# Tipos de Conversión



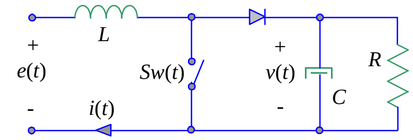
**Problema** Ilustrar los tipos de conversión de energía eléctrica.


**Tipos**:

- Buck
- Boost
- Buck-Boost
- Cuk
- Zepic

**Aplicaciones**:

- Reguladores de tensión
- Reductores / Elevadores de tensión
- etc.



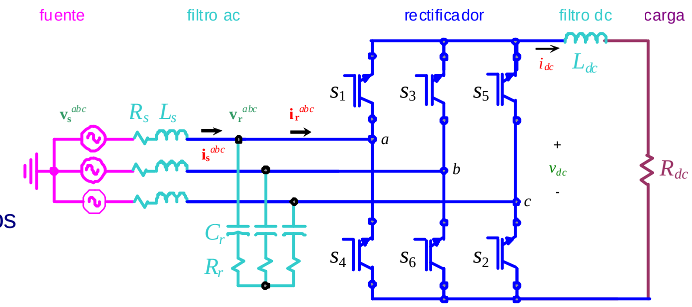


**Tipos**:

- Trifásicos/Monofásicos
- de Voltaje/Corriente

**Aplicaciones**:

- Rectificadores de V / I
- Drives
- Compensadores de Reactivos
- Filtro Activo



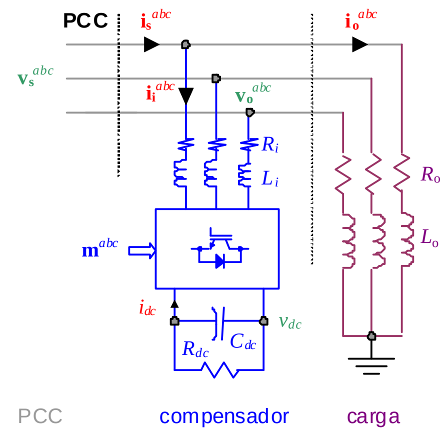


**Tipos**:

- Trifásicos/Monofásicos
- de Voltaje/Corriente

**Aplicaciones**:

- Inversores de tensión / corriente
- Drives
- Compensadores de Reactivos
- Filtro Activo





**Tipos**:

- Trifásicos/Monofásicos
- Indirectos / Directos
- Cicloconversor
- Matricial

**Aplicaciones**:

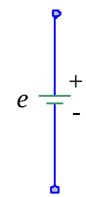
- Drives
- HVDC

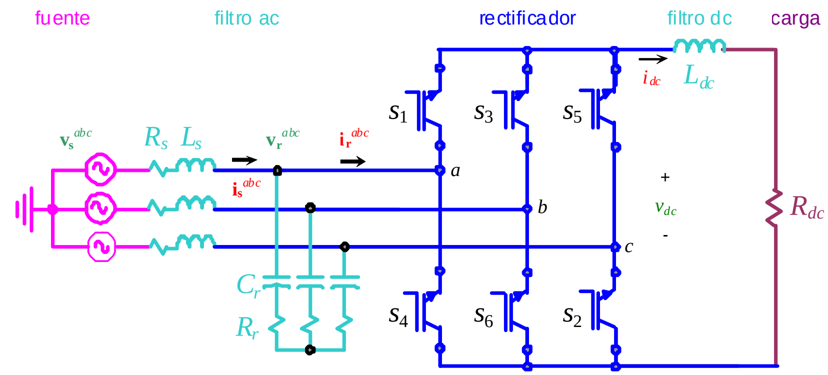
# Clasificación según Variables



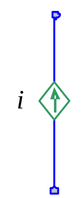
**Problema** Clasificar los convertidores estáticos según las variables eléctricas

La variable natural de encontrar es la tensión en su vesión AC (red eléctrica a 50 Hz y magnitud constante) y DC (baterías).

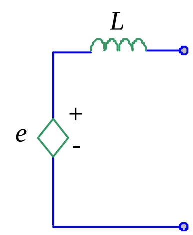


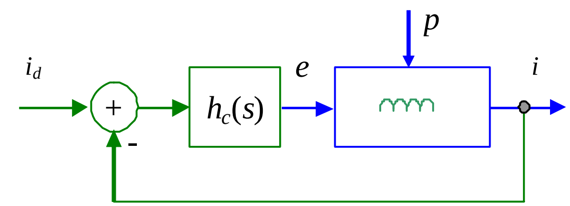




La variable no-natural de encontrar es la corriente. Esta debe generarse a través de un esquema de control en L.C.




=>

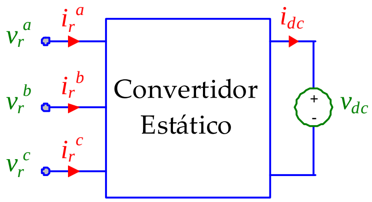


# Principios de Conservación de Potencia y Notación



**Problema** Establecer nociones básicas de conservación de potencia y estandarizar la notación




Si el Convertidor Estático no tiene elementos que pierden energía (resistencias) ni almacenan energía (inductores, condensadores), entonces,

$$p_r(t) = p_{dc}(t)$$

$$v_{ra}(t) \cdot i_{ra}(t) + v_{rb}(t) \cdot i_{rb}(t) + v_{rc}(t) \cdot i_{rc}(t) = i_{dc}(t) \cdot v_{dc}(t)$$

Este es el caso si se consideran los switches ideales.

Si hay elementos que almacenan energía, entonces se cumple,

$$\frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_r(t)\, dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p_{dc}(t)\, dt$$

$$\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v_{ra}(t) \cdot i_{ra}(t) + v_{rb}(t) \cdot i_{rb}(t) + v_{rc}(t) \cdot i_{rc}(t)\, dt = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i_{dc}(t) \cdot v_{dc}(t)\, dt$$

$$P_r = P_{dc}$$

En el caso de que hayan pérdidas en el Convertidor Estático, entonces,

$$P_r = P_{dc} + P_{losses}$$

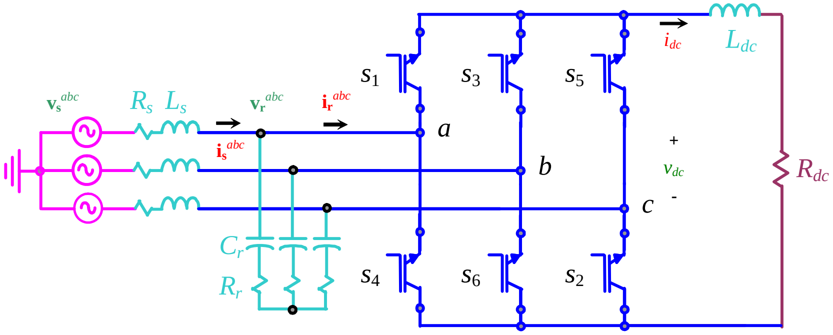
dodne $P_{losses}$ son las de conmutación y conducción.

La notación será $\mathbf{v_r}^{abc} = [v_r^a \ v_r^b \ v_r^c]^T$ para un vector de voltajes en ejes abc.También se tendrá $\mathbf{v_r}^{dq0} = [v_r^d \ v_r^q \ v_r^0]^T$ para ejes dq0.

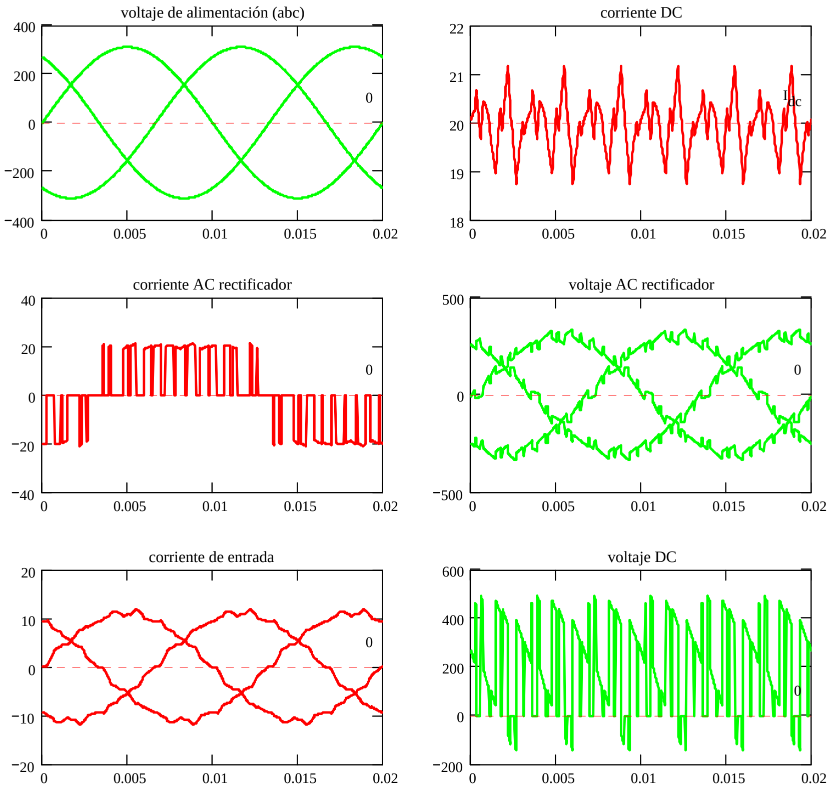
# Formas de Onda Ideales, Estándares y Recomendaciones

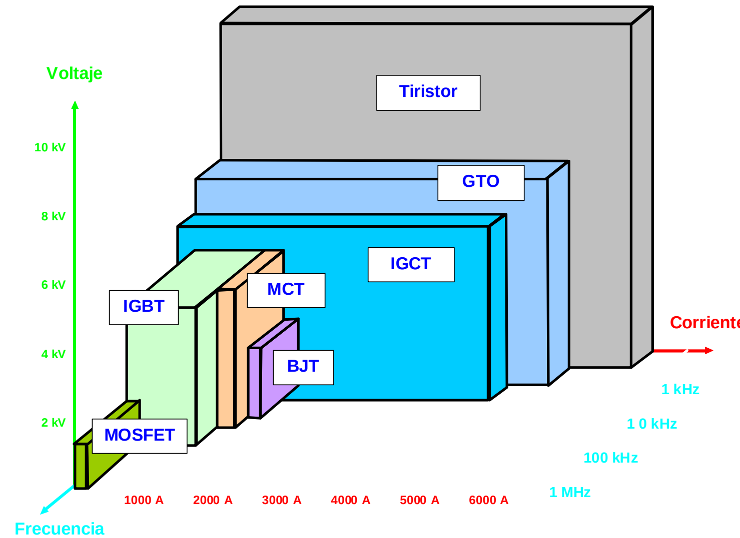


**Problema** Establecer las limitaciones de las formas de onda y cómo evaluarlas.




Las formas de onda distna de ser las esperadas sinusoidales y continuas. Naturalemente, mientras mayor sea la frecuencia de conmutación de los switches, las formas de onda "lucen" mejores. Pero esto eventualemente es limitado por las restricciones de los actuales switches.




Se puede cauntificar cuán buena es una forma de onda. Esto se hace a través de índices como el THD (total harmonic distortion) y se necesita el contenido armónico para calcularlo.

$$\mathrm{THD} = \frac{1}{V_1}\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}$$

Hay estándares que recomiendan los valores de THD en un sistema particular dependiendo de una serie de antecedentes. Este es el IEEE 519-1992 y el Chileno.

# Niveles de Tensión



**Problema** Conocer los niveles de tensión de las redes.

**Transmisión**

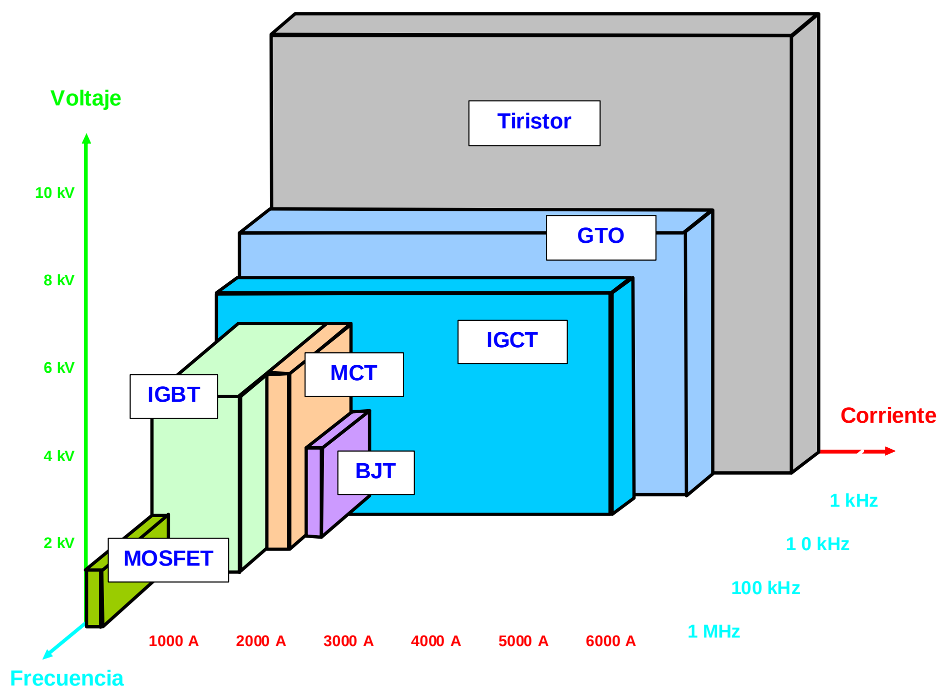
| | |
|---|---|
| 110 kV | : Anillo en área Metropoplitana de Chilectra |
| 154 kV | : Cipreses -S/E Itahue -S/E Alto Jahuel |
| 220 kV | : Red Troncal Taltal a Puerto Montt (Canutillar) |
| 500 kV | : S/E Charrua –S/E Alto Jahuel |

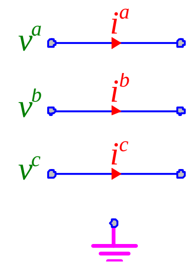
**Distribución**

| | |
|---|---|
| 12 kV | : Chilectra Chilquinta |
| 13,2 y 13,8 kV | : Distribuidoras Ex-Endesa, Coop. Eléctricas, etc. |
| 15 kV | : CGE |
| 23 kV | : Chilectra (área norte), CGE, Saesa, Frontel, etc. |

**Consumos - Motores**

220 V a 690 V
2,3 a 4 kV






**Problema** Introducir definiciones para potencias activa y reactiva instantáneas.

La potencia por definición es:

$$p_{abc}(t) = v_a(t)\cdot i_a(t) + v_b(t)\cdot i_b(t) + v_c(t)\cdot i_c(t) \qquad p_{abc}(t) = \begin{pmatrix} v_a(t) & v_b(t) & v_c(t) \end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{pmatrix}$$

si se define, $v_{abc}(t) = \begin{pmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{pmatrix}$ $\quad i_{abc}(t) = \begin{pmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{pmatrix}$ entonces, $p_{abc}(t) = v_{abc}(t)^T\cdot i_{abc}(t)$ donde $p_{abc}(t)$ es un escalar y es la **potencia activa instantánea**.

**Ejemplo 1** Voltaje y corriente sinusoidales.

$$\omega := 2\cdot\pi\cdot 50 \qquad V_{rms} := 220 \qquad V := V_{rms}\cdot\sqrt{2} \qquad \phi := -30\cdot\frac{\pi}{180} \qquad I_{rms} := 10 \qquad I := I_{rms}\cdot\sqrt{2}$$

$$v_a(t) := V\cdot\sin(\omega\cdot t) \qquad i_{s\_a}(t) := I\cdot\sin\left(\omega\cdot t + \phi - 0\cdot\frac{\pi}{3}\right)$$

$$v_b(t) := V\cdot\sin\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) \qquad i_{s\_b}(t) := I\cdot\sin\left(\omega\cdot t + \phi - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right)$$

$$v_c(t) := V\cdot\sin\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right) \qquad i_{s\_c}(t) := I\cdot\sin\left(\omega\cdot t + \phi - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right)$$

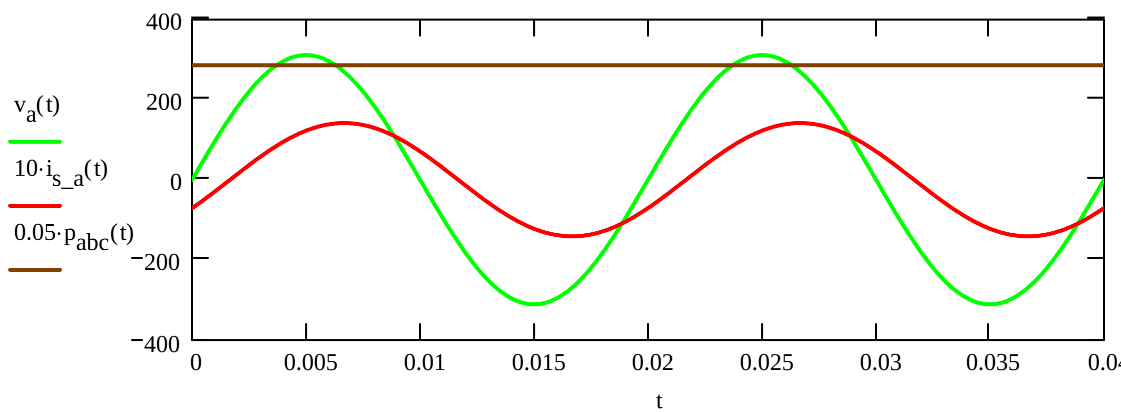
$$p_{abc}(t) := V\cdot\sin(\omega\cdot t)\cdot I\cdot\sin(\omega\cdot t + \phi) + V\cdot\sin\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right)\cdot I\cdot\sin\left(\omega\cdot t + \phi - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) + V\cdot\sin\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right)\cdot I\cdot\sin\left(\omega\cdot t + \phi - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right)$$

$$p_{abc}(t) := 3\cdot V_{rms}\cdot I_{rms}\cdot\cos(\phi) \qquad t := 0, 0.1\cdot 10^{-3} .. 40\cdot 10^{-3}$$

$$P_{abc} = \frac{1}{T}\cdot\int_0^T p_{abc}(t)\,dt = 3\cdot V_{rms}\cdot I_{rms}\cdot\cos(\phi)$$

$$p_{abc}(0) = 5.716\times 10^3$$

$$3\cdot V_{rms}\cdot I_{rms}\cdot\cos(\phi) = 5.716\times 10^3$$



**Ejemplo 2** Voltajes sinusoidales y corrientes no sinusoidales.



$$v_a(t) := V\cdot\sin(\omega\cdot t)$$

$$i_{d\_a}(t) := I\cdot\sin\left(\omega\cdot t + \phi - 0\cdot\frac{\pi}{3}\right) + \frac{-I}{5}\cdot\sin\left[5\cdot\left(\omega\cdot t + \phi - 0\cdot\frac{\pi}{3}\right)\right] + \frac{-I}{7}\cdot\sin\left[7\cdot\left(\omega\cdot t + \phi - 0\cdot\frac{\pi}{3}\right)\right] \ldots$$
$$+ \frac{I}{11}\cdot\sin\left[11\cdot\left(\omega\cdot t + \phi - 0\cdot\frac{\pi}{3}\right)\right] + \frac{I}{13}\cdot\sin\left[13\cdot\left(\omega\cdot t + \phi - 0\cdot\frac{\pi}{3}\right)\right]$$

$$v_b(t) := V\cdot\sin\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right)$$

$$i_{d\_b}(t) := I\cdot\sin\left(\omega\cdot t + \phi - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) + \frac{-I}{5}\cdot\sin\left[5\cdot\left(\omega\cdot t + \phi - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right)\right] + \frac{-I}{7}\cdot\sin\left[7\cdot\left(\omega\cdot t + \phi - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right)\right] \ldots$$
$$+ \frac{I}{11}\cdot\sin\left[11\cdot\left(\omega\cdot t + \phi - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right)\right] + \frac{I}{13}\cdot\sin\left[13\cdot\left(\omega\cdot t + \phi - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right)\right]$$

$$v_c(t) := V\cdot\sin\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right)$$

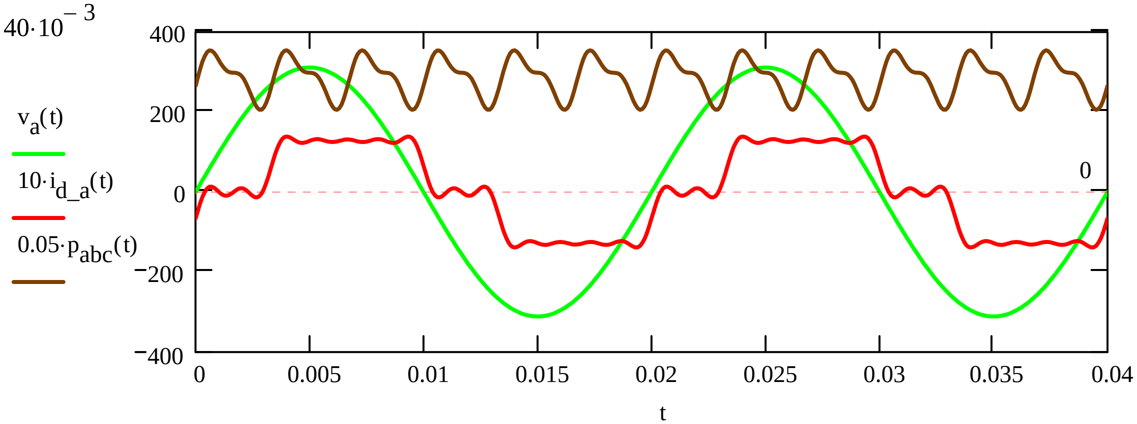
$$i_{d\_c}(t) := I\cdot\sin\left(\omega\cdot t + \phi - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right) + \frac{-I}{5}\cdot\sin\left[5\cdot\left(\omega\cdot t + \phi - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right)\right] + \frac{-I}{7}\cdot\sin\left[7\cdot\left(\omega\cdot t + \phi - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right)\right] \ldots$$
$$+ \frac{I}{11}\cdot\sin\left[11\cdot\left(\omega\cdot t + \phi - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right)\right] + \frac{I}{13}\cdot\sin\left[13\cdot\left(\omega\cdot t + \phi - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right)\right]$$

$$p_{abc}(t) := v_a(t)\cdot i_{d\_a}(t) + v_b(t)\cdot i_{d\_b}(t) + v_c(t)\cdot i_{d\_c}(t)$$

$$T := 20\cdot 10^{-3} \qquad t := 0, 0.1\cdot 10^{-3} .. 40\cdot 10^{-3}$$

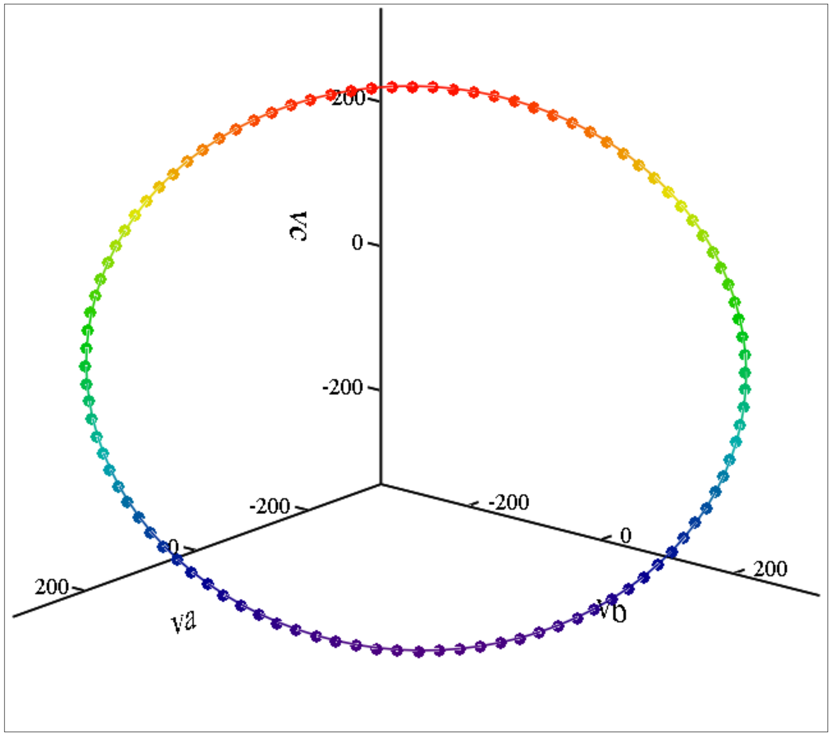
$$P_{abc} := \frac{1}{T}\cdot\int_0^T p_{abc}(t)\,dt$$

$$P_{abc} = 5.716 \times 10^3$$

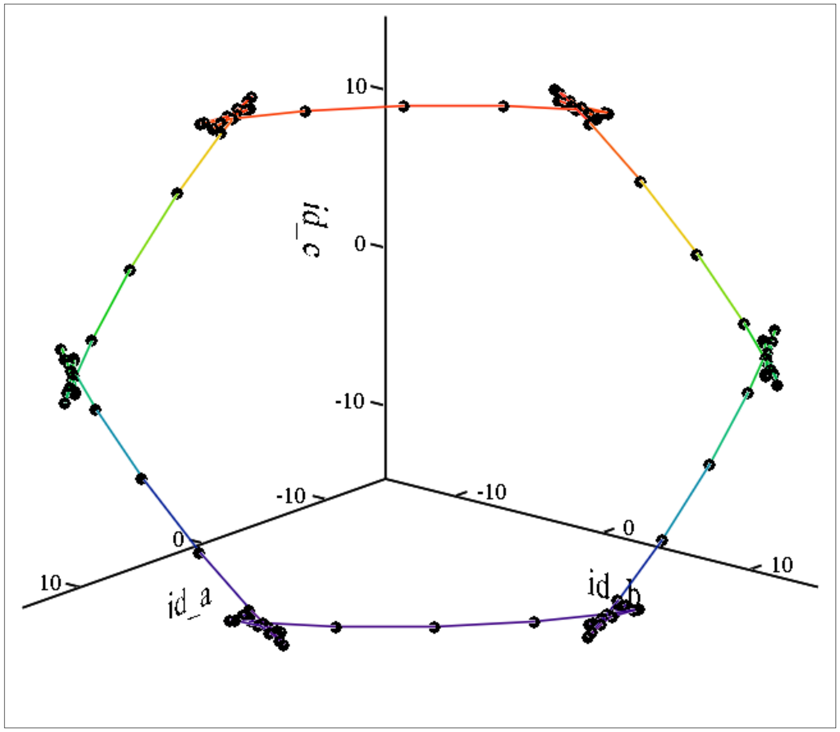


Muestra gráfica de los voltajes sinusoidales y corrientes no sinusoidales.



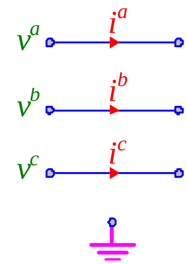



$(v_a, v_b, v_c)$




$(i_{d\_a}, i_{d\_b}, i_{d\_c})$

**Potencia Reactiva** Se puede definir también la **potencia reactiva instantánea** como,






$q_{abc}(t) = v_{abc}(t) \times i_{abc}(t)$ donde $q_{abc}(t)$ es un vector.

**Ejemplo 1** Voltaje y corriente sinusoidales.

$$v_{abc}(t) := \left(v_a(t) \;\; v_b(t) \;\; v_c(t)\right)^T$$

$$i_{abc}(t) := \left(i_{s\_a}(t) \;\; i_{s\_b}(t) \;\; i_{s\_c}(t)\right)^T$$

$q_{abc}(t) := v_{abc}(t) \times i_{abc}(t)^T$ $\quad q_a(t) := q_{abc}(t)_1$ $\quad q_b(t) := q_{abc}(t)_2$ $\quad q_c(t) := q_{abc}(t)_3$

$$q_{abc}(t) := \left(\sqrt{3}\cdot V_{rms}\cdot I_{rms}\cdot \sin(\phi) \;\; \sqrt{3}\cdot V_{rms}\cdot I_{rms}\cdot \sin(\phi) \;\; \sqrt{3}\cdot V_{rms}\cdot I_{rms}\cdot \sin(\phi)\right)^T$$

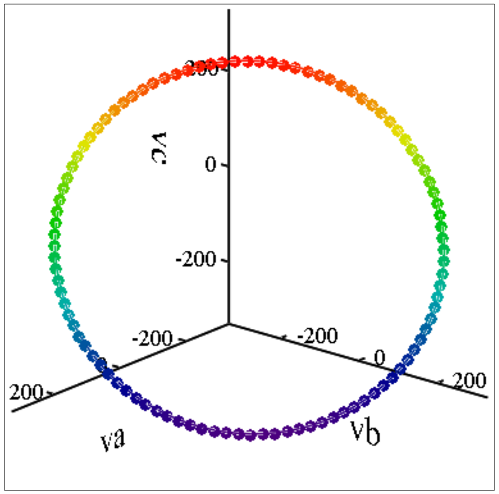
$\left|q_{abc}(t)\right| = 3\cdot V_{rms}\cdot I_{rms}\cdot \sin(\phi)$ módulo de $q_{abc}(t)$

$$Q_{abc} = \frac{1}{T}\cdot\int_0^T \left|q_{abc}(t)\right| dt = 3\cdot V_{rms}\cdot I_{rms}\cdot \sin(\phi)$$

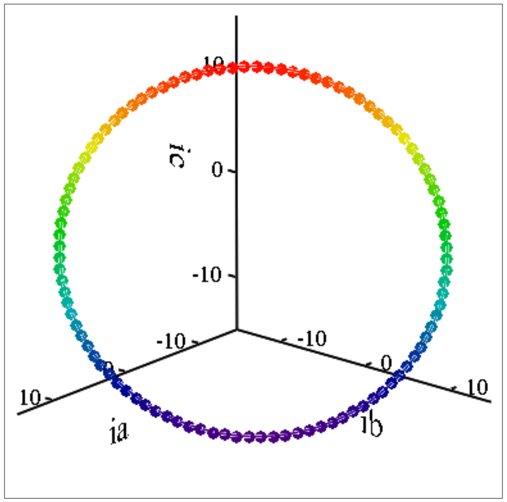
$$q_{abc}(0)^T = \left(-1.905\times 10^3 \;\; -1.905\times 10^3 \;\; -1.905\times 10^3\right)$$

$$\left|q_{abc}(0)\right| = 3.3\times 10^3$$

$$3\cdot V_{rms}\cdot I_{rms}\cdot \sin(\phi) = -3.3\times 10^3$$




$(v_a, v_b, v_c)$




$(i_{s\_a}, i_{s\_b}, i_{s\_c})$

**Ejemplo 2** Voltajes sinusoidales y corrientes no sinusoidales.

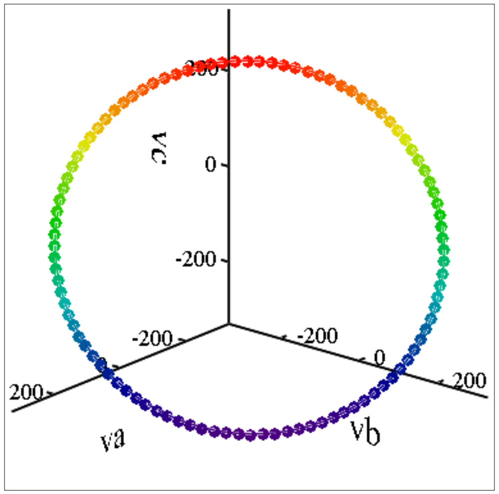


$$v_{abc}(t) := \left(v_a(t) \;\; v_b(t) \;\; v_c(t)\right)^T \qquad i_{abc}(t) := \left(i_{d\_a}(t) \;\; i_{d\_b}(t) \;\; i_{d\_c}(t)\right)^T$$

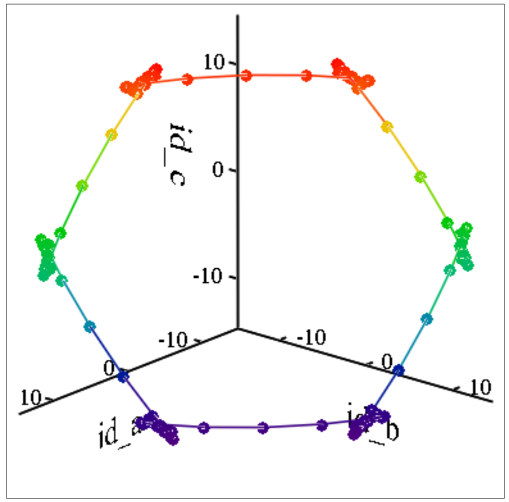
$$q_{abc}(t) := v_{abc}(t) \times i_{abc}(t) \qquad q_a(t) := q_{abc}(t)_1 \qquad q_b(t) := q_{abc}(t)_2 \qquad q_c(t) := q_{abc}(t)_3$$

$q_{m\_abc}(t) := \left|q_{abc}(t)\right|$ módulo de $q_{abc}(t)$

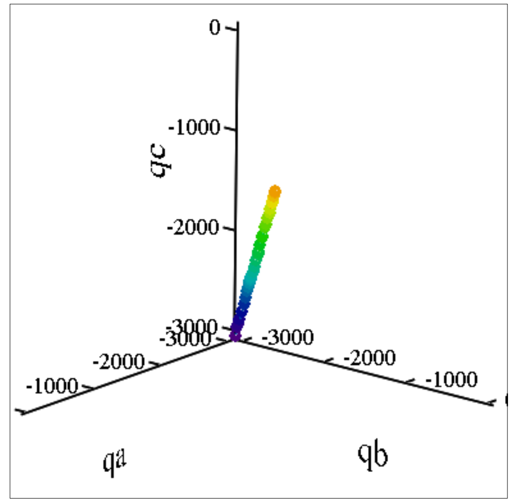
$$Q_{abc} := \frac{1}{T}\cdot\int_0^T \left|q_{abc}(t)\right| dt \qquad Q_{abc} = 3.3 \times 10^3 \qquad 3\cdot V_{rms}\cdot I_{rms}\cdot\sin(\phi) = -3.3 \times 10^3$$




$(v_a, v_b, v_c)$

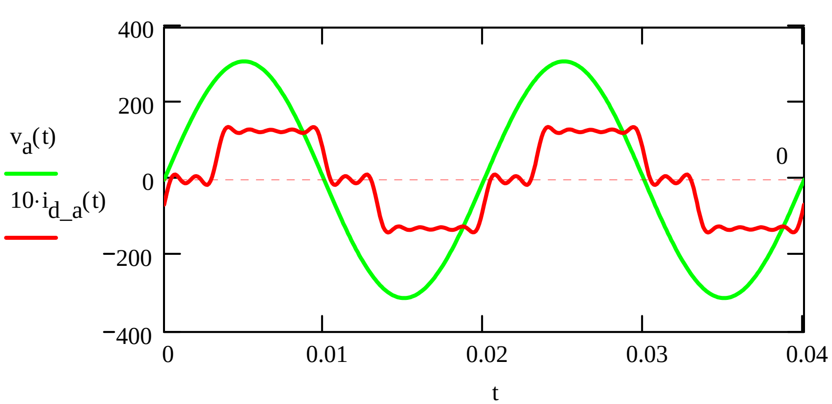


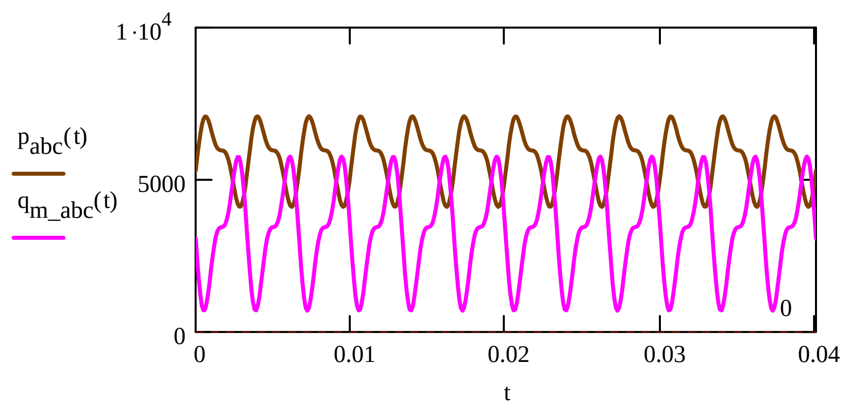

$(i_{d\_a}, i_{d\_b}, i_{d\_c})$




$(q_a, q_b, q_c)$

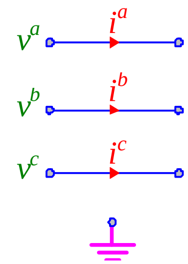
Formas de Onda Relevantes.



**Potencia Aparente**

Se puede definir también la **potencia aparente instantánea**.






Al tener dos vectores **x**(t) e **y**(t) siempre se cumple que,

$$(|x|)^2 \cdot (|y|)^2 = \left(x^T \cdot y\right)^2 + (|x \times y|)^2$$

en el caso de corresponder **x**(t) = $\mathbf{v}_{abc}$(t) a un voltaje e **y**(t) = $\mathbf{i}_{abc}$(t) a una corriente, entonces

$$(|v_{abc}|)^2 \cdot (|i_{abc}|)^2 = \left(v_{abc}{}^T \cdot i_{abc}\right)^2 + (|v_{abc} \times i_{abc}|)^2 \qquad (|v_{abc}|)^2 \cdot (|i_{abc}|)^2 = p_{abc}{}^2 + (|q_{abc}|)^2$$

entonces, la **potencia aparente instantánea $\mathbf{s}_{abc}$**(t) es, $s_{abc}(t) = \sqrt{(|v_{abc}(t)|)^2 \cdot (|i_{abc}(t)|)^2}$ cumpliéndose que, $s_{abc}(t)^2 = p_{abc}(t)^2 + (|q_{abc}(t)|)^2$

**Factor de Potencia**

Se puede definir también el **factor de potencia instantáneo** como

$$fp_{abc} = \frac{p_{abc}}{s_{abc}} = \frac{v_{abc}(t)^T \cdot i_{abc}(t)}{\sqrt{p_{abc}(t)^2 + (|q_{abc}(t)|)^2}}$$

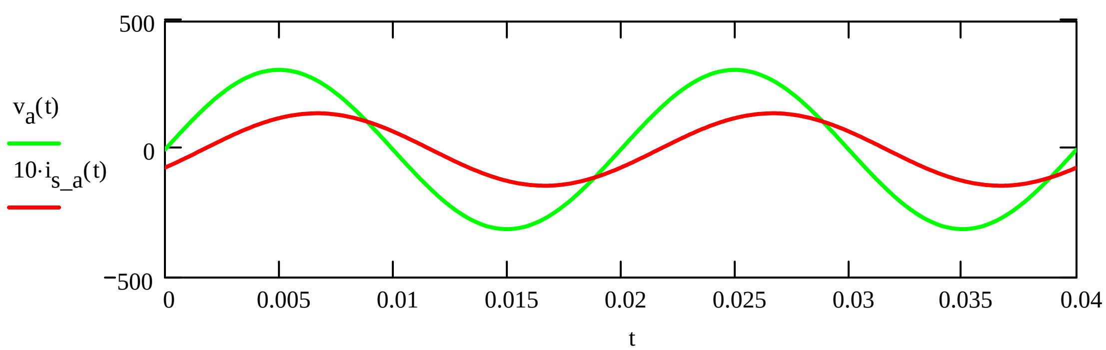
**Ejemplo 1** Voltaje y corriente sinusoidales.



$$v_{abc}(t) := \left(v_a(t) \;\; v_b(t) \;\; v_c(t)\right)^T \qquad i_{abc}(t) := \left(i_{s\_a}(t) \;\; i_{s\_b}(t) \;\; i_{s\_c}(t)\right)^T \qquad p_{abc}(t) := v_{abc}(t)^T \cdot i_{abc}(t) \qquad q_{abc}(t) := v_{abc}(t) \times i_{abc}(t)$$

$$s_{abc}(t) := \sqrt{\left(\left|v_{abc}(t)\right|\right)^2 \cdot \left(\left|i_{abc}(t)\right|\right)^2}$$

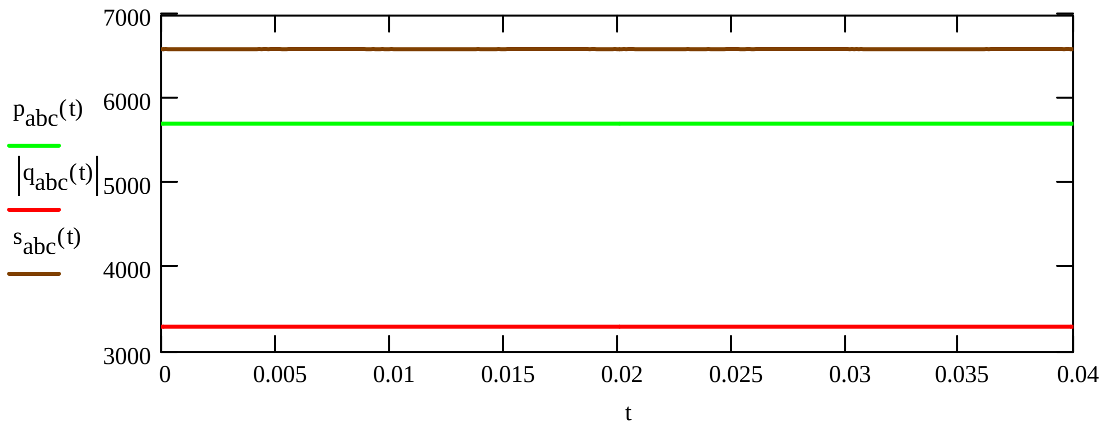
$$fp_{abc}(t) := \frac{p_{abc}(t)}{s_{abc}(t)}$$




$$p_{abc}(0) = 5.716 \times 10^3$$

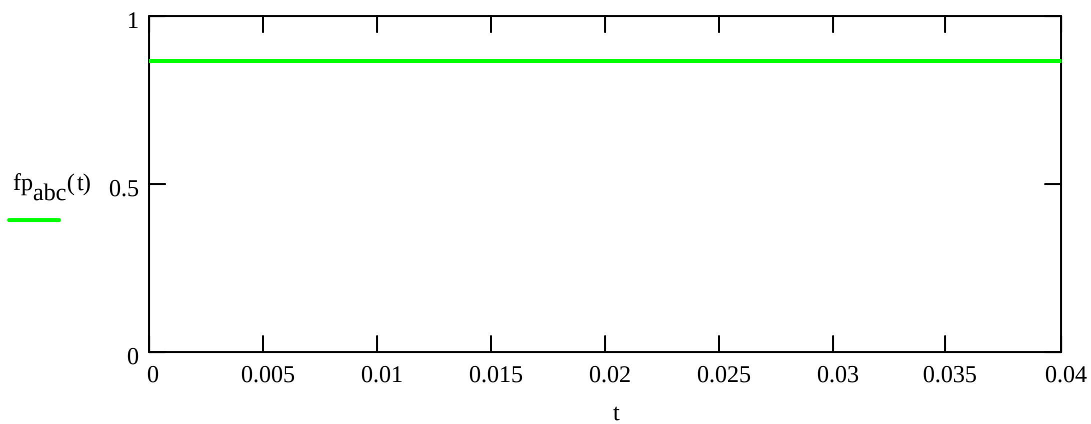
$$\left|q_{abc}(0)\right| = 3.3 \times 10^3$$

$$s_{abc}(0) = 6.6 \times 10^3$$




$$p_{abc}(0)^2 + \left(\left|q_{abc}(0)\right|\right)^2 = 4.356 \times 10^7$$

$$s_{abc}(0)^2 = 4.356 \times 10^7$$

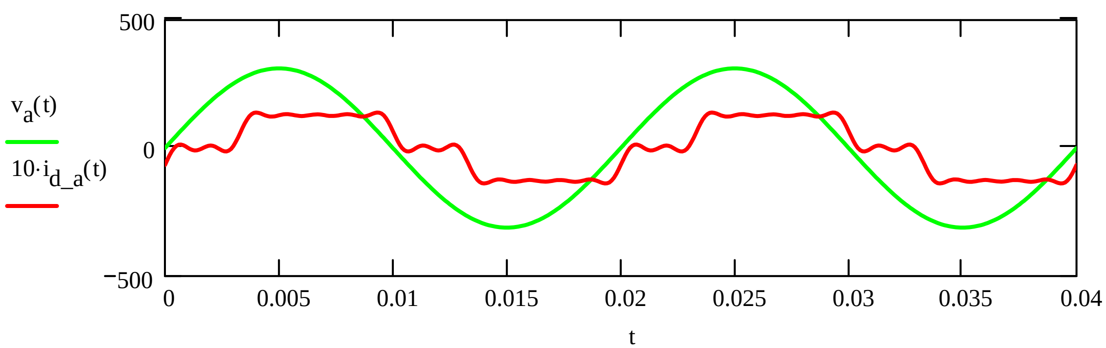



$$fp_{abc}(0) = 0.866$$

**Ejemplo 2** Voltajes sinusoidales y corrientes no sinusoidales.

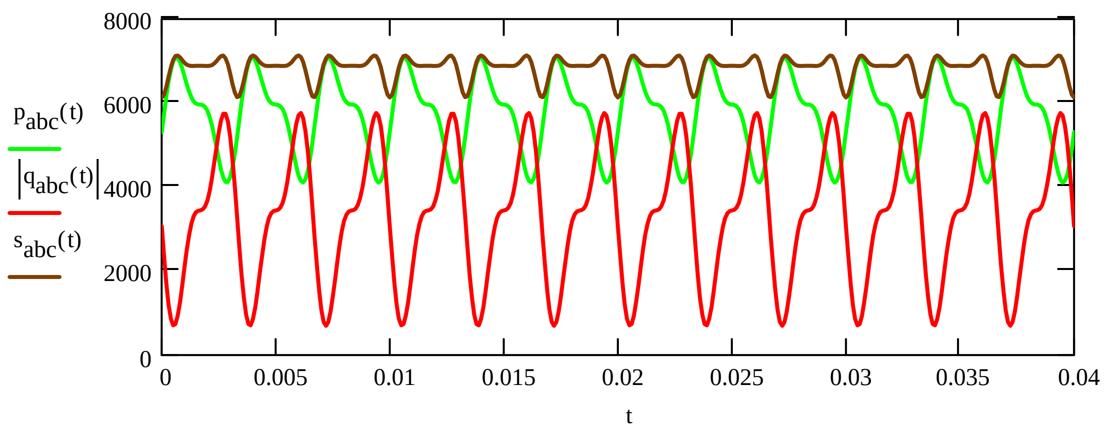


$v_{abc}(t) := \left(v_a(t)\ \ v_b(t)\ \ v_c(t)\right)^T$ $\quad i_{abc}(t) := \left(i_{d\_a}(t)\ \ i_{d\_b}(t)\ \ i_{d\_c}(t)\right)^T$ $\quad p_{abc}(t) := v_{abc}(t)^T \cdot i_{abc}(t)$ $\quad q_{abc}(t) := v_{abc}(t) \times i_{abc}(t)$




$$s_{abc}(t) := \sqrt{\left(\left|v_{abc}(t)\right|\right)^2 \cdot \left(\left|i_{abc}(t)\right|\right)^2}$$

$$fp_{abc}(t) := \frac{p_{abc}(t)}{s_{abc}(t)}$$



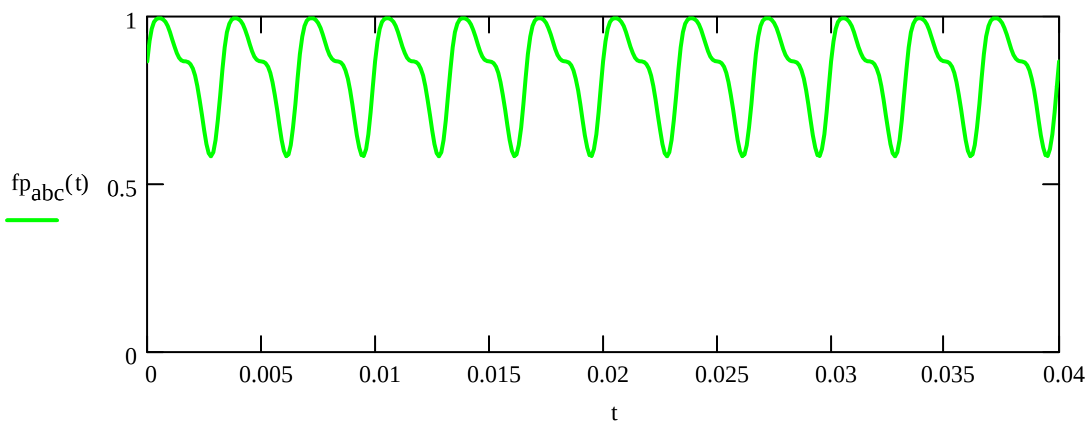

$p_{abc}(0) = 5.309 \times 10^3$

$\left|q_{abc}(0)\right| = 3.065 \times 10^3$

$s_{abc}(0) = 6.131 \times 10^3$

$p_{abc}(0)^2 + \left(\left|q_{abc}(0)\right|\right)^2 = 3.758 \times 10^7$

$s_{abc}(0)^2 = 3.758 \times 10^7$




$fp_{abc}(0) = 0.866$

# Transformación dq0



**Problema** Comentar la tansformada dq0 y su aplicación a convertidores estáticos.

Se define, $x_{abc}(t) = \begin{pmatrix} x_a(t) \\ x_b(t) \\ x_c(t) \end{pmatrix}$ entonces, $x_{dq0}(t) = T_{abc\_dq0}(t)\cdot x_{abc}(t) = \begin{pmatrix} x_d(t) \\ x_q(t) \\ x_0(t) \end{pmatrix}$ donde $T_{abc\_dq0}(t)$ es la Transformada de Park.

$$T_{abc\_dq0}(t) := \sqrt{\frac{2}{3}}\cdot\begin{pmatrix} \sin(\omega\cdot t) & \sin\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right) \\ \cos(\omega\cdot t) & \cos\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

notar que, $x_{abc}(t) = T_{abc\_dq0}(t)^{-1}\cdot x_{dq0}(t) = T_{dq0\_abc}(t)\cdot x_{dq0}(t)$

Además, $T_{abc\_dq0}(t)\cdot T_{abc\_dq0}(t)^{T} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$

$$T_{dq0\_abc}(t) := \sqrt{\frac{2}{3}}\cdot\begin{pmatrix} \sin(\omega\cdot t) & \cos(\omega\cdot t) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \sin\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \sin\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

por lo que, $T_{abc\_dq0}(t)^{-1} = T_{abc\_dq0}(t)^{T} = T_{dq0\_abc}(t)$

**Ejemplo 1** Señal sinusoidal arbitraria.

$$x_{abc}(t) = \left( X\cdot\sqrt{2}\cdot\sin(\omega\cdot t + \phi) \quad X\cdot\sqrt{2}\cdot\sin\left(\omega\cdot t + \phi - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) \quad X\cdot\sqrt{2}\cdot\sin\left(\omega\cdot t + \phi - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right)\right)^{T} \qquad \left|x_{abc}(t)\right| = \sqrt{3}\cdot X$$

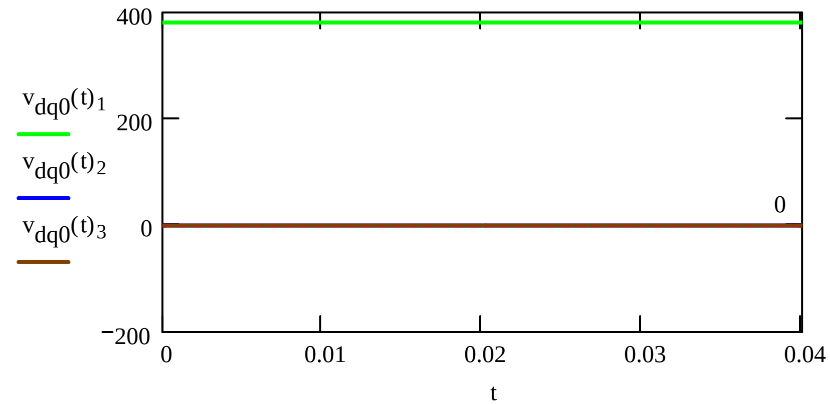
$$x_{dq0}(t) = T_{abc\_dq0}(t)\cdot x_{abc}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}\cdot\begin{pmatrix} \sin(\omega\cdot t) & \sin\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right) \\ \cos(\omega\cdot t) & \cos\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}\cdot\begin{pmatrix} X\cdot\sqrt{2}\cdot\sin\left(\omega\cdot t + \phi - \frac{0}{3}\cdot\pi\right) \\ X\cdot\sqrt{2}\cdot\sin\left(\omega\cdot t + \phi - \frac{2}{3}\cdot\pi\right) \\ X\cdot\sqrt{2}\cdot\sin\left(\omega\cdot t + \phi - \frac{4}{3}\cdot\pi\right) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X\cdot\sqrt{3}\cdot\cos(\phi) \\ X\cdot\sqrt{3}\cdot\sin(\phi) \\ 0 \end{pmatrix} \qquad \left|x_{dq0}(t)\right| = \sqrt{3}\cdot X$$

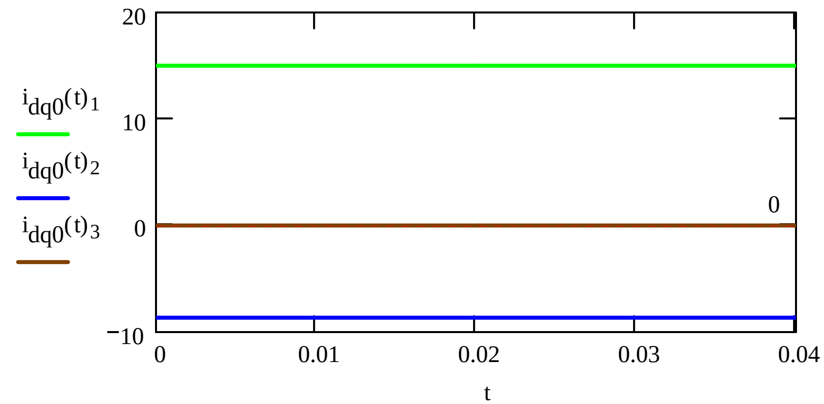
**Ejemplo 2** Voltaje y corriente sinusoidales.

$10\cdot\sqrt{3}\cdot\cos(\phi) = 15$ $\quad$ $10\cdot\sqrt{3}\cdot\sin(\phi) = -8.66$

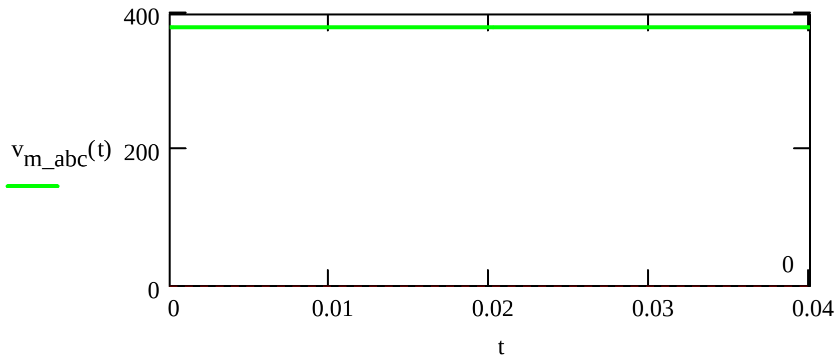


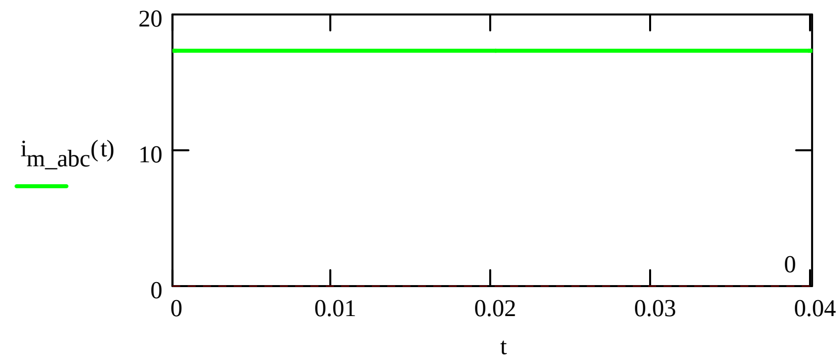
$v_{abc}(t) := \left(v_a(t) \;\; v_b(t) \;\; v_c(t)\right)^T$ $\quad$ $i_{abc}(t) := \left(i_{s\_a}(t) \;\; i_{s\_b}(t) \;\; i_{s\_c}(t)\right)^T$ $\quad$ $v_{dq0}(t) := T_{abc\_dq0}(t)\cdot v_{abc}(t)$ $\quad$ $i_{dq0}(t) := T_{abc\_dq0}(t)\cdot i_{abc}(t)$



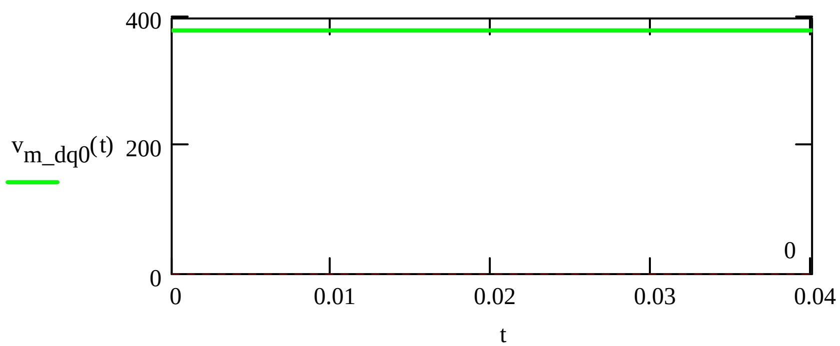



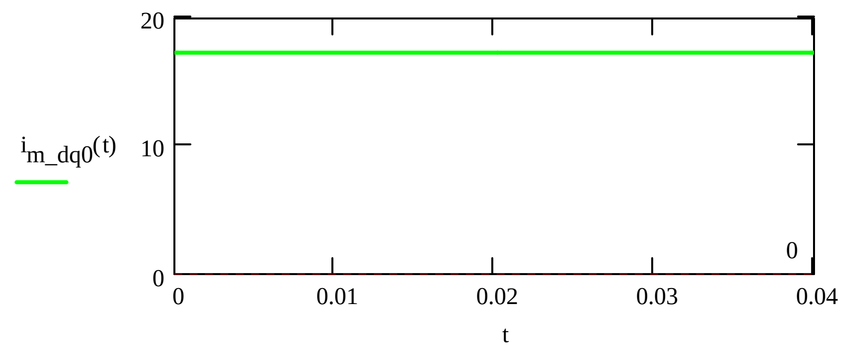

$v_{m\_abc}(t) := \sqrt{v_a(t)^2 + v_b(t)^2 + v_c(t)^2}$ $\quad$ $i_{m\_abc}(t) := \sqrt{i_{s\_a}(t)^2 + i_{s\_b}(t)^2 + i_{s\_c}(t)^2}$




$v_{m\_dq0}(t) := \sqrt{\left(v_{dq0}(t)_1\right)^2 + \left(v_{dq0}(t)_2\right)^2 + \left(v_{dq0}(t)_3\right)^2}$ $\quad$ $i_{m\_dq0}(t) := \sqrt{\left(i_{dq0}(t)_1\right)^2 + \left(i_{dq0}(t)_2\right)^2 + \left(i_{dq0}(t)_3\right)^2}$

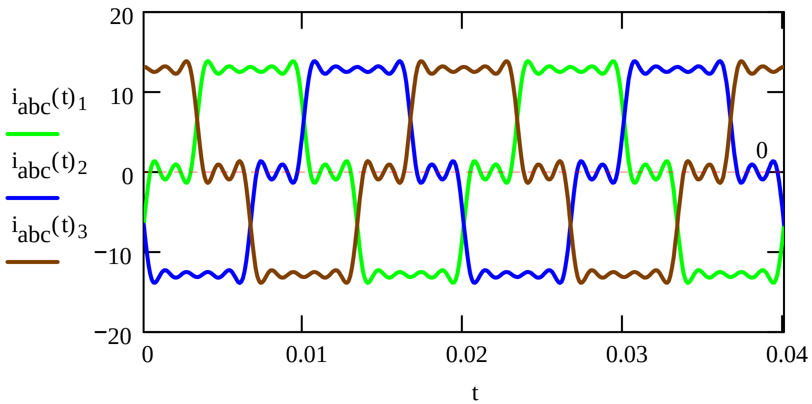


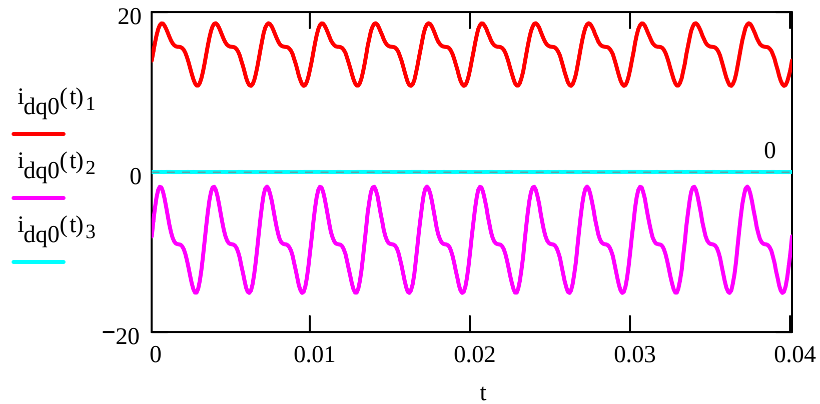
**Ejemplo 3** Corrientes no sinusoidales..



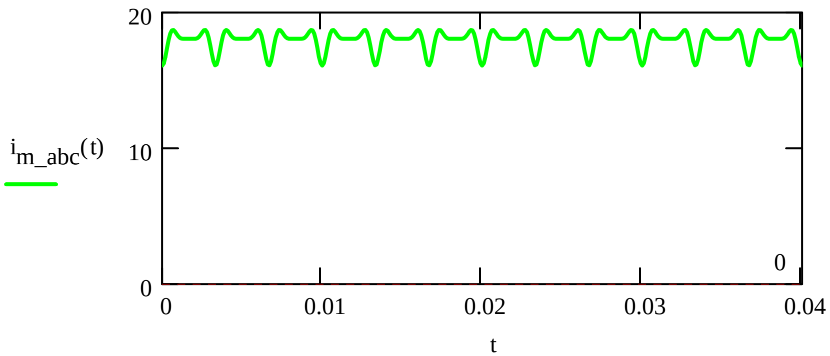
$$i_{abc}(t) := \left(i_{d\_a}(t) \quad i_{d\_b}(t) \quad i_{d\_c}(t)\right)^T$$



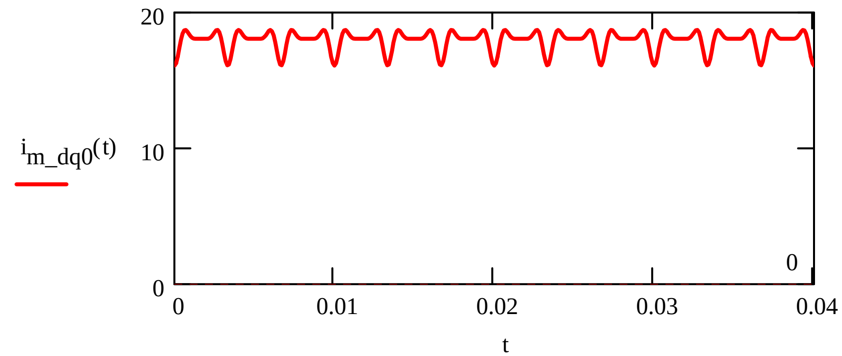

$$i_{dq0}(t) := T_{abc\_dq0}(t) \cdot i_{abc}(t)$$




$$i_{m\_abc}(t) := \sqrt{i_{d\_a}(t)^2 + i_{d\_b}(t)^2 + i_{d\_c}(t)^2}$$

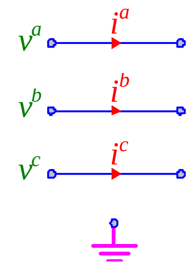



$$i_{m\_dq0}(t) := \sqrt{\left(i_{dq0}(t)_1\right)^2 + \left(i_{dq0}(t)_2\right)^2 + \left(i_{dq0}(t)_3\right)^2}$$



# Potencias Instantáneas en ejes dq0






**Problema** Demostrar la equivalencia en distintos ejes de la potencia activa instantánea.

La potencia activa por definición es:

$$v_{abc}(t) = \begin{pmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{pmatrix} \qquad i_{abc}(t) = \begin{pmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{pmatrix} \qquad p_{abc}(t) = \left( v_a(t) \;\; v_b(t) \;\; v_c(t) \right) \cdot \begin{pmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{pmatrix} = v_{abc}(t)^T \cdot i_{abc}(t)$$

La **potencia activa instantánea** en dq0 es,

$$p_{dq0}(t) = v_{dq0}(t)^T \cdot i_{dq0}(t)$$

dado que,

$$x_{dq0}(t) = T_{abc\_dq0}(t) \cdot x_{abc}(t)$$

entonces,

$$p_{dq0}(t) = \left(T_{abc\_dq0}(t) \cdot v_{abc}(t)\right)^T \cdot \left(T_{abc\_dq0}(t) \cdot i_{abc}(t)\right)$$

$$p_{dq0}(t) = v_{abc}(t)^T \cdot T_{abc\_dq0}(t)^T \cdot T_{abc\_dq0}(t) \cdot i_{abc}(t)$$

$$p_{dq0}(t) = v_{abc}(t)^T \cdot T_{abc\_dq0}(t)^{-1} \cdot T_{abc\_dq0}(t) \cdot i_{abc}(t)$$

$$p_{dq0}(t) = v_{abc}(t)^T \cdot i_{abc}(t)$$

$$p_{dq0}(t) = p_{abc}(t)$$

La **potencia reactiva instantánea** en dq0 es,

$$q_{dq0}(t) = v_{dq0}(t) \times i_{dq0}(t)$$

$$q_{dq0}(t) = \left(T_{abc\_dq0}(t) \cdot v_{abc}(t)\right) \times \left(T_{abc\_dq0}(t) \cdot i_{abc}(t)\right)$$

$$q_{dq0}(t) = v_{abc}(t) \times i_{abc}$$

$$q_{dq0}(t) = q_{abc}(t)$$

Equivalentemente la **potencia aparente instantánea** en dq0 es,

$$s_{dq0}(t) = \sqrt{\left(\left|v_{dq0}(t)\right|\right)^2 \cdot \left(\left|i_{dq0}(t)\right|\right)^2}$$

$$s_{dq0}(t) = \sqrt{\left(\left|T_{abc\_dq0}(t) \cdot v_{abc}(t)\right|\right)^2 \cdot \left(\left|T_{abc\_dq0}(t) \cdot i_{abc}(t)\right|\right)^2}$$

$$s_{dq0}(t) = \sqrt{\left(\left|v_{abc}(t)\right|\right)^2 \cdot \left(\left|i_{abc}(t)\right|\right)^2}$$

$$s_{dq0}(t) = s_{abc}(t)$$

El **factor de potencia instantáneo** en dq0 es,

$$fp_{dq0}(t) = \frac{p_{dq0}(t)}{s_{dq0}(t)} = \frac{p_{abc}(t)}{s_{abc}(t)}$$

**Ejemplo** Voltajes sinusoidales y corrientes no sinusoidales.

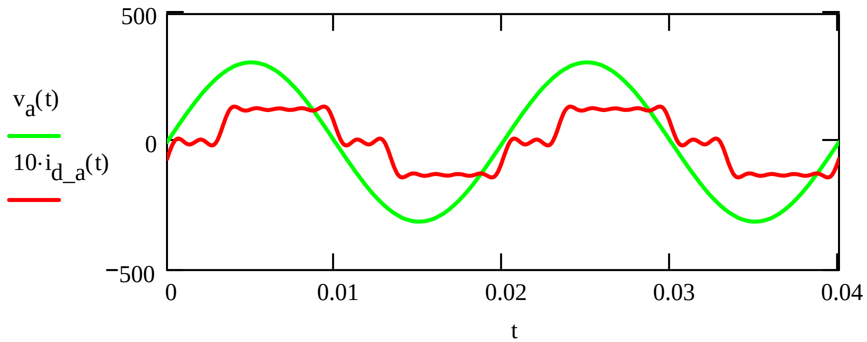


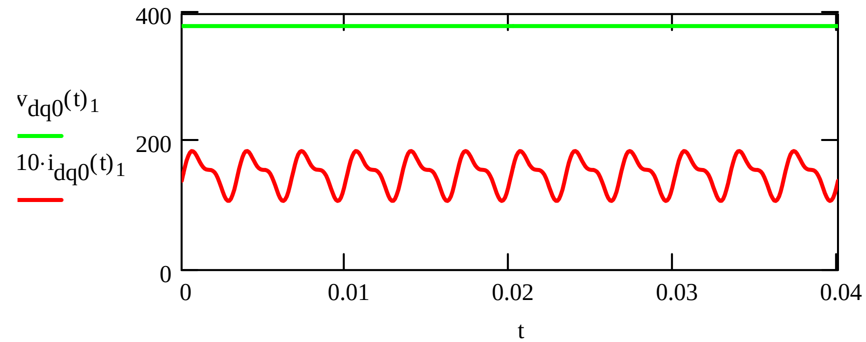
$$v_{abc}(t) := \left(v_a(t) \quad v_b(t) \quad v_c(t)\right)^T \qquad i_{abc}(t) := \left(i_{d\_a}(t) \quad i_{d\_b}(t) \quad i_{d\_c}(t)\right)^T$$

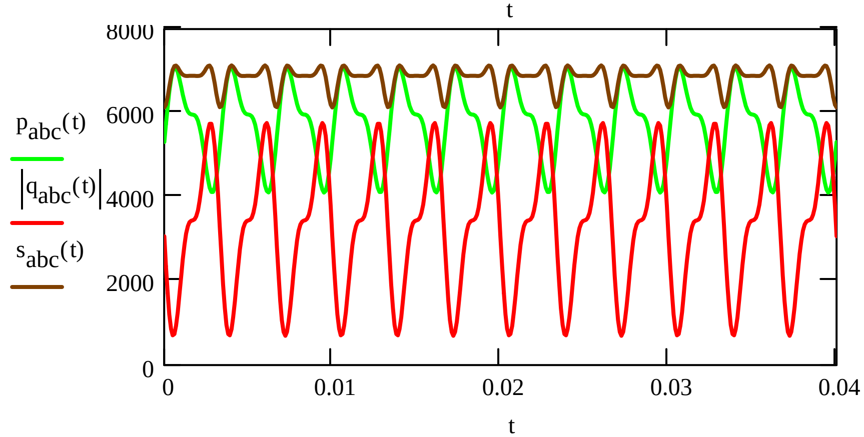
$$p_{abc}(t) := v_{abc}(t)^T \cdot i_{abc}(t) \qquad q_{abc}(t) := v_{abc}(t) \times i_{abc}(t) \qquad s_{abc}(t) := \sqrt{\left(\left|v_{abc}(t)\right|\right)^2 \cdot \left(\left|i_{abc}(t)\right|\right)^2} \qquad fp_{abc}(t) := \frac{p_{abc}(t)}{s_{abc}(t)}$$

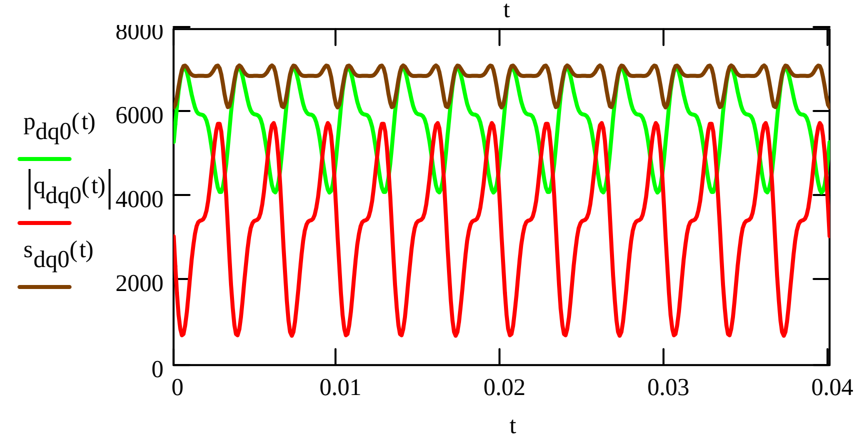
$$v_{dq0}(t) := T_{abc\_dq0}(t) \cdot v_{abc}(t) \qquad i_{dq0}(t) := T_{abc\_dq0}(t) \cdot i_{abc}(t)$$

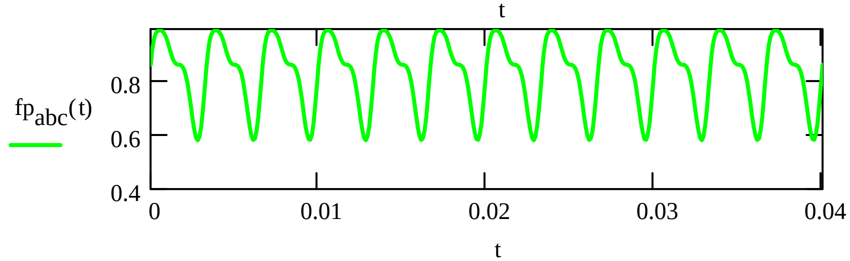
$$p_{dq0}(t) := v_{dq0}(t)^T \cdot i_{dq0}(t) \qquad q_{dq0}(t) := v_{dq0}(t) \times i_{dq0}(t) \qquad s_{dq0}(t) := \sqrt{\left(\left|v_{dq0}(t)\right|\right)^2 \cdot \left(\left|i_{dq0}(t)\right|\right)^2} \qquad fp_{dq0}(t) := \frac{p_{dq0}(t)}{s_{dq0}(t)}$$

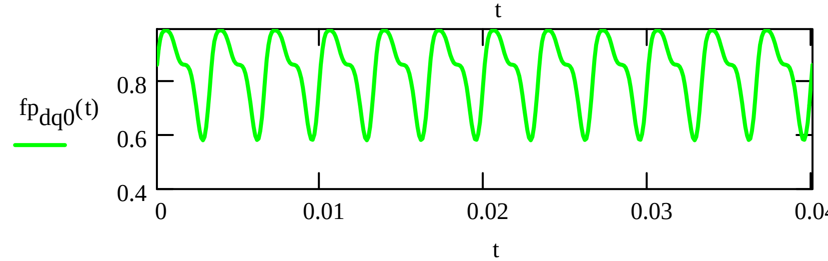


# Diferenciación en ejes dq0



**Problema** Demostrar la equivalencia de las derivadas en ejes dq0.

La representación de un vector en ejes dq0 está dada por, $x_{dq0}(t) = T_{abc\_dq0}(t)\cdot x_{abc}(t)$ por lo tanto, $x_{abc}(t) = T_{dq0\_abc}(t)\cdot x_{dq0}(t)$

$$T_{dq0\_abc}(t) := \sqrt{\frac{2}{3}}\cdot\begin{pmatrix} \sin(\omega\cdot t) & \cos(\omega\cdot t) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \sin\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \sin\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}$$

por lo tanto,

$$\frac{d}{dt}x_{abc}(t) = \frac{d}{dt}\left(T_{dq0\_abc}(t)\cdot x_{dq0}(t)\right)$$

$$\frac{d}{dt}x_{abc}(t) = \left(\frac{d}{dt}T_{dq0\_abc}(t)\right)\cdot x_{dq0}(t) + T_{dq0\_abc}(t)\cdot\left(\frac{d}{dt}x_{dq0}(t)\right)$$

$$\frac{d}{dt}T_{dq0\_abc}(t) = \sqrt{\frac{2}{3}}\cdot\begin{pmatrix} \omega\cdot\cos(\omega\cdot t) & -\omega\cdot\sin(\omega\cdot t) & 0 \\ \omega\cdot\cos\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) & -\omega\cdot\sin\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) & 0 \\ \omega\cdot\cos\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right) & -\omega\cdot\sin\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right) & 0 \end{pmatrix}$$

$$T_{abc\_dq0}(t)\cdot\left(\frac{d}{dt}T_{dq0\_abc}(t)\right) = \sqrt{\frac{2}{3}}\cdot\begin{pmatrix} \sin(\omega\cdot t) & \sin\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right) \\ \cos(\omega\cdot t) & \cos\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) & \cos\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix}\cdot\sqrt{\frac{2}{3}}\cdot\begin{pmatrix} \omega\cdot\cos(\omega\cdot t) & -\omega\cdot\sin(\omega\cdot t) & 0 \\ \omega\cdot\cos\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) & -\omega\cdot\sin\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right) & 0 \\ \omega\cdot\cos\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right) & -\omega\cdot\sin\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right) & 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

por lo tanto,

$$\frac{d}{dt}x_{abc}(t) = T_{dq0\_abc}(t)\cdot T_{abc\_dq0}(t)\cdot\left(\frac{d}{dt}T_{dq0\_abc}(t)\right)\cdot x_{dq0}(t) + T_{dq0\_abc}(t)\cdot\left(\frac{d}{dt}x_{dq0}(t)\right)$$

$$\frac{d}{dt}x_{abc}(t) = T_{dq0\_abc}(t)\cdot W\cdot x_{dq0}(t) + T_{dq0\_abc}(t)\cdot\left(\frac{d}{dt}x_{dq0}(t)\right)$$

con, $W = \begin{pmatrix} 0 & -\omega & 0 \\ \omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$

$$\frac{d}{dt}x_{abc}(t) = T_{dq0\_abc}(t)\cdot\left(W\cdot x_{dq0}(t) + \frac{d}{dt}x_{dq0}(t)\right)$$

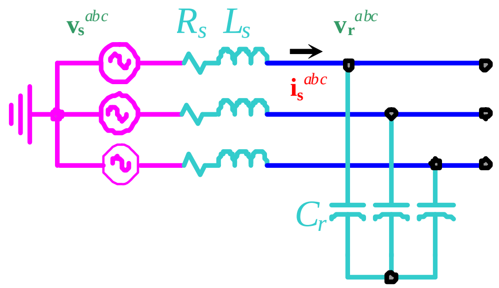
**Ejemplo** Circuito trifásico RLC.



$$v_{s\_a} = R_s \cdot i_{s\_a} + L_s \cdot \frac{d}{dt} i_{s\_a} + v_{r\_a} \qquad i_{s\_a} = C_r \cdot \frac{d}{dt} v_{r\_a}$$

$$v_{s\_b} = R_s \cdot i_{s\_b} + L_s \cdot \frac{d}{dt} i_{s\_b} + v_{r\_b} \qquad i_{s\_b} = C_r \cdot \frac{d}{dt} v_{r\_b}$$

$$v_{s\_c} = R_s \cdot i_{s\_c} + L_s \cdot \frac{d}{dt} i_{s\_c} + v_{r\_c} \qquad i_{s\_c} = C_r \cdot \frac{d}{dt} v_{r\_c}$$




definiendo,

$$v_{s\_abc} = \begin{pmatrix} v_{s\_a} & v_{s\_b} & v_{s\_c} \end{pmatrix}^T \qquad i_{s\_abc} = \begin{pmatrix} i_{s\_a} & i_{s\_b} & i_{s\_c} \end{pmatrix}^T \qquad v_{r\_abc} = \begin{pmatrix} v_{r\_a} & v_{r\_b} & v_{r\_c} \end{pmatrix}^T$$

$$v_{s\_abc} = R_s \cdot i_{s\_abc} + L_s \cdot \frac{d}{dt} i_{s\_abc} + v_{r\_abc} \qquad T_{dq0\_abc} \cdot v_{s\_dq0} = R_s \cdot T_{dq0\_abc} \cdot i_{s\_dq0} + L_s \cdot \left[ T_{dq0\_abc} \cdot \left( W \cdot i_{s\_dq0} + \frac{d}{dt} i_{s\_dq0} \right) \right] + T_{dq0\_abc} \cdot v_{r\_dq0}$$

$$i_{s\_abc} = C_r \cdot \frac{d}{dt} v_{r\_abc} \qquad T_{dq0\_abc} \cdot i_{s\_dq0} = C_r \cdot \left[ T_{dq0\_abc} \cdot \left( W \cdot v_{r\_dq0} + \frac{d}{dt} v_{r\_dq0} \right) \right]$$

$$v_{s\_dq0} = R_s \cdot i_{s\_dq0} + L_s \cdot \left( W \cdot i_{s\_dq0} + \frac{d}{dt} i_{s\_dq0} \right) + v_{r\_dq0} \qquad v_{s\_dq0} = R_s \cdot i_{s\_dq0} + L_s \cdot W \cdot i_{s\_dq0} + L_s \cdot \frac{d}{dt} i_{s\_dq0} + v_{r\_dq0}$$

$$i_{s\_dq0} = C_r \cdot \left( W \cdot v_{r\_dq0} + \frac{d}{dt} v_{r\_dq0} \right) \qquad i_{s\_dq0} = C_r \cdot W \cdot v_{r\_dq0} + C_r \cdot \frac{d}{dt} v_{r\_dq0}$$

$$v_{s\_d} = R_s \cdot i_{s\_d} - \omega \cdot L_s \cdot i_{s\_q} + L_s \cdot \frac{d}{dt} i_{s\_d} + v_{r\_d} \qquad i_{s\_d} = -\omega \cdot C_r \cdot v_{r\_q} + C_r \cdot \frac{d}{dt} v_{r\_d}$$

$$v_{s\_q} = R_s \cdot i_{s\_q} + \omega \cdot L_s \cdot i_{s\_d} + L_s \cdot \frac{d}{dt} i_{s\_q} + v_{r\_q} \qquad i_{s\_q} = \omega \cdot C_r \cdot v_{r\_d} + C_r \cdot \frac{d}{dt} v_{r\_q}$$

$$v_{s\_0} = R_s \cdot i_{s\_0} + L_s \cdot \frac{d}{dt} i_{s\_0} + v_{r\_0} \qquad i_{s\_0} = C_r \cdot \frac{d}{dt} v_{r\_0}$$

$$v_{s\_d} = R_s \cdot i_{s\_d} - \omega \cdot L_s \cdot i_{s\_q} + L_s \cdot \frac{d}{dt} i_{s\_d} + v_{r\_d} \qquad i_{s\_d} = -\omega \cdot C_r \cdot v_{r\_q} + C_r \cdot \frac{d}{dt} v_{r\_d}$$

$$v_{s\_q} = R_s \cdot i_{s\_q} + \omega \cdot L_s \cdot i_{s\_d} + L_s \cdot \frac{d}{dt} i_{s\_q} + v_{r\_q} \qquad i_{s\_q} = \omega \cdot C_r \cdot v_{r\_d} + C_r \cdot \frac{d}{dt} v_{r\_q}$$

## Simulación en abc.

$t_f := 0.04$ $n_f := 1000$ $n := 1..n_f$ $t := 0, \frac{t_f}{n_f}..t_f$ $L_s := 10\cdot10^{-3}$ $C_r := 100\cdot10^{-6}$ $R_s := 5$



$v_{s\_a}(t) := V\cdot\sin(\omega\cdot t)$ $v_{s\_b}(t) := V\cdot\sin\left(\omega\cdot t - 2\cdot\frac{\pi}{3}\right)$ $v_{s\_c}(t) := V\cdot\sin\left(\omega\cdot t - 4\cdot\frac{\pi}{3}\right)$

$$v_{s\_a} = R_s\cdot i_{s\_a} + L_s\cdot\frac{d}{dt}i_{s\_a} + v_{r\_a} \qquad i_{s\_a} = C_r\cdot\frac{d}{dt}v_{r\_a}$$

$$v_{s\_b} = R_s\cdot i_{s\_b} + L_s\cdot\frac{d}{dt}i_{s\_b} + v_{r\_b} \qquad i_{s\_b} = C_r\cdot\frac{d}{dt}v_{r\_b}$$

$$v_{s\_c} = R_s\cdot i_{s\_c} + L_s\cdot\frac{d}{dt}i_{s\_c} + v_{r\_c} \qquad i_{s\_c} = C_r\cdot\frac{d}{dt}v_{r\_c}$$

$$A_{abc} := \begin{pmatrix} \frac{-R_s}{L_s} & 0 & 0 & \frac{-1}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-R_s}{L_s} & 0 & 0 & \frac{-1}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-R_s}{L_s} & 0 & 0 & \frac{-1}{L_s} \\ \frac{1}{C_r} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{C_r} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{C_r} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \qquad E_{abc} := \begin{pmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$D(t,x) := A_{abc}\cdot\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{pmatrix} + E_{abc}\cdot\begin{pmatrix} v_{s\_a}(t) \\ v_{s\_b}(t) \\ v_{s\_c}(t) \end{pmatrix} \qquad CI_{abc} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$Z_{abc} := \mathrm{rkfixed}(CI_{abc}, 0, t_f, n_f, D)$$

## Simulación en dq0.

$$v_{s\_d} = R_s\cdot i_{s\_d} - \omega\cdot L_s\cdot i_{s\_q} + L_s\cdot\frac{d}{dt}i_{s\_d} + v_{r\_d} \qquad i_{s\_d} = -\omega\cdot C_r\cdot v_{r\_q} + C_r\cdot\frac{d}{dt}v_{r\_d}$$

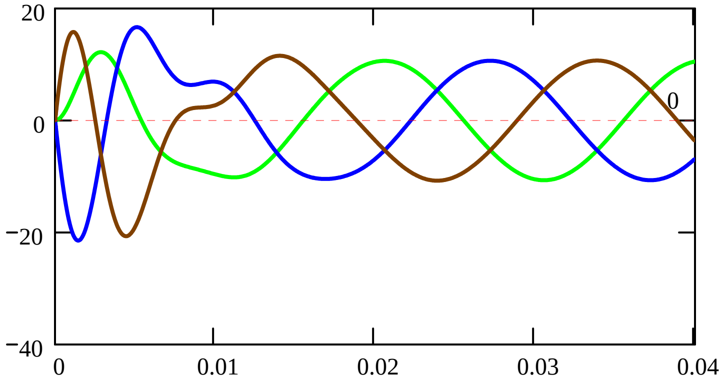
$$v_{s\_q} = R_s\cdot i_{s\_q} + \omega\cdot L_s\cdot i_{s\_d} + L_s\cdot\frac{d}{dt}i_{s\_q} + v_{r\_q} \qquad i_{s\_q} = \omega\cdot C_r\cdot v_{r\_d} + C_r\cdot\frac{d}{dt}v_{r\_q}$$

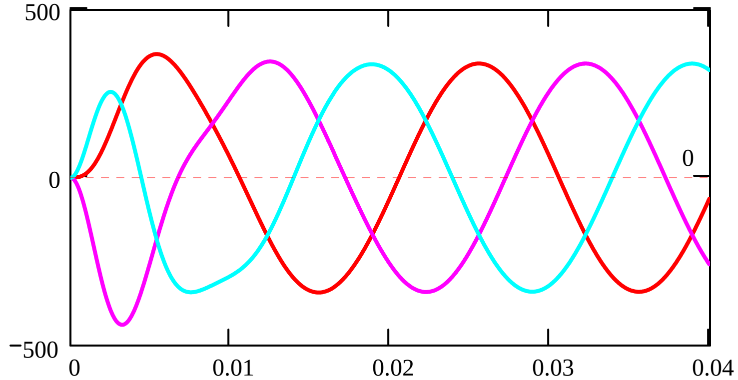
$$v_{s\_dq0}(t) := T_{abc\_dq0}(t)\cdot\begin{pmatrix} v_{s\_a}(t) \\ v_{s\_b}(t) \\ v_{s\_c}(t) \end{pmatrix}$$

$$A_{dq0} := \begin{pmatrix} \frac{-R_s}{L_s} & \omega & \frac{-1}{L_s} & 0 \\ -\omega & \frac{-R_s}{L_s} & 0 & \frac{-1}{L_s} \\ \frac{1}{C_r} & 0 & 0 & \omega \\ 0 & \frac{1}{C_r} & -\omega & 0 \end{pmatrix} \qquad E_{dq0} := \begin{pmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$D(t,x) := A_{dq0}\cdot\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} + E_{dq0}\cdot\begin{pmatrix} v_{s\_dq0}(t)_1 \\ v_{s\_dq0}(t)_2 \end{pmatrix} \qquad CI_{dq0} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

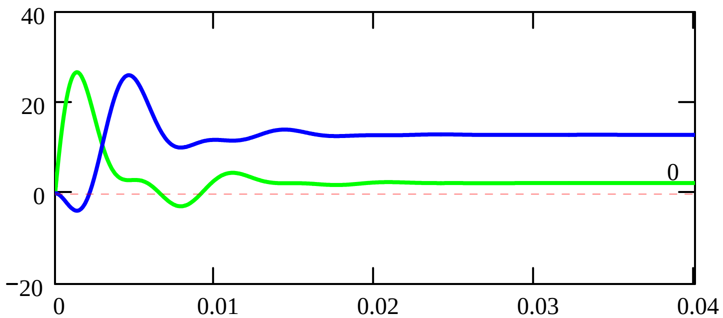
$$Z_{dq0} := \mathrm{rkfixed}(CI_{dq0}, 0, t_f, n_f, D)$$

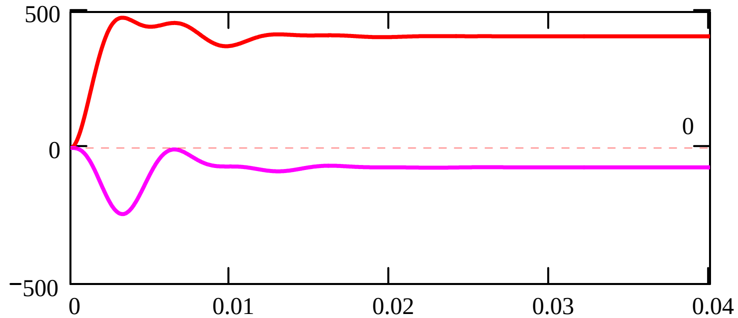




$$v_{abc_n} := \begin{pmatrix} v_{s\_a}\left(n\cdot\frac{t_f}{n_f}\right) \\ v_{s\_b}\left(n\cdot\frac{t_f}{n_f}\right) \\ v_{s\_c}\left(n\cdot\frac{t_f}{n_f}\right) \end{pmatrix}$$





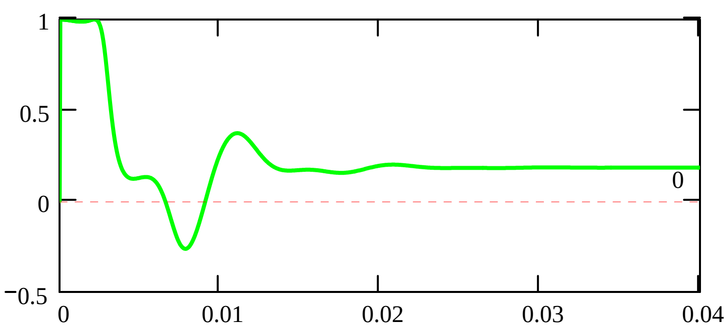


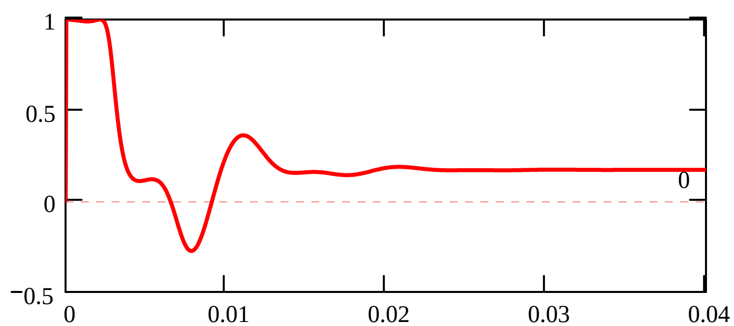
$$v_{dq0_n} := \begin{pmatrix} v_{s\_dq0}\left(n\cdot\frac{t_f}{n_f}\right)_1 \\ v_{s\_dq0}\left(n\cdot\frac{t_f}{n_f}\right)_2 \\ 0 \end{pmatrix}$$

## Factor de Potencia Total

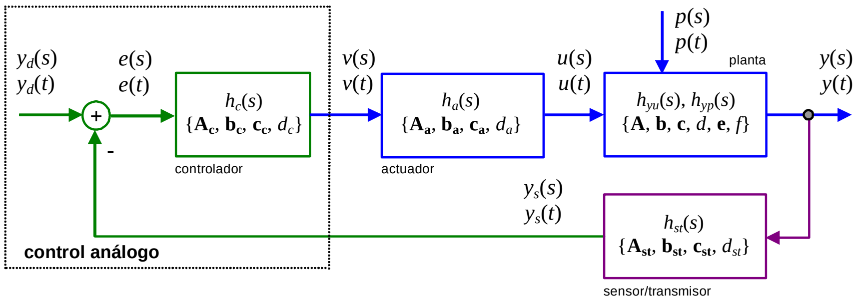
$$i_{abc_n} := \left(Z_{abc_{n,2}} \quad Z_{abc_{n,3}} \quad Z_{abc_{n,4}}\right)^T \qquad p_{abc_n} := v_{abc_n}{}^T\cdot i_{abc_n} \qquad q_{abc_n} := v_{abc_n} \times i_{abc_n} \qquad fp_{abc_n} := \frac{p_{abc_n}}{\sqrt{\left(p_{abc_n}\right)^2 + \left(q_{abc_n}{}^T\cdot q_{abc_n}\right)}}$$

$$i_{dq0_n} := \left(Z_{dq0_{n,2}} \quad Z_{dq0_{n,3}} \quad 0\right)^T \qquad p_{dq0_n} := v_{dq0_n}{}^T\cdot i_{dq0_n} \qquad q_{dq0_n} := v_{dq0_n} \times i_{dq0_n} \qquad fp_{dq0_n} := \frac{p_{dq0_n}}{\sqrt{\left(p_{dq0_n}\right)^2 + \left(q_{dq0_n}{}^T\cdot q_{dq0_n}\right)}}$$

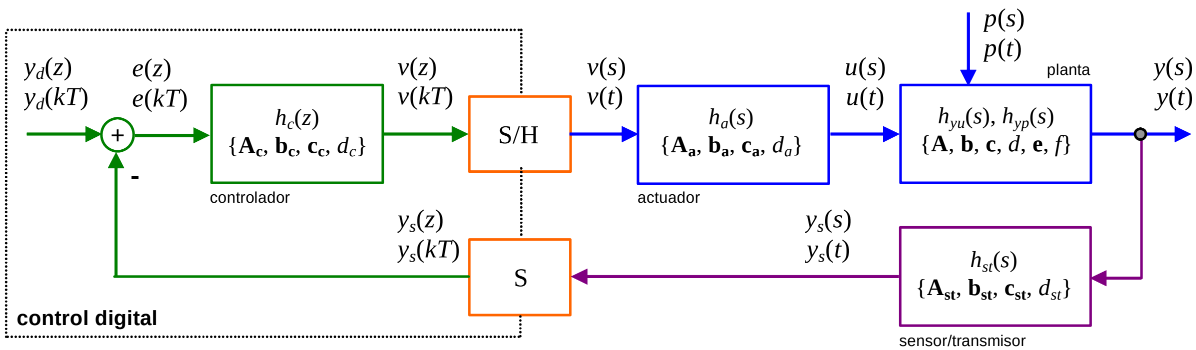




**Problema** Mostrar las alternativas de control en convertidores estáticos de potencia.




Análogo




Híbrido

**Estrategias de Control**

Lineal
- Realimentación de Estados
- Observadores
- Desacopladores

No-lineal
- Linealización Exacta
- Linealizacón Entrada/Salida

**Herramientas**

- Lyapunov
- Root Locus
- Nyquist
- Bode

- Estudio de **modulación(**SPWM, SHE y VE**), modelación (**ejes estacionarios y rotatorios con señales de conmutación y promedio**) y control (**lineal: realimentación de estados, observadores, desacopladores y no lineal: linealización exacta, entrada/salida, predictivo**)**.
- Las **aplicaciones** a estudiar serán: fuentes DC, compesadores paralelo y serie, filtros activos, accionamientos, sistemas de transmisión.
- Las **simplificaciones** son: switches ideales ($t_{on}$ y $t_{off}$ son nulos: no hay pérdidas por conmutación, $v_{on}$ nulo: no hay pérdidas por conducción y sistemas balanceados: no hay secuencia cero).