar en su entorno electromagnético de forma satisfactoria y sin producir perturbaciones electromagnéticas intolerables para cualquier otro dispositivo situado en el mismo entorno



# Compatibilidad Electromagnética de un Sistema



El nivel de inmunidad de cada aparato debe ser tal que su entorno no lo perturbe y su nivel de emisión debe ser lo suficientemente bajo como para no perturbar a los aparatos situados en su entorno electromagnético

# Tipos de Perturbaciones

## Baja Frecuencia (BF)

## Alta Frecuencia (AF)

**Rango de frecuencias**

**$0 < f < 1\text{MHz}$**

**$f > 1\text{MHz}$**

**Forma de propagación**

**Por conducción**

**Por Radiación**

**Medio de propagación**

**Cables**

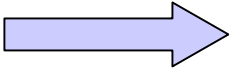

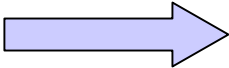

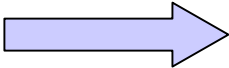
**Aire**

**Duración**

**Transitoria y  
Permanente**

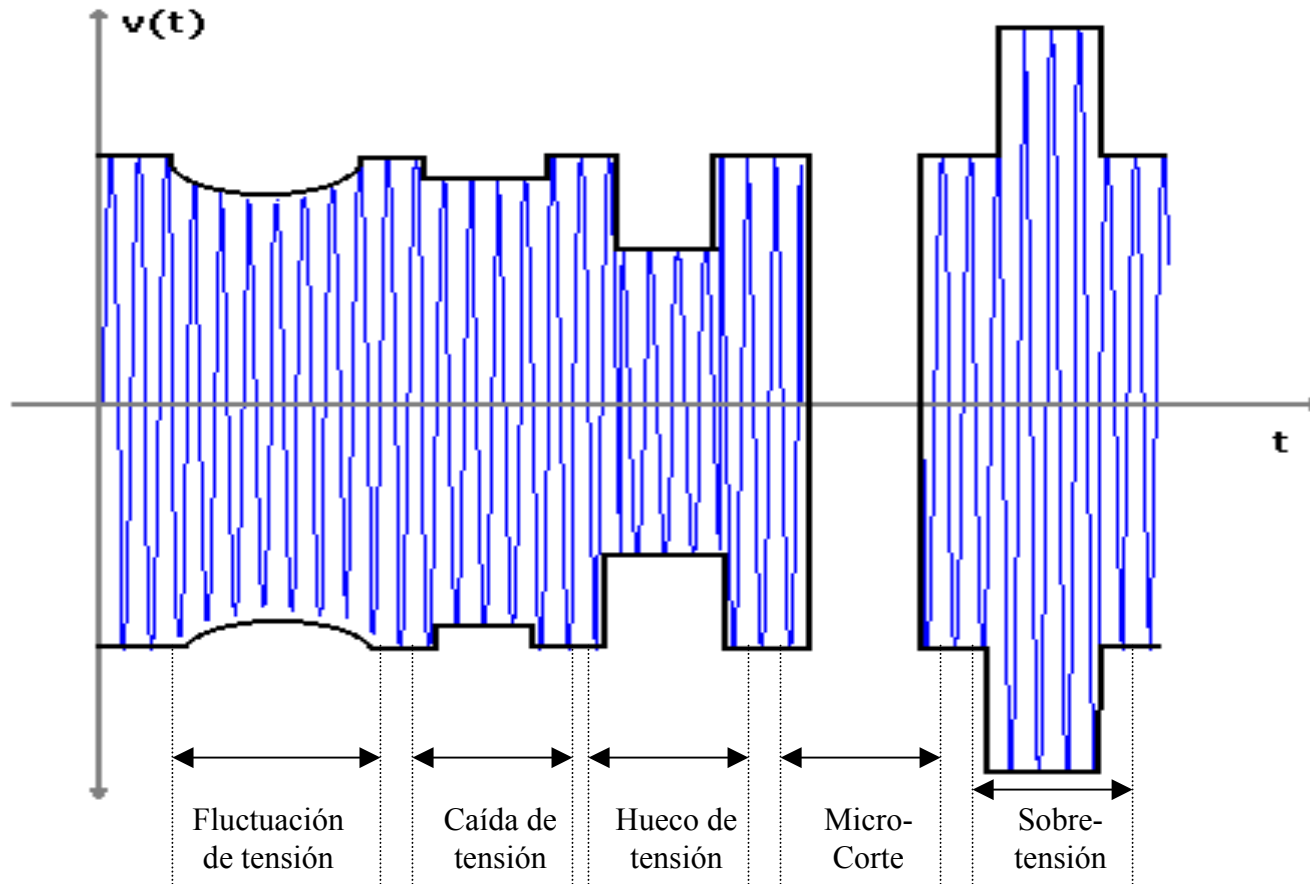
**Transitoria y  
Permanente**

# Perturbaciones comunes en los sistemas de distribución

Tensión		Variaciones, cortes, caídas, sobretensiones
Frecuencia		Variaciones
Forma de onda		Armónicos, transitorios
Fases		Desequilibrios
Potencia		Cortocircuito, sobrecargas



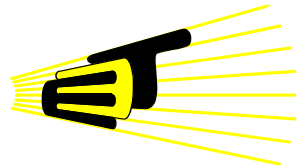
# Ejemplos de perturbaciones en tensión comunes en la red



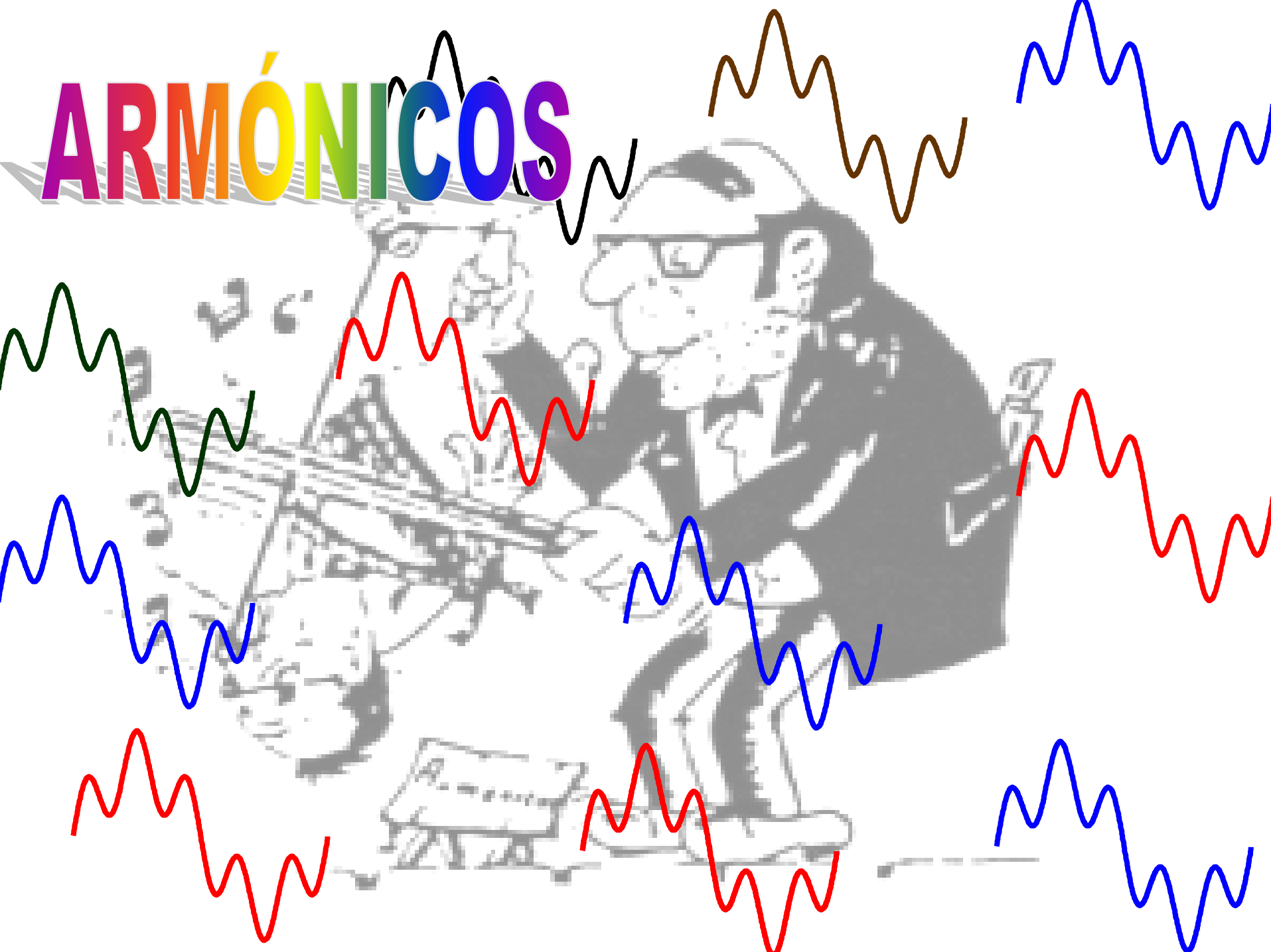
# CONTENIDO

---

- **Introducción**
- **Compatibilidad Electromagnética**
- ➔ ● **Análisis general de Armónicos**
- **Definiciones básicas de potencia**
- **Modelo Propuesto**
- **Aplicación**
- **Observaciones y Conclusiones**



# ARMÓNICOS

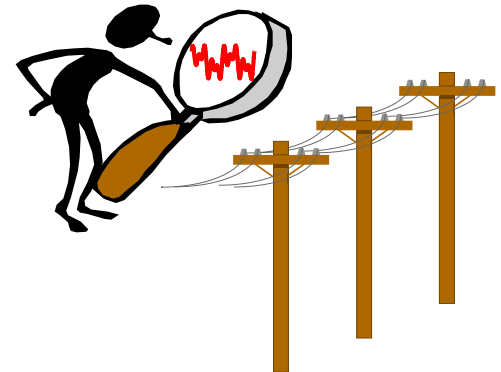


# Que son los Armónicos ?

Los armónicos son perturbaciones de baja frecuencia que se transmiten principalmente por conducción.

## Cómo se evidencia la existencia de Armónicos ?

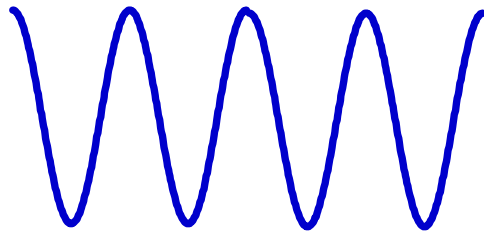
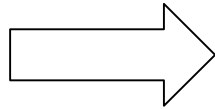
Se dice que una señal tiene perturbaciones armónicas si la forma de onda difiere de la señal senoidal en régimen permanente.



# Por qué hoy en día hay que hacer estudios de los armónicos ?

**ANTERIORMENTE**

**tensión**



**Anormalidades:**

**Transitorios**

**Cortocircuitos**

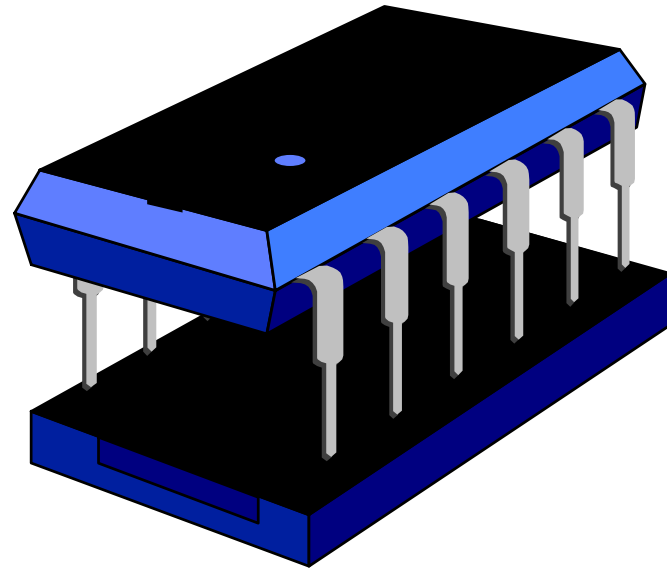
**Descargas**

**TRFs**  
**Cargas especiales.**

**Sistema  
inmune**

# *Con el advenimiento de Cargas Electrónicas: “Mayor uso y de mayor potencia”*

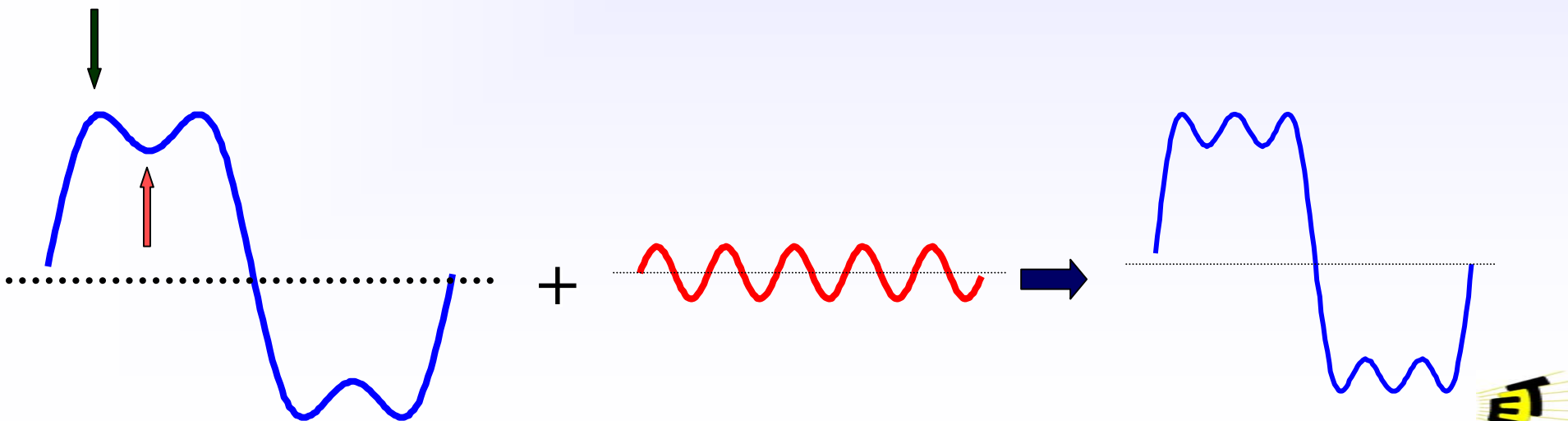
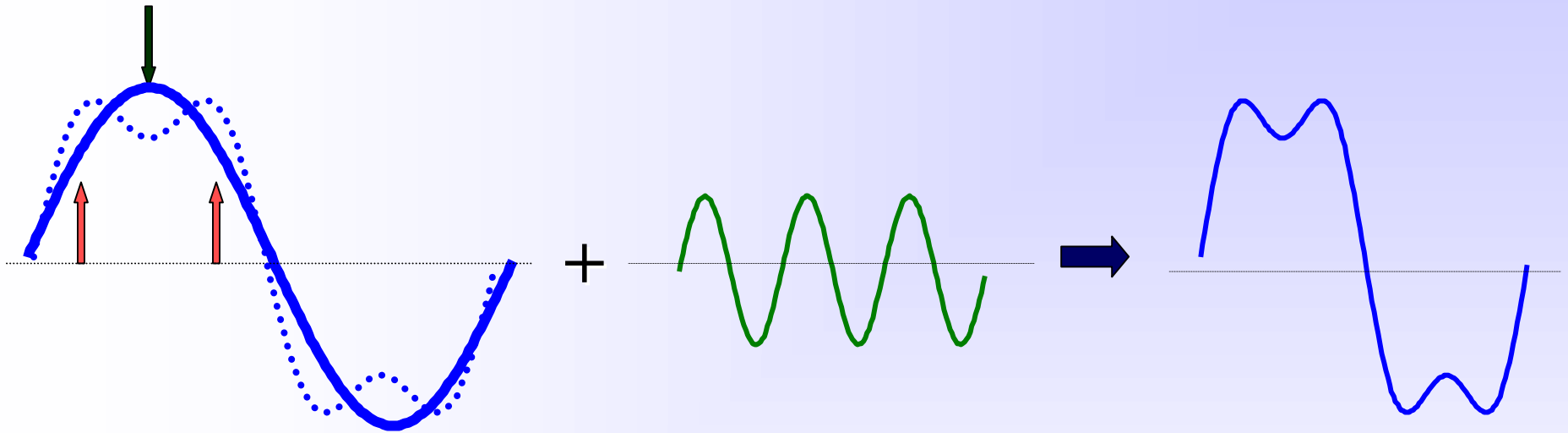
- *Convertidores*
- *Variadores de velocidad*
- *Rectificadores*
- *Computadores, etc*



***Aumenta***



# Cómo se representan las señales que tienen perturbaciones armónicas ?



# *Series de Fourier*

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_k \cos(k\omega_0 t) + \sum_{k=1}^{\infty} C_k \text{sen}(k\omega_0 t)$$

## *Funciones ortogonales*

$$\int_0^T e^{jm\omega_0 t} e^{-jn\omega_0 t} dt = \frac{e^{j(m-n)\omega_0 t}}{j(m-n)\omega_0} \Bigg|_0^T = \begin{cases} T & m=n \\ 0 & m \neq n \end{cases}$$

*m, n : Ordenes de los armónicos*





$$a_0 = \frac{1}{T} \int_T x(t) dt \quad B_k = \frac{2}{T} \int_T x(t) \cos(k\omega_0 t) dt$$

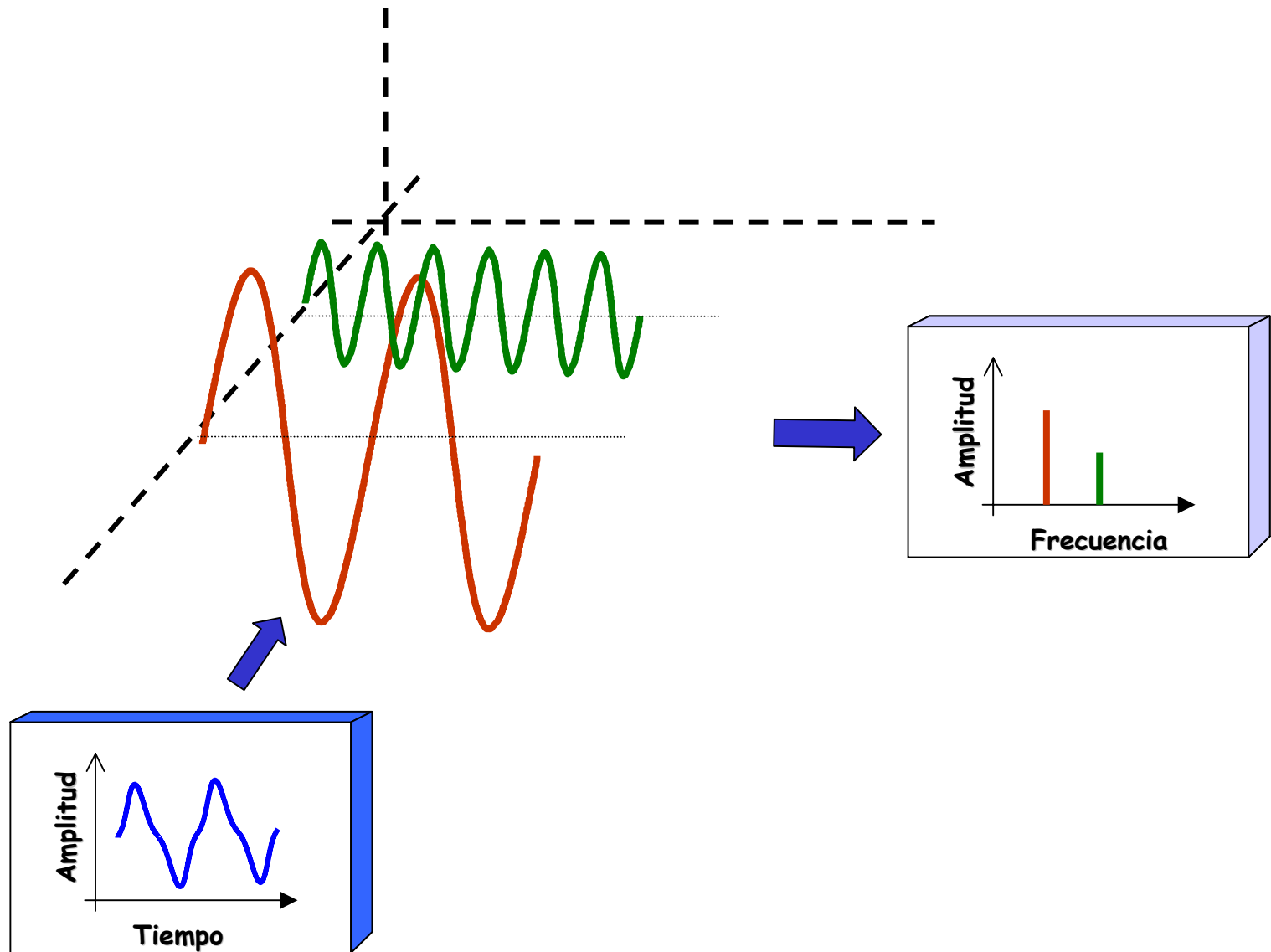
$$C_k = \frac{2}{T} \int_T x(t) \sin(k\omega_0 t) dt$$

$$f(t) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} D_k \cos(k\omega_0 t + \theta_k)$$

$$D_k = \sqrt{B_k^2 + C_k^2} \quad \theta_k = -\tan^{-1} \left( \frac{C_k}{B_k} \right)$$



# Dominios del Tiempo y de la Frecuencia ( $j\omega$ )



# *Consideraciones de simetría*

**Dependiendo de la simetría de la señal real, algunos coeficientes de la Serie de Fourier son nulos, es decir :**

***Si tiene simetría par:***

$$f(t) = f(-t) \Rightarrow C_k = 0$$

***Si tiene simetría impar:***

$$f(t) = -f(-t) \Rightarrow B_k = 0$$

***Si tiene simetría de media onda:***

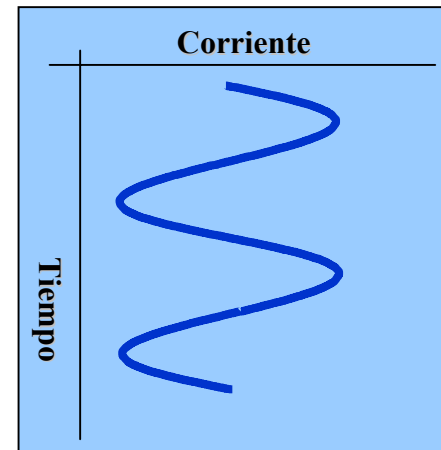
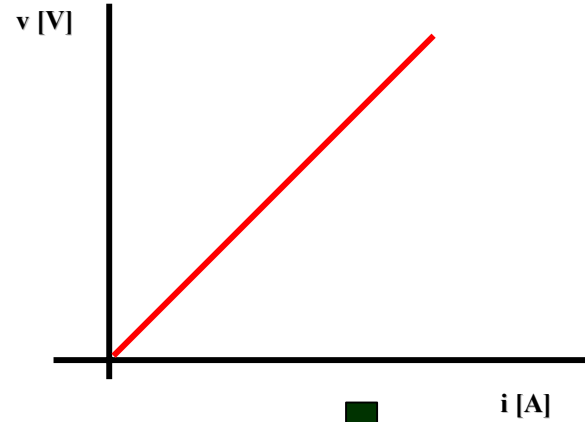
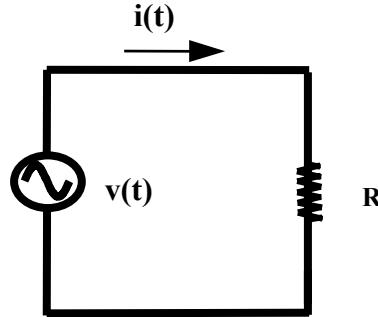
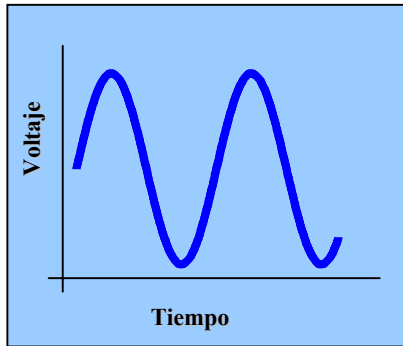
$$f(t) = -f\left(t \pm \frac{T}{2}\right) \Rightarrow \begin{array}{l} C_k = 0 \quad k \text{ par} \\ B_k = 0 \quad k \text{ par} \end{array}$$



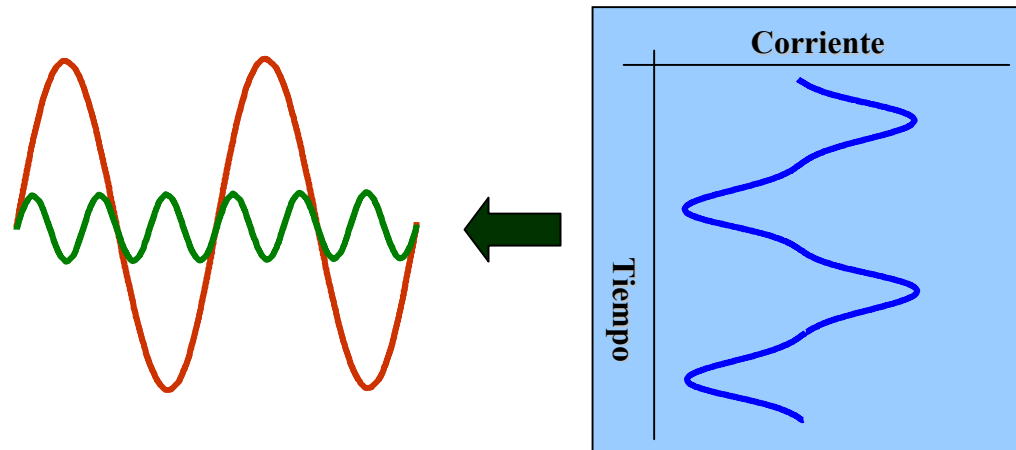
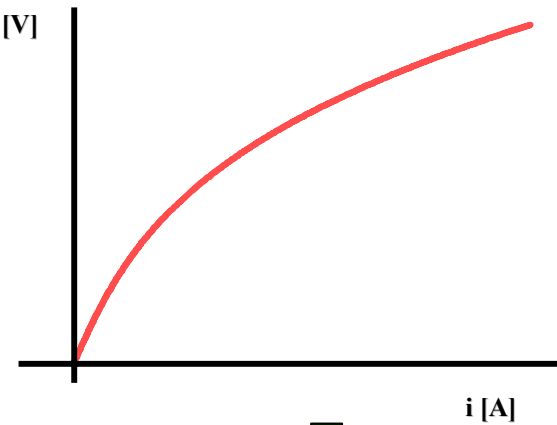
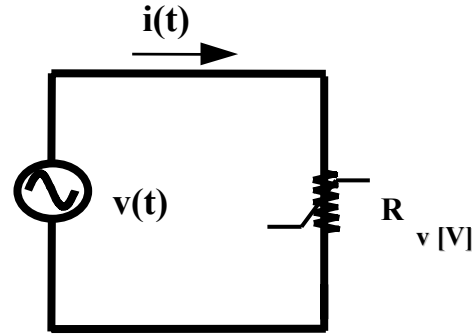
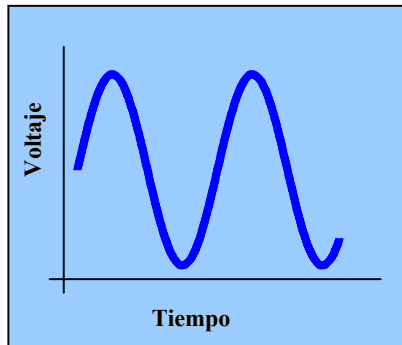
# Cómo se generan las perturbaciones armónicas ?



# Fuente de tensión senoidal y Carga lineal

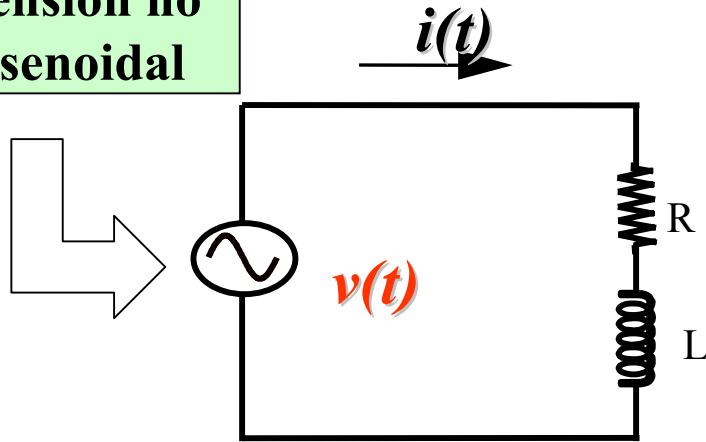


# Fuente de tensión senoidal y Carga no-lineal

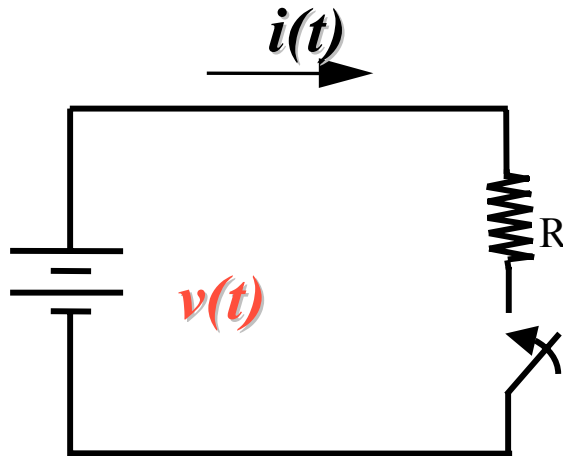
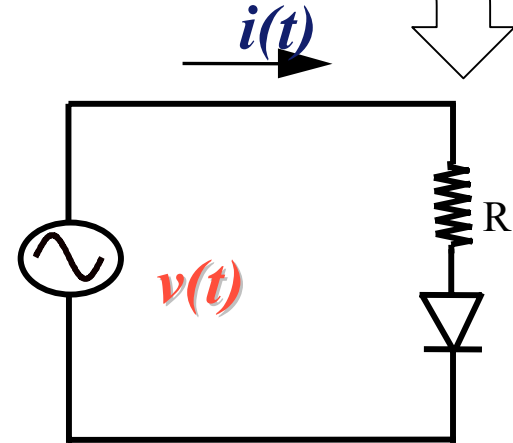


# Generación de armónicos

Carga lineal  
tensión no  
senoidal

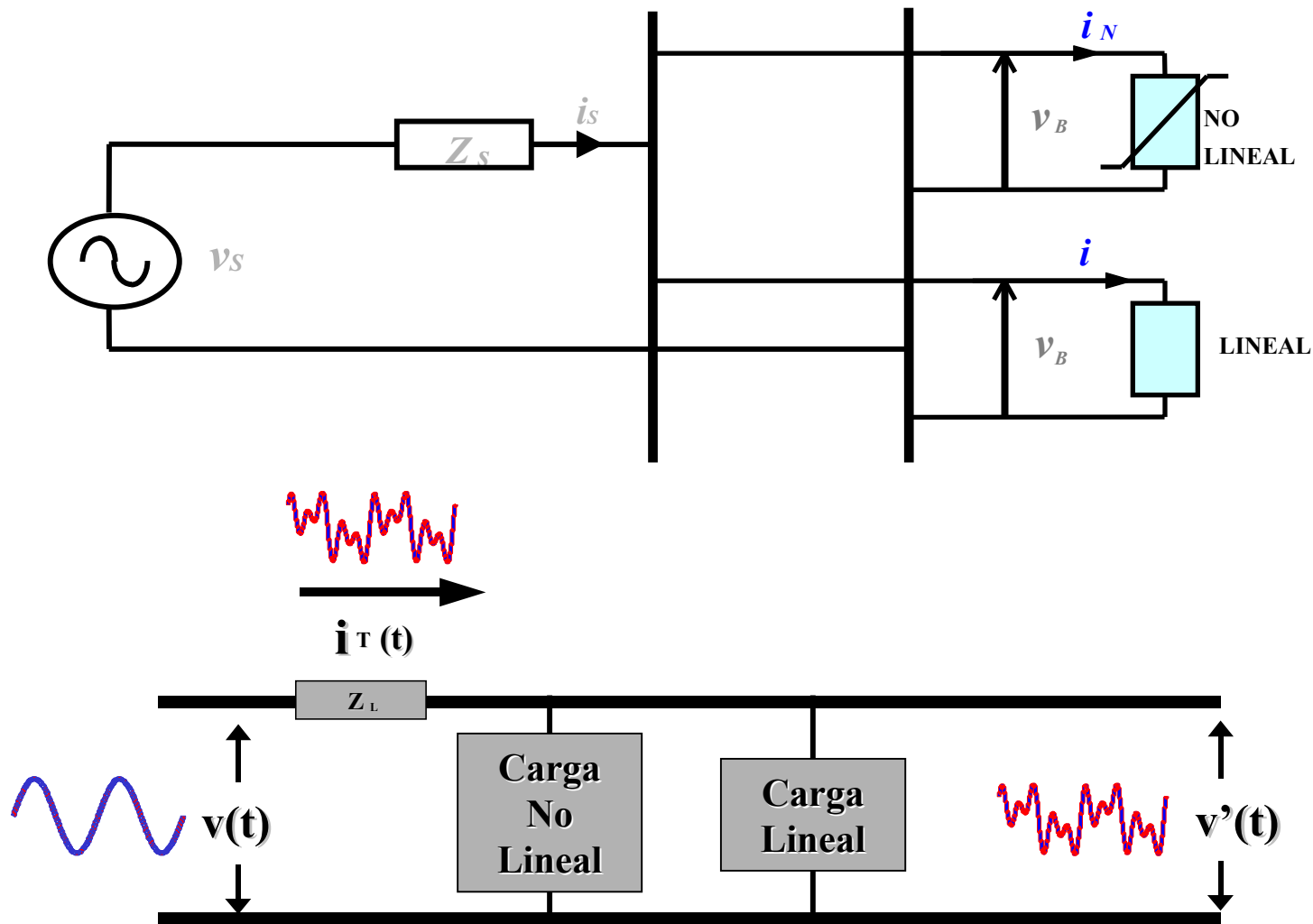


Carga no lineal



Carga variante  
en el tiempo

# Otras formas de generación: Generación de tensiones armónicas en una red eléctrica por propagación corrientes armónicas





# **Categorías de fuentes de generación armónicas**

## **➤ Fuentes de pequeña potencia y comportamiento predecible**

- Equipos domésticos y residenciales**

## **➤ Fuente de gran potencia y comportamiento aleatorio**

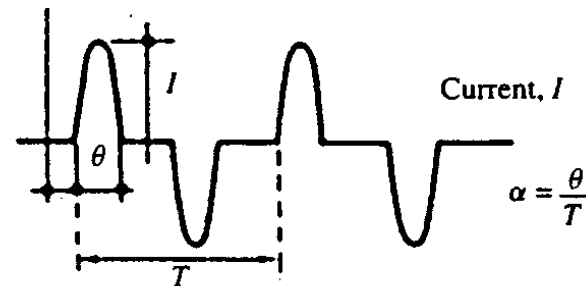
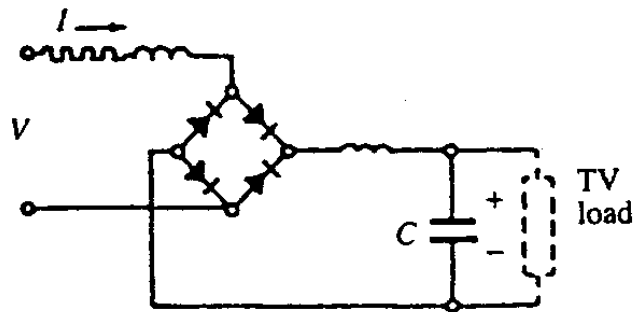
- Hornos de arco**

## **➤ Fuente de gran potencia y comportamiento predecible**

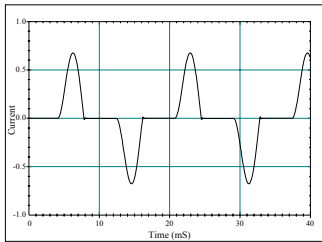
- Convertidores estáticos (HVdc, Hornos de fundición)**

# Fuentes de pequeña potencia

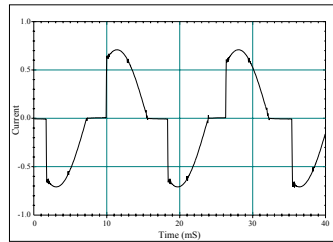
- Mayoritariamente monofásicos: TV's, PC's, convertidores.
- Individualmente no son significativos, pero su efecto combinado produce gran distorsión (armónicos impares).
- Su comportamiento es predecible y de estado estacionario o cuasiestacionario



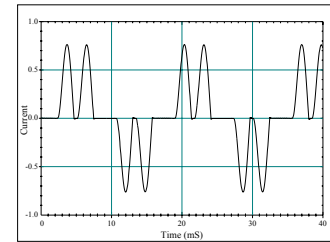
# Otros Ejemplos



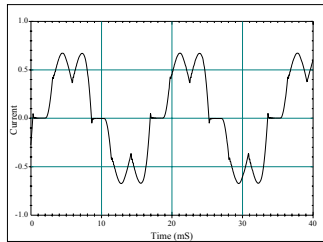
**Single Phase Power Supply (DAT=80%)**



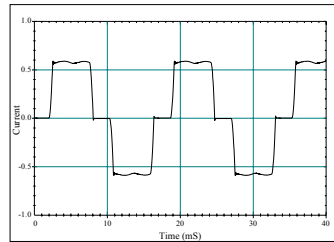
**Semiconverter (DAT=alto)**



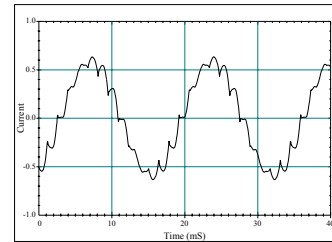
**6 Pulse Converter, capacitive smoothing, no series inductance (DAT=80%)**



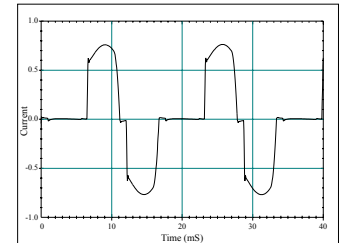
**6 Pulse Converter, capacitive smoothing with series inductance > 3%, or dc drive (DAT=40%)**



**6 Pulse Converter with large inductor for current smoothing (DAT=28%)**



**12 Pulse Converter (DAT=15%)**



**AC Voltage Regulator (DAT=varía con alfa)**



# Cómo afectan las perturbaciones armónicas ?



# GENERALIDADES

- La gravedad de su aparición depende de la susceptibilidad de la carga o la fuente
- Elementos Menos Susceptibles:  
*Generadores de Calor*
- Elementos Más Susceptibles: *Diseñados con entrada completamente Senoidal*
- Elementos con Susceptibilidad Intermedia:  
*Motores*

# Efectos de los armónicos

■ Probabilidad de resonancias serie y paralelo

■ Saturación de Transformadores

■ Reducción de la eficiencia del sistema

**Dimensionamiento**

■ Envejecimiento y reducción de vida útil de equipos

■ Probabilidad de operación incorrecta de

Relés

Controladores

Contadores

**Pérdidas grises**

■ Incremento de pérdidas

■ Incremento de ruido e interferencia

**Pérdidas Técnicas**

■ Existencia de torques vibratorios y de frenado



# Cómo se cuantifica el nivel de las perturbaciones armónicas ?

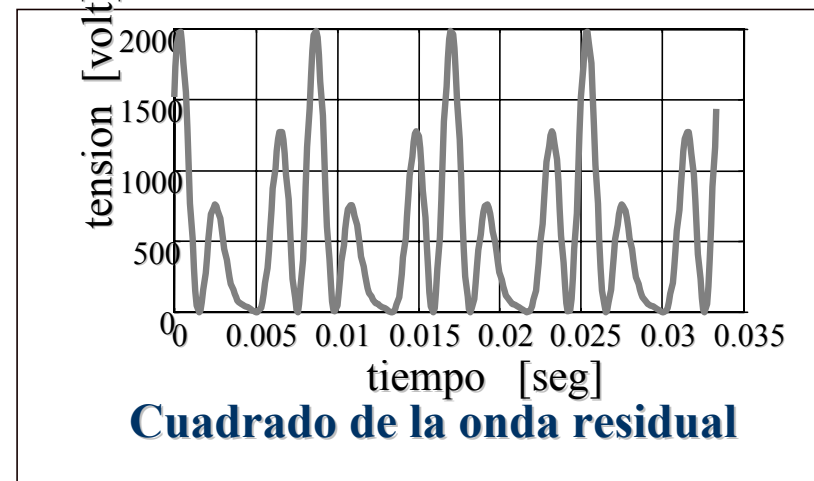
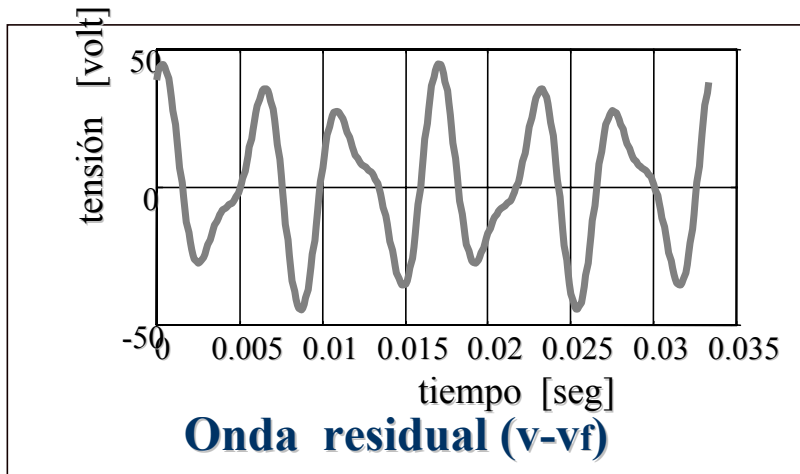
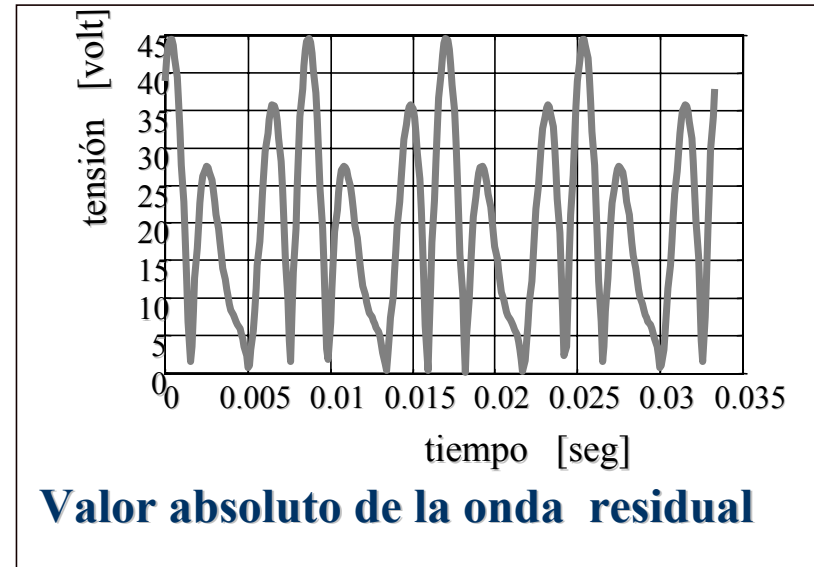
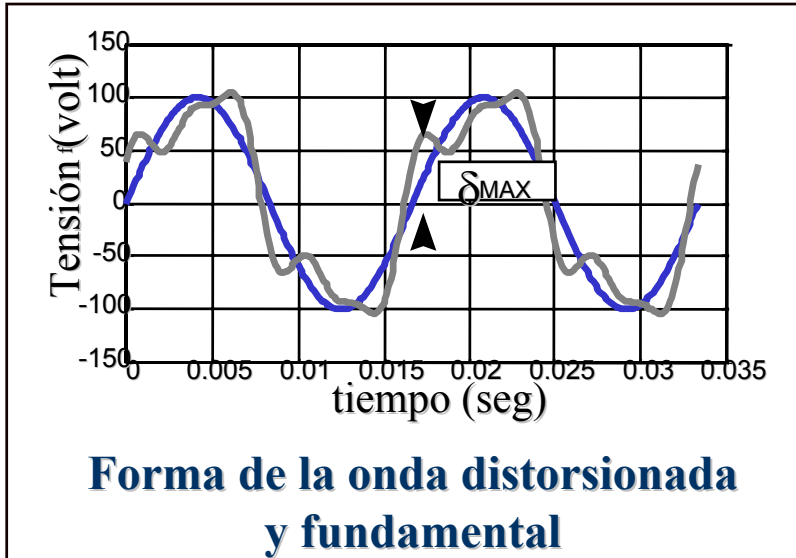


# Distorsión Armónica





# Distorsión Armónica



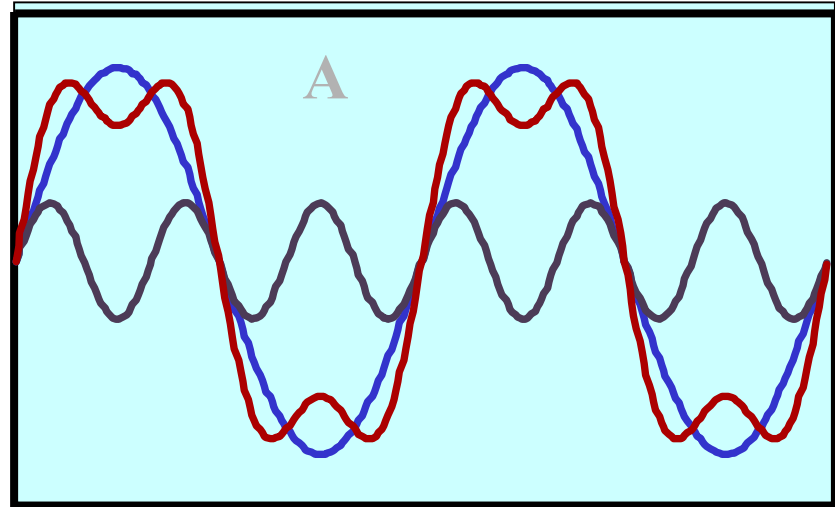
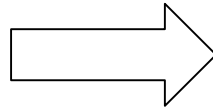
# Distorsión Armónica

$$DAT_V = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} V_n^2}}{V_1}$$

$$DAT_I = \frac{\sqrt{\sum_{n \neq 1} I_n^2}}{I_1}$$

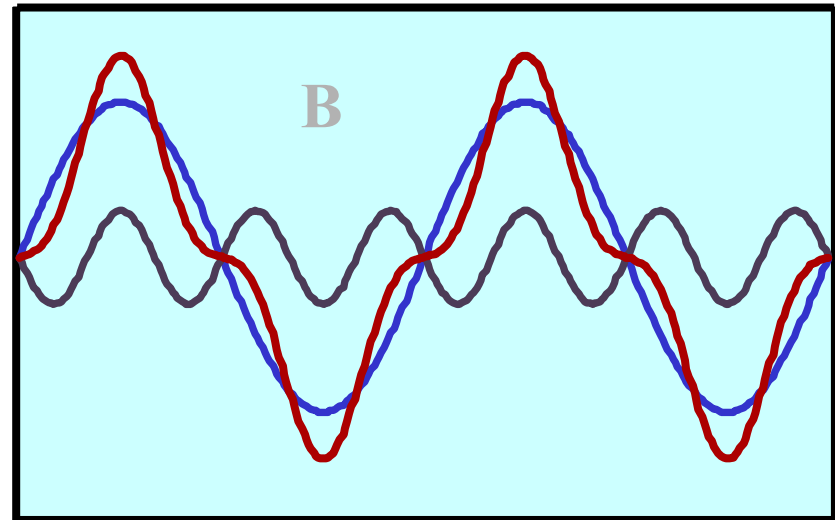
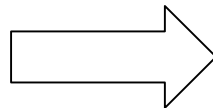
# Distorsión Armónica

armónicos  
en fase



$$D.A.T.A = D.A.T.B$$

Armónicos  
en contrafase



# Otros Índices

- **Factor de cresta.**

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

- **Factor de forma**

$$FF = \frac{V_{RMS}}{V_{AAV}}$$

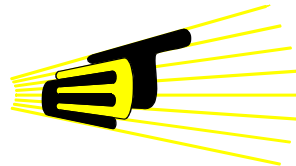
- **Factor de desviación**

$$FD = \delta_{max}$$

# CONTENIDO

---

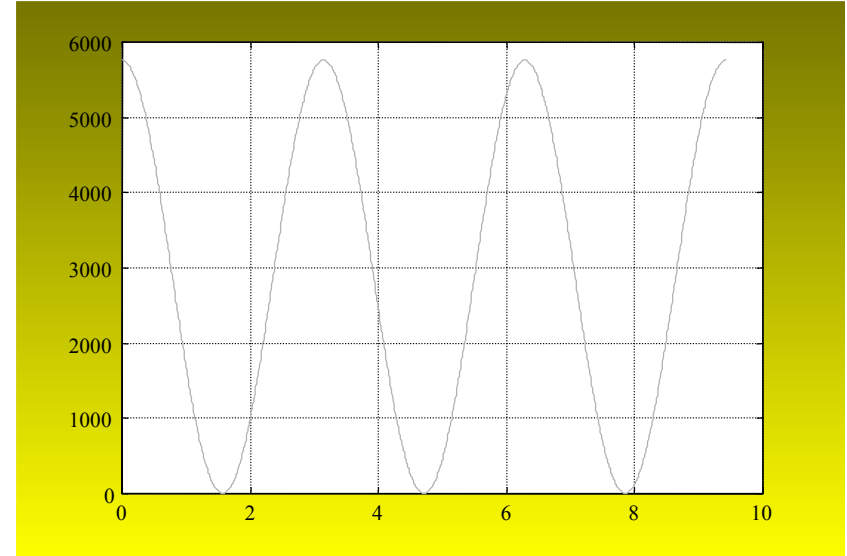
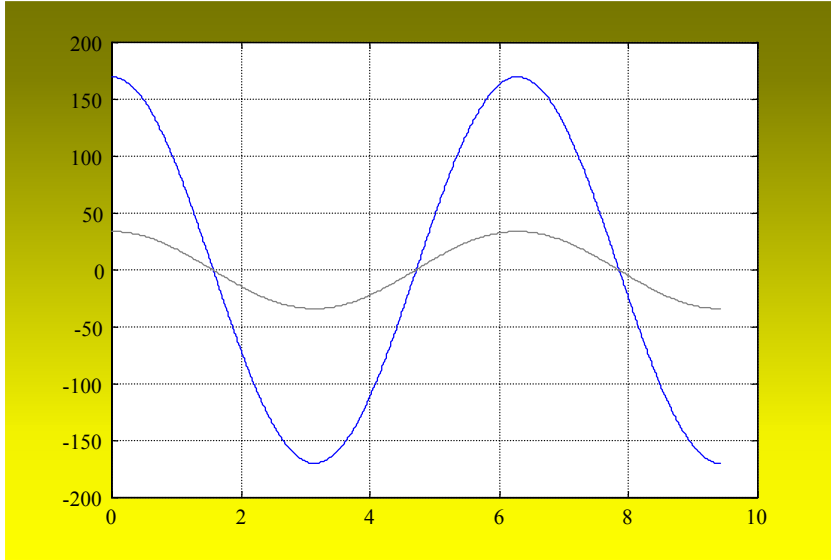
- **Introducción**
- **Compatibilidad Electromagnética**
- **Análisis general de Armónicos**
- ➔ ● **Definiciones básicas de potencia**
- **Modelo Propuesto**
- **Aplicación**
- **Observaciones y Conclusiones**



# Potencia instantánea en regímenes senoidales

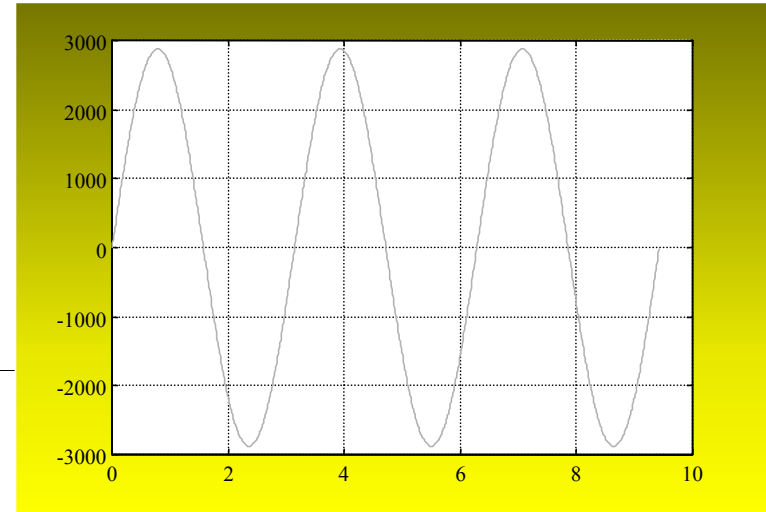
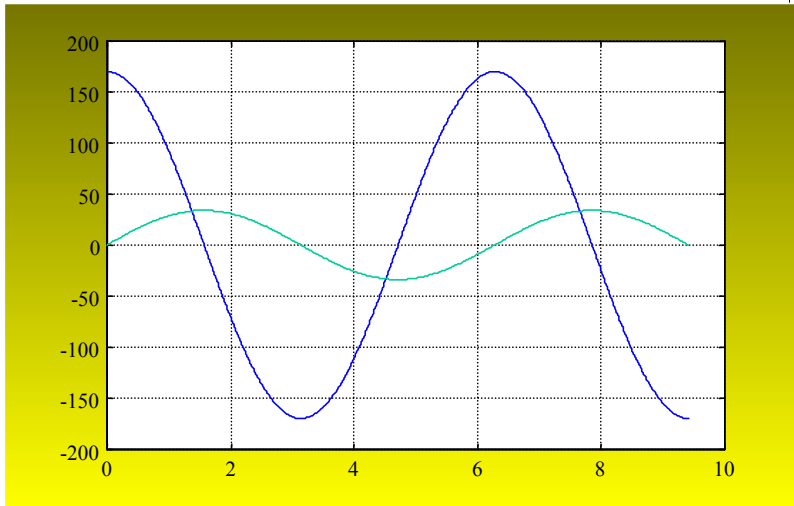
*Si la carga es una resistencia, la potencia consumida es:*

$$p(t) = v(t).i(t) = \frac{V_{RMS}^2}{R} (1 + \cos 2\omega t)$$



*Si la carga es una inductancia, la potencia consumida es:*

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = \frac{V_{RMS}^2}{\omega L} (\text{sen } 2\omega t)$$



**Finalmente, para cualquier carga:**

$$p(t) = V_{RMS} I_{RMS} \cos(\theta_v - \theta_i) \{1 + \cos(2\omega t)\} + V_{RMS} I_{RMS} \text{sen}(\theta_v - \theta_i) \text{sen}(2\omega t)$$

# POTENCIA ACTIVA

Es la potencia asociada con el trabajo útil. Es decir, se transforma de energía eléctrica a no eléctrica. Corresponde al valor medio de la potencia instantánea:

$$P = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} p(t) dt = P = V_{RMS} I_{RMS} \cos(\theta_v - \theta_i)$$

# POTENCIA REACTIVA

Es el valor pico de la oscilación de doble frecuencia de la potencia instantánea que tiene origen en los elementos almacenadores de energía. No produce trabajo útil.

$$Q_R = V_{RMS} I_{RMS} \sin(\theta_v - \theta_i)$$



## **POTENCIA APARENTE**

**Es la potencia asociada con el dimensionamiento que debe tener un sistema eléctrico**

$$S = V_{RMS} I_{RMS} = S^2 = P^2 + Q_R^2$$

## **FACTOR DE POTENCIA**

**Indica el grado de eficiencia de un sistema con respecto al trabajo útil.**

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

# Potencia instantánea en regímenes no senoidales

$$v(t) = \sum_n \sqrt{2} V_n \cos(n \omega_0 t)$$

$$i(t) = \sum_n \sqrt{2} I_n \cos(n \omega_0 t - \varphi_n)$$

$$p(t) = v(t) \cdot i(t)$$

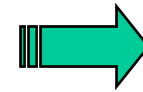
# SITUACIÓN NO SENOIDAL



$$v(t) = \sqrt{2}V_{eff1} \cos(\omega t) + \sqrt{2}V_{eff3} \cos(3\omega t)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I_{eff1} \cos(\omega t - \phi_1) + \sqrt{2}I_{eff3} \cos(3\omega t - \phi_3) + \sqrt{2}I_{eff5} \cos(5\omega t - \phi_5)$$

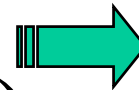
$$V_{eff1} I_{eff1} \cos \phi_1 * (1 + \cos 2\omega t)$$



*P. Activa*

$$V_{eff3} I_{eff3} \cos \phi_3 * (1 + \cos 6\omega t)$$

$$V_{eff1} I_{eff1} \text{sen} \phi_1 * (\text{sen} 2\omega t)$$



*P. Reactiva*

$$V_{eff3} I_{eff3} \text{sen} \phi_3 * (\text{sen} 6\omega t)$$

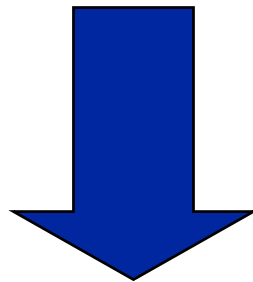
$$V_{eff1} I_{eff3} \cos \phi_3 * (\cos 2\omega t) + V_{eff1} I_{eff3} \cos \phi_3 * (\cos 4\omega t)$$

$$V_{eff1} I_{eff3} \sin \phi_3 * (\sin 2\omega t) + V_{eff1} I_{eff3} \sin \phi_3 * (\sin 4\omega t)$$

$$V_{eff1} I_{eff5} \cos \phi_5 * (\cos 4\omega t) + V_{eff1} I_{eff5} \cos \phi_5 * (\cos 6\omega t)$$

$$V_{eff1} I_{eff5} \sin \phi_5 * (\sin 4\omega t) + V_{eff1} I_{eff5} \sin \phi_5 * (\sin 6\omega t)$$

+ .....



**Distorsión**

$$V_{eff1} I_{eff1} \cos \phi_1 * (1 + \cos 2\omega t)$$

→ P

$$V_{eff3} I_{eff3} \cos \phi_3 * (1 + \cos 6\omega t)$$

$$V_{eff1} I_{eff1} \sin \phi_1 * (\sin 2\omega t)$$

→ Q

$$V_{eff3} I_{eff3} \sin \phi_3 * (\sin 6\omega t)$$

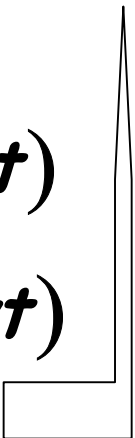
$$V_{eff1} I_{eff3} \cos \phi_3 * (\cos 2\omega t) + V_{eff1} I_{eff3} \cos \phi_3 * (\cos 4\omega t)$$

$$V_{eff1} I_{eff3} \sin \phi_3 * (\sin 2\omega t) + V_{eff1} I_{eff3} \sin \phi_3 * (\sin 4\omega t)$$

$$V_{eff1} I_{eff5} \cos \phi_5 * (\cos 4\omega t) + V_{eff1} I_{eff5} \cos \phi_5 * (\cos 6\omega t)$$

$$V_{eff1} I_{eff5} \sin \phi_5 * (\sin 4\omega t) + V_{eff1} I_{eff5} \sin \phi_5 * (\sin 6\omega t)$$

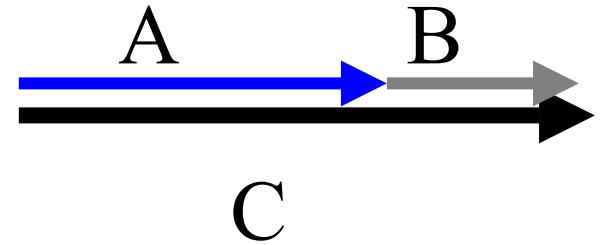
D





## □ En fase

$$C=A+B$$

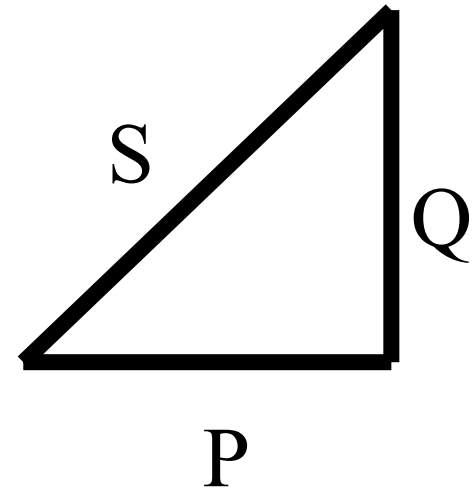


## □ Ortogonalidad

*Norma "2"*

*Teorema de Pitágoras en  $R^2$*

$$S^2 = P^2 + Q^2$$



# RESPUESTAS: POTENCIA ACTIVA

**Para el caso senoidal :**

$$P = V_{RMS} I_{RMS} \cos(\varphi)$$

**Para el caso no senoidal :**

$$P = \sum_n V_n I_n \cos \varphi_n$$



# POTENCIA APARENTE

**Tensión y corriente no senoidales :**

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_n V_n^2} \quad I_{RMS} = \sqrt{\sum_n I_n^2}$$

$$S = \left[ V_1 \sqrt{1 + \sum_{n \neq 1} \left( \frac{V_n}{V_1} \right)^2} \quad I_1 \sqrt{1 + \sum_{n \neq 1} \left( \frac{I_n}{I_1} \right)^2} \right]$$

$$S = V_1 I_1 \sqrt{1 + DAT_v^2} \sqrt{1 + DAT_I^2}$$



# FACTOR DE POTENCIA

$$F.P. = \frac{P}{S} = \frac{\sum_n V_n I_n \cos \varphi_n}{V_{\text{RMS}} I_{\text{RMS}}}$$

$$F.P. = \frac{\sum_n V_n I_n \cos \varphi_n}{V_1 I_1 \sqrt{(1 + DAT_V^2)(1 + DAT_I^2)}}$$



# QUE ES LA REACTIVA???????



# MODELOS PROPUESTOS

EN 1927, BUDEANU Sugiere:

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D_B^2$$

$$P = \sum_{n=0} V_n * I_n * \cos \phi_n$$

$$Q_B = \sum_{n=0} V_n I_n \text{ sen } \phi_n$$

$$S = V_{RMS} I_{RMS}$$



$$D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2}$$



# POTENCIA FICTICIA, Sugerida por FRYZE, 1931

$$S^2 = P^2 + Q_F^2$$

$$P = \sum_n V_n I_n \cos \phi_n$$

$$S = V_{RMS} I_{RMS}$$

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2}$$

# POTENCIA EN SISTEMAS TRIFÁSICOS

Para sistema trifásicos, el diccionario estándar de la IEEE establece que las Potencias de Budeanu son la suma algebraica de las potencias obtenidas por fase.

Es decir :

$$\begin{aligned} P &= \sum_k P_k \\ Q_B &= \sum_k Q_{B,k} \\ D_B &= \sum_k D_{B,k} \end{aligned} \quad k = R, S, T$$

# POTENCIA EN SISTEMAS TRIFÁSICOS

La potencia aparente trifásica tiene dos definiciones :

- La potencia aparente aritmética

$$S_A = \sum_k S_k = \sum_k \sqrt{P_k^2 + Q_{B,k}^2 + D_{B,k}^2} \quad k = R, S, T$$

- La potencia aparente (vectorial)

$$S_V = \sqrt{\left(\sum_k P_k\right)^2 + \left(\sum_k Q_{B,k}\right)^2 + \left(\sum_k D_{B,k}\right)^2} \quad k = R, S, T$$

# POTENCIA EN SISTEMAS TRIFÁSICOS

**El factor de potencia en sistemas trifásicos se define de dos formas :**

- **Factor de potencia aritmético :**

$$FP_A = \frac{P}{S_A}$$

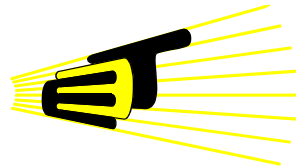
- **Factor de potencia (vectorial)**

$$FP_V = FP = \frac{P}{S_V}$$

# CONTENIDO

---

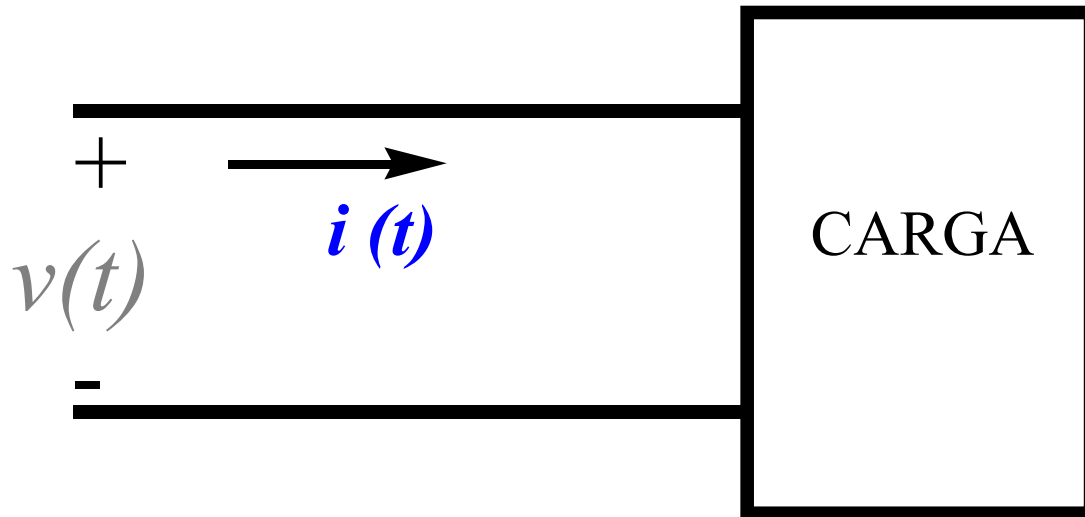
- **Introducción**
- **Compatibilidad Electromagnética**
- **Análisis general de Armónicos**
- **Definiciones básicas de potencia**
- ➔ ● **Modelo Propuesto**
- **Aplicación**
- **Observaciones y Conclusiones**





**El modelo propuesto es a tensión constante y discrimina la corriente demandada por la carga**

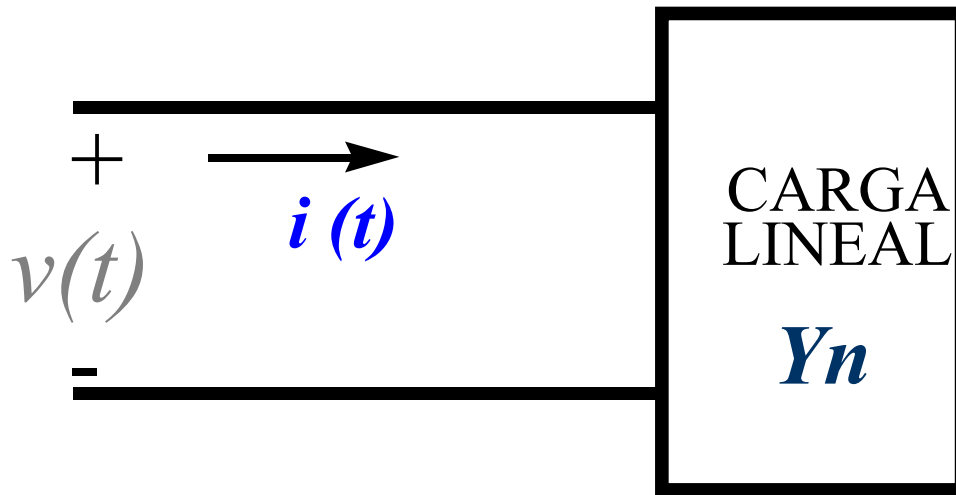
- **Tensión de servicio senoidal (Carga lineal o no lineal)**
- **Tensión de servicio no-senoidal (Carga lineal o no-lineal)**



# Tensión senoidal y carga lineal

---

$$v(t) = \sqrt{2}V_1 \cos(\omega_1 t)$$



$$Y = G + jB = Y \angle -\varphi$$

$$G = Y \cos \varphi$$

$$B = -Y \operatorname{sen} \varphi$$

$$i(t) = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \varphi) = i_a(t) + i_m(t)$$

$$\begin{aligned}
 i_a(t) &= \sqrt{2} I \cos \varphi \cos(\omega t) \\
 &= \sqrt{2} I_a \cos(\omega t) = k_v v(t) = Gv(t)
 \end{aligned}$$

**$i_a(t)$ : Es la componente de la corriente en fase con la onda de tensión.**

$$I_a = I \cos \varphi = GV$$

$$\begin{aligned}
 i_m(t) &= \sqrt{2} I \sin \varphi \sin(\omega t) \\
 &= \sqrt{2} I_m \sin(\omega t) = k_1 \frac{dv(t)}{dt} = B \frac{dv(t)}{dt}
 \end{aligned}$$

**$i_m(t)$ : Es la componente de la corriente que está en cuadratura con la onda de tensión.**

$$I_m = I \sin \varphi = -BV$$

• **Cómo  $i_a(t)$  e  $i_m(t)$  son ortogonales**  $\Rightarrow I = \sqrt{I_a^2 + I_m^2}$

• **Las potencias del sistema son:**

$$P = VI_a = VI \cos \varphi \quad \Rightarrow \text{Potencia Activa}$$

$$Q_m = VI_m = VI \sin \varphi \quad \Rightarrow \text{Potencia de Magnetización}$$

$$S = V_1 I = \sqrt{P^2 + Q_m^2} \quad \Rightarrow \text{Potencia Aparente}$$

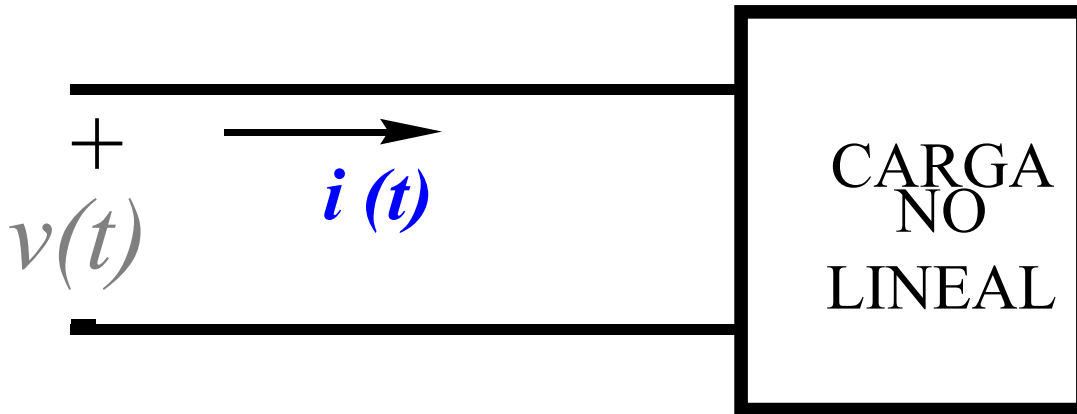
• **La eficiencia del sistema con respecto a la transmisión óptima de potencia activa se evalúa mediante el factor de potencia:**

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{I_a}{I} = \frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_m^2}}$$

# Tensión senoidal y carga no lineal

---

$$v(t) = \sqrt{2}V_1 \cos(\omega_1 t)$$



$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \cos(\omega_0 t + \beta_1) + \sum_{n \neq 1} \sqrt{2}I_n \cos(n\omega_0 t + \beta_n)$$

**Al segundo término de la ecuación se le llama “corriente generada”.**

$$i_g(t) = \sum_{n \neq 1} \sqrt{2} I_n \cos(n\omega_0 t + \beta_n)$$

**El valor eficaz es igual a:**  $I_g = \sqrt{\sum_{n \neq 1}^{\infty} I_n^2}$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^N I_n^2} = \sqrt{I_a^2 + I_m^2 + I_g^2}$$

## Las potencias del sistema son:

$$P = VI_a = VI \cos \varphi \quad \Rightarrow \quad \text{Potencia Activa}$$

$$Q_m = VI_m = VI \sin \varphi \quad \Rightarrow \quad \text{Potencia de Magnetización}$$

$$D_g = V_1 I_g \quad \Rightarrow \quad \text{Potencia de Armónicos generados}$$

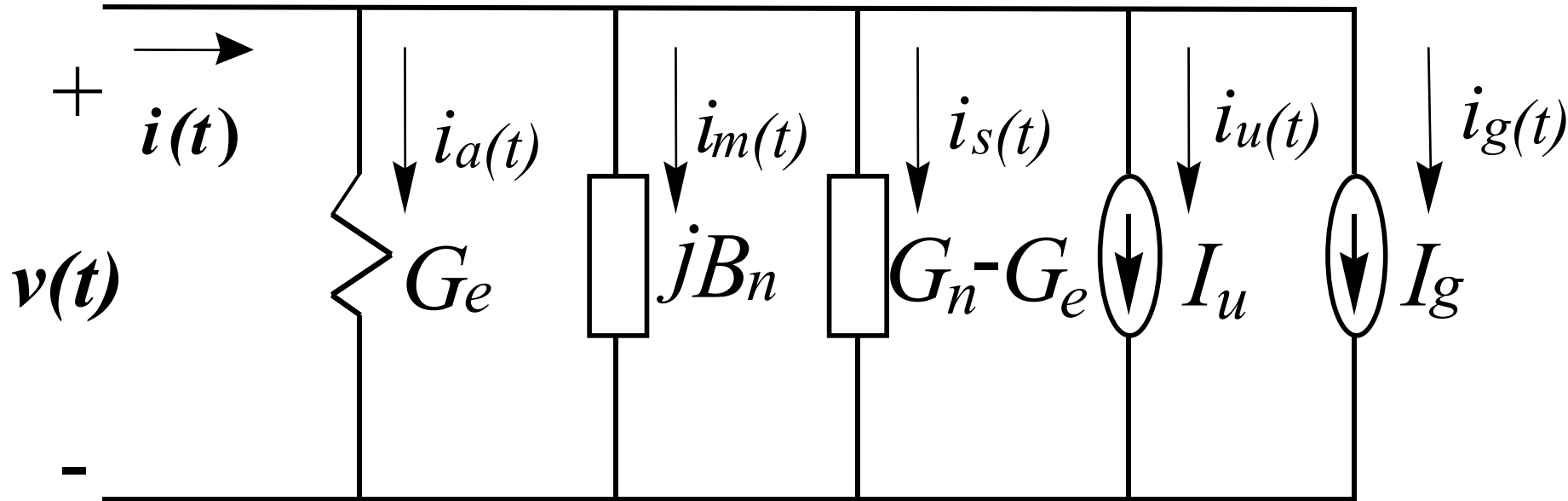
$$S = V_1 I = \sqrt{P^2 + Q_m^2 + D_g^2} \quad \Rightarrow \quad \text{Potencia Aparente}$$

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{I_a}{I} = \frac{I_a}{\sqrt{I_a^2 + I_m^2 + I_g^2}}$$

**Finalmente, se presenta el  
desacople de efectos para un  
sistema trifásico  
desbalanceado y tensión no  
senoidal**

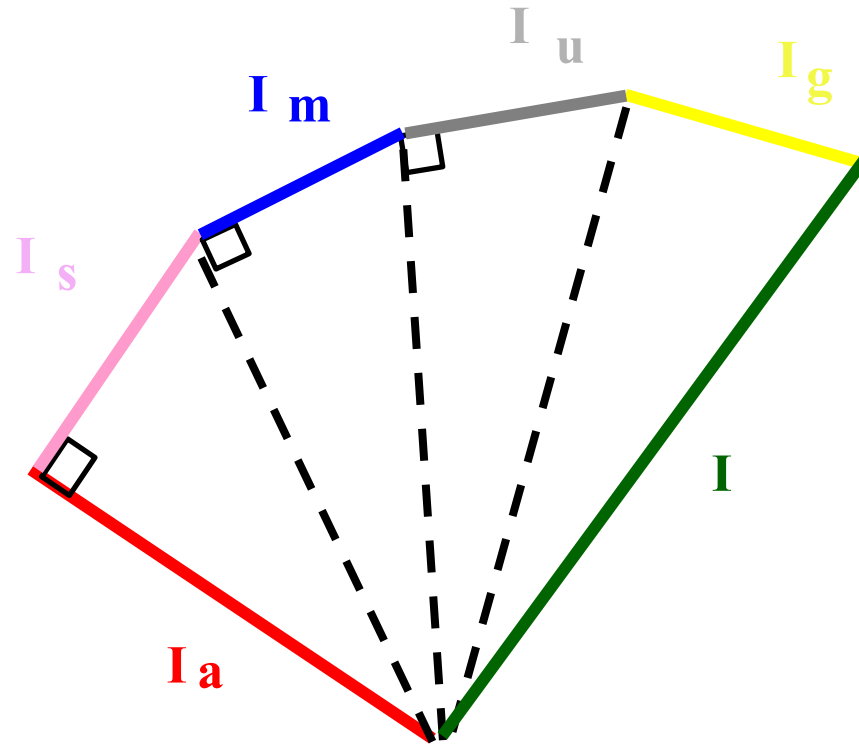


# Modelo propuesto de potencias



**Modelo general de carga para un sistema trifásico desbalanceado con neutro aislado y tensión de alimentación con armónicos**

# Diagrama fasorial de corrientes



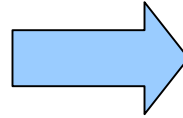
$$S^2 = U^2 I^2 = U^2 I_a^2 + U^2 I_s^2 + U^2 I_m^2 + U^2 I_u^2 + U^2 I_g^2$$

$$S^2 = P^2 + D_s^2 + Q_m^2 + D_u^2 + D_g^2$$

# Potencia Activa

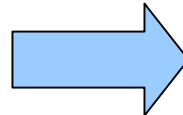
$$P = I_a V$$

*Asociada al  
trabajo útil*



La corriente demandada es la componente de la corriente instantánea total en fase con la onda de tensión :

$$i_a(t) = G_e v(t)$$

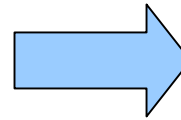


$$I_a = G_e V$$

Valor eficaz

# Potencia Residual

*No realiza trabajo  
trabajo útil*



$$D_s = V I_s$$



La corriente demandada depende de la variación de la conductancia a la frecuencia armónica con respecto a la conductancia equivalente :

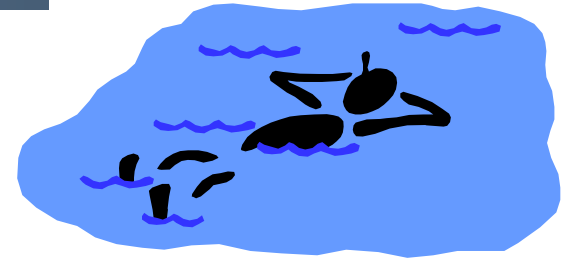
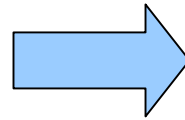
$$i_s(t) = \sum_{n=1}^N \sqrt{2} (G_n - G_e) V_n \cos(n\omega_1 t)$$

$$I_s = \sqrt{\sum_{n=1}^N (G_n - G_e)^2 V_n^2}$$

**Valor eficaz**

# Potencia de Magnetización

*No realiza trabajo  
trabajo útil*



**La corriente demandada es necesaria para la magnetización de los materiales**

$$i_m(t) = -B_n \frac{dv(t)}{d(n\omega_1 t)} = \sum \sqrt{2} B_n V_n \text{sen}(n\omega_1 t)$$

$$I_m = \sqrt{\sum_{n=1}^N B_n^2 V_n^2} \quad I_m = \sqrt{\sum_{n=1}^N \left(\frac{Q_n}{V_n}\right)^2}$$

**Valor eficaz**

# Potencia de Magnetización

$$Q_m = VI_m = V \sqrt{\sum_{n=1}^N \left( \frac{Q_n}{V_n} \right)^2}$$

$$Q_n = V_n I_n \text{ sen } \phi_n$$

**Potencia de magnetización del armónico n**

# Potencia de Armónicos Generados

La corriente demandada es debida a la no linealidad de la cargas. Se identifica por no tener armónicos comunes a la señal de tensión

$$\dot{i}_g(t) = \sqrt{2} \sum_{n_g \neq n}^M I_{n_g} \text{sen}(n_g \omega t + \beta_{n_g})$$

$$I_g = \sqrt{\sum_{n_g \neq n}^M I_{n_g}^2}$$

*Valor eficaz*

$$D_g = VI_g$$

# Potencia de Desbalance

La corriente demandada debido al desbalance del sistema

$$i_u(t) = i(t) - i_b(t)$$

$$I_u = \sqrt{I^2 - I_b^2}$$

*Valor eficaz*

$$D_u = VI_u$$



# Potencia Aparente y Potencia Reactiva

$$S^2 = P^2 + D_s^2 + Q_m^2 + D_u^2 + D_g^2$$
$$S^2 = P^2 + Q_r^2$$

Potencia reactiva



$$Q_r = \sqrt{S^2 - P^2}$$



$$Q_r = \sqrt{Q_m^2 + D_s^2 + D_g^2 + D_u^2}$$

# Factor de Potencia

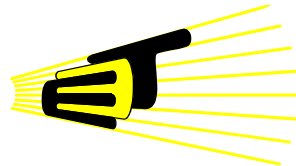
$$FP = \frac{P}{S} = \frac{I_a}{I}$$

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + D_s^2 + Q_m^2 + D_g^2 + D_u^2}} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q_r^2}}$$

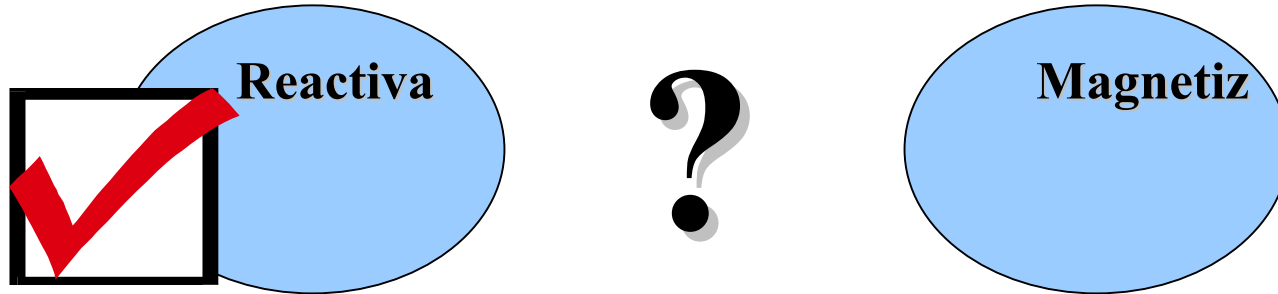
# CONTENIDO

---

- **Introducción**
- **Compatibilidad Electromagnética**
- **Análisis general de Armónicos**
- **Definiciones básicas de potencia**
- **Modelo Propuesto**
- ➔ ● **Aplicación**
- **Observaciones y Conclusiones**



# Compensación:



$$f.p \geq 0.9 \quad \longrightarrow \quad \cancel{f.p} \stackrel{?}{=} \frac{P}{S}$$

$$f.p = \frac{1}{\sqrt{1 + FD_m^2 + FD_u^2 + FD_s^2 + FD_g^2}} \neq \cos(\theta_v - \theta_i)$$

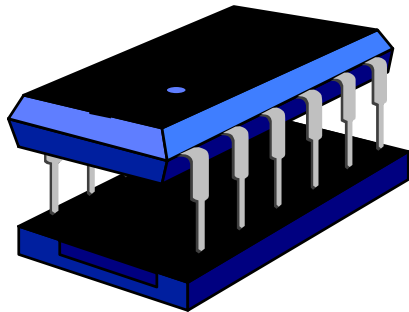
# Importancia de la calidad de potencia

\$

**Medida errónea  
de Q, fp y P**

\$

**Facturación  
incorrecta**

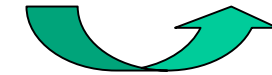
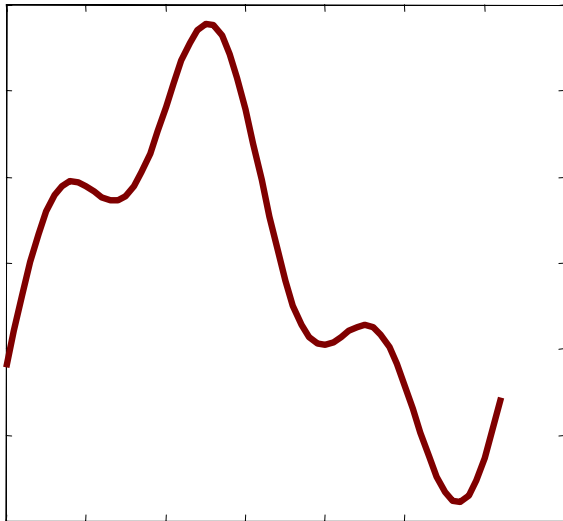


**Importancia del  
algoritmo de  
cálculo**

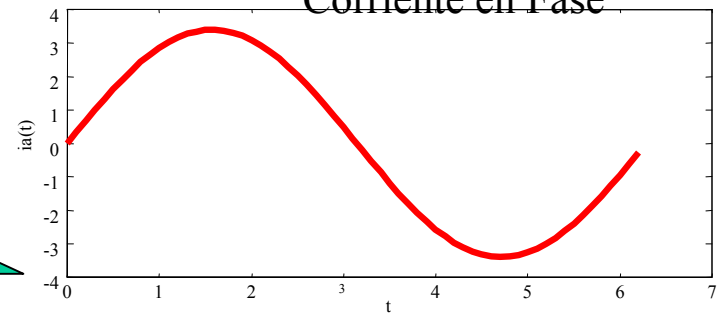
# Reactiva: Medición Correcta ?

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i_{\pi/2}(t) dt$$

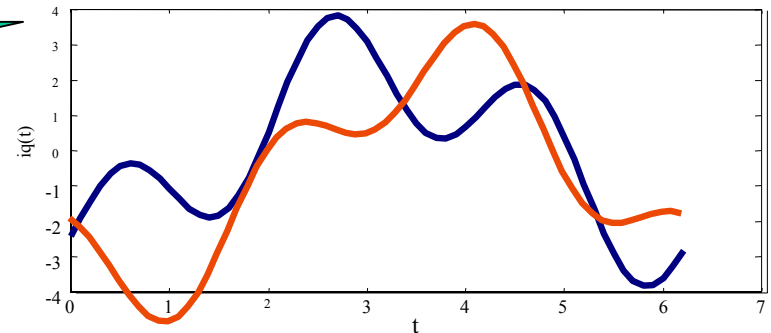
$i(t)$



Corriente en Fase



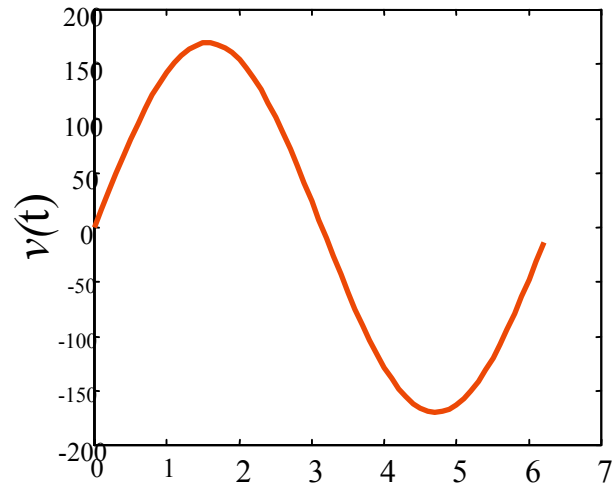
Corriente en Cuadratura  
Corriente desfasada T/4



**Para  $v(t)$**

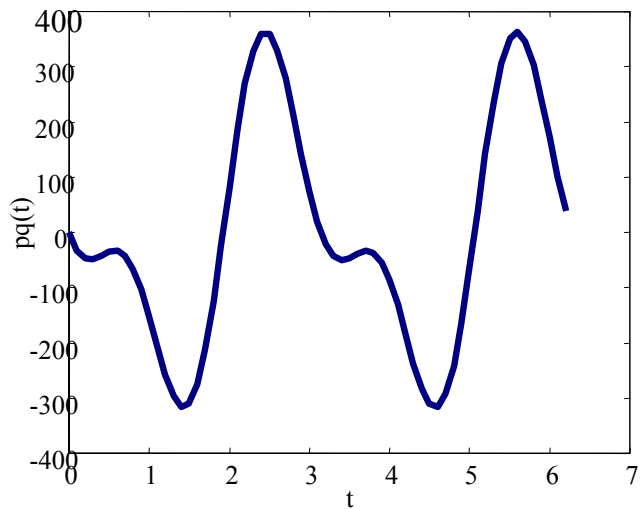


*Tensión Senoidal*



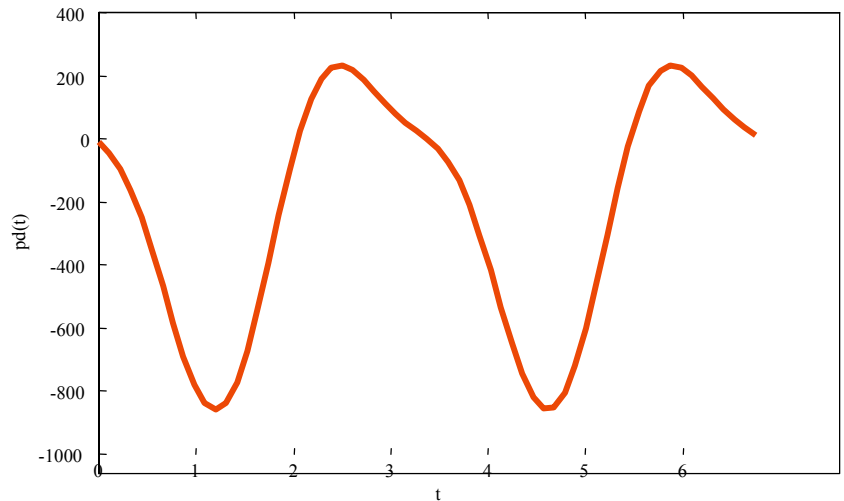
**Potencia instantánea en cuadratura**

$$p_q(t) = i_q(t) * v(t)$$



**Potencia instantánea desfasada**

$$p_d(t) = i_d(t) * v(t)$$



Si la potencia activa es igual a:



$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = 288$$

• Componente en cuadratura

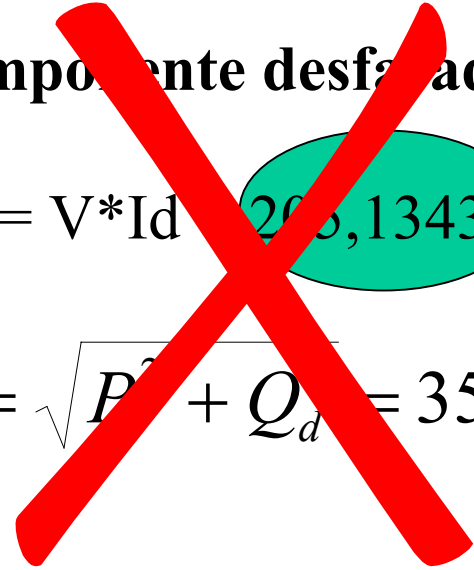
$$Q_f = V * I_q = 251,1063$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q_f^2} = 382,0973$$

• Componente desfasada

$$Q_d = V * I_d = 205,1343$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q_d^2} = 353,5875$$



Potencia aparente o de dimensionamiento:



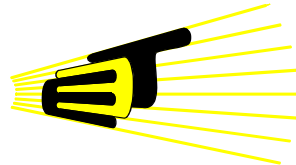
$$S = V * I = 382,0973$$



# CONTENIDO

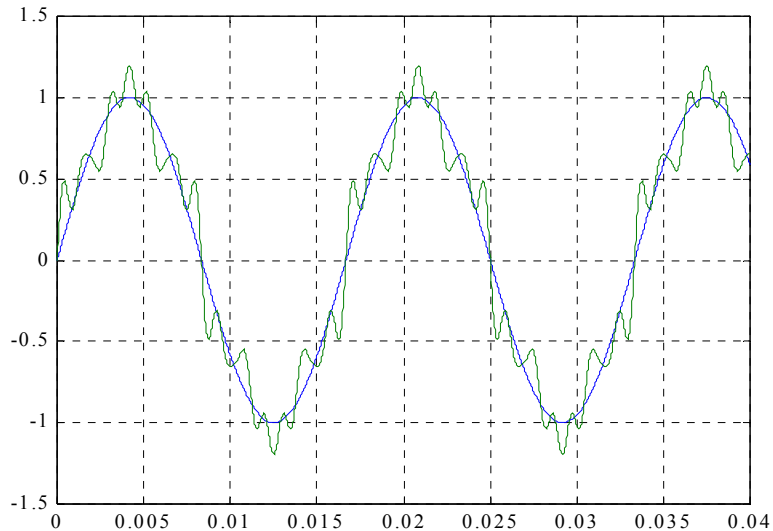
---

- **Introducción**
- **Compatibilidad Electromagnética**
- **Análisis general de Armónicos**
- **Definiciones básicas de potencia**
- **Modelo Propuesto**
- **Aplicación**
- **Observaciones y Conclusiones**



# Importancia de la calidad de potencia

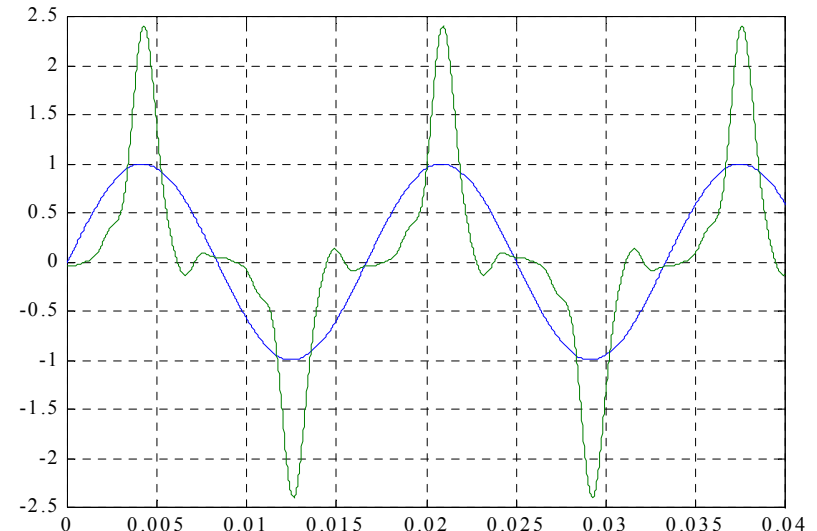
¿De quien depende?



**Tensión**



**EMPRESAS DISTRIBUIDORAS**



**Corriente**



**USUARIOS**

# ***QUIEN PIERDE***



EMPRESA

TODOS

UARIOS



## **GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN SISTEMAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA**

**Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**Carrera 27, Calle 9. Ciudad Universitaria. — A. A. 678**

**Conmutador: +(7) 6344000, Extensiones: 2373 - 2479**

**Teléfonos: +(7) 6342085 / 6359622 — Fax: +(7) 6451156**

**BUCARAMANGA — COLOMBIA**

**[jfpetit@uis.edu.co](mailto:jfpetit@uis.edu.co), [gilberto@uis.edu.co](mailto:gilberto@uis.edu.co), [gaby@uis.edu.co](mailto:gaby@uis.edu.co), [jgplata@uis.edu.co](mailto:jgplata@uis.edu.co),  
[arjaus@uis.edu.co](mailto:arjaus@uis.edu.co)**