



INVERSORES

ELECTRÓNICA DE POTENCIA

1er SEMESTRE 2012

IIE



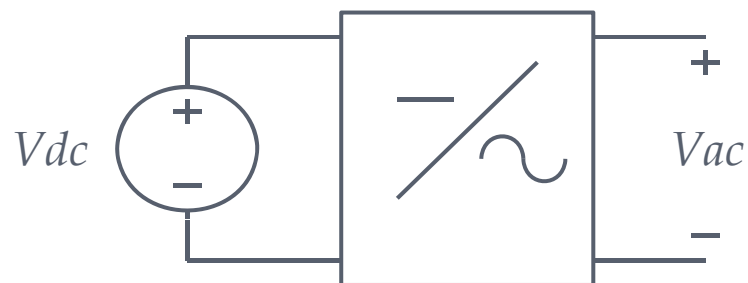
INTRODUCCIÓN

- Un inversor es un convertidor capaz de transferir energía eléctrica desde un sistema de continua a un sistema de alterna.

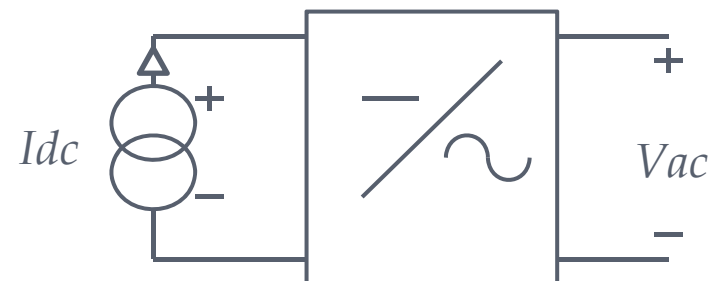


- El objetivo de un inversor es generar a partir de un sistema de continua, una tensión de salida **sinusoidal, de frecuencia y amplitud controlable**.
- Dependiendo de si el sistema de continua consiste en una fuente de tensión o una fuente de corriente, se clasifica el inversor en:

VSI: Voltage Source Inverter:



CSI: Current Source Inverter:



INTRODUCCIÓN

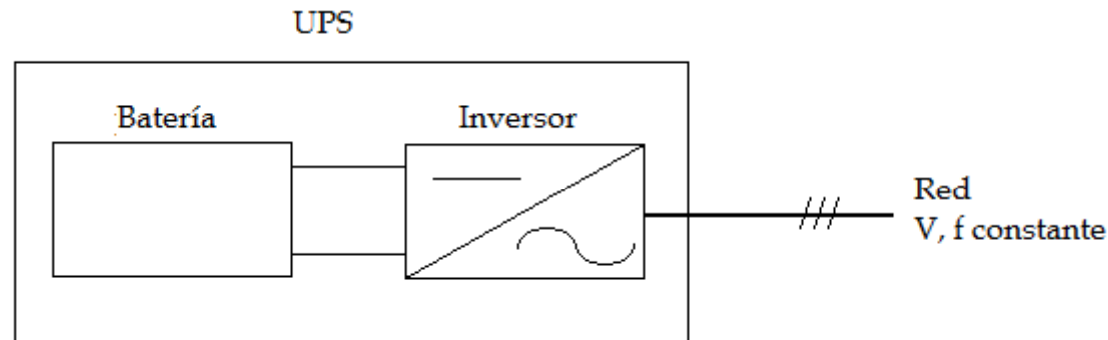
- Nos concentraremos en los VSI por ser los convertidores más usados.
- Las técnicas que se desarrollarán para los VSI son aplicables, con cambios menores, para los CSI.
- Importancia de la forma de onda de la tensión de salida y de la magnitud de sus armónicos.
 - Los armónicos causan pérdidas, generan ruido audible, etc..

APLICACIONES

- Respaldo de energía, UPS:

Una de las formas más comunes de almacenamiento de energía eléctrica de pequeño porte es en continua, mediante el uso de baterías.

Dado que para la mayoría de las aplicaciones debemos disponer de “corriente alterna”, necesitamos de un inversor para poder utilizar la energía almacenada en la batería:

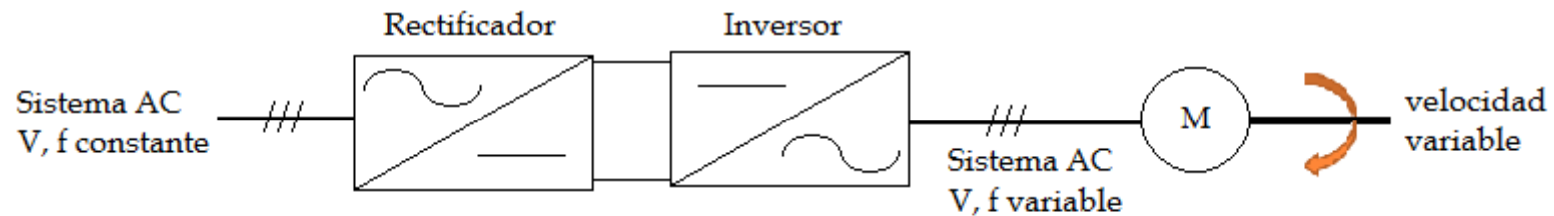


APLICACIONES

- Control de velocidad de motores de inducción:

El variador de frecuencia nos permite a partir de un sistema de AC de tensión y frecuencia fijos, obtener un sistema AC donde la amplitud y la frecuencia de la tensión de salida son controlables.

De esta forma, mediante un variador de frecuencia, contamos con una tensión AC de magnitud y frecuencia controlables, que podemos utilizar para controlar la velocidad de un motor:



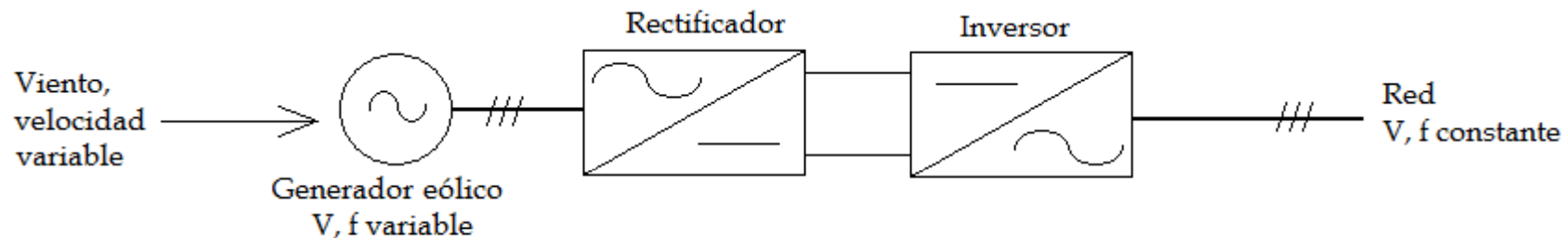
APLICACIONES

- Generadores eólicos:

Para optimizar la extracción de energía del viento, el generador eólico funciona a velocidad variable, generando un sistema trifásico de frecuencia variable.

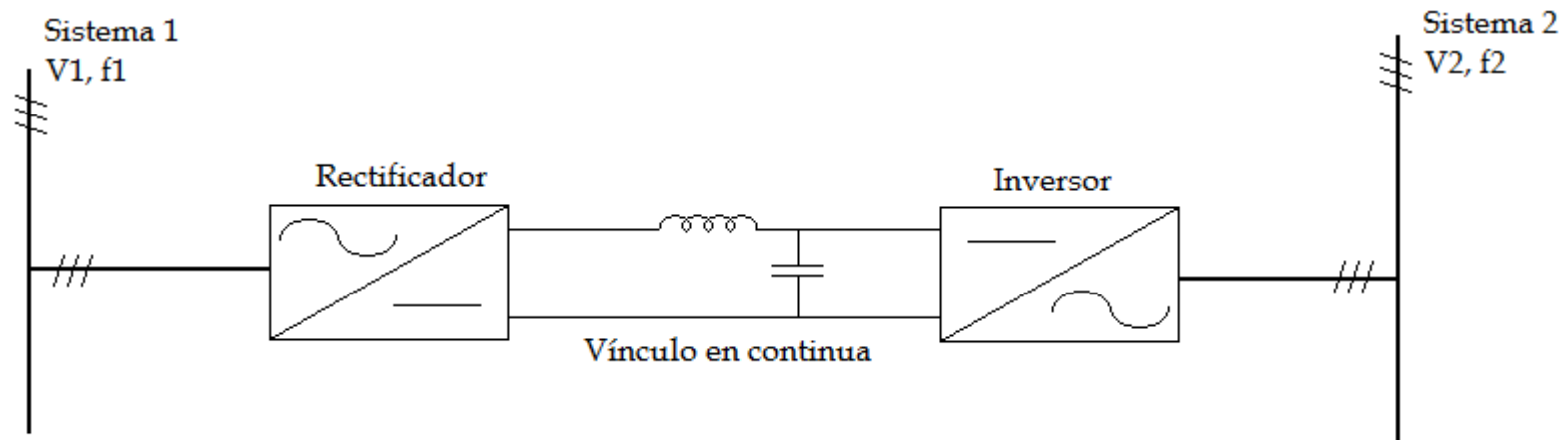
El sistema eléctrico al que se conecta el generador eólico es de frecuencia constante, en el caso del sistema uruguayo, 50 Hz. Por lo tanto, es necesario “acondicionar” el sistema trifásico generado por el generador, para poder interconectarlo al sistema eléctrico.

Esto es realizado mediante un rectificador y un inversor, como podemos ver en el esquema.



APLICACIONES

- Convertidora de frecuencia AC-AC: Utilizada para interconectar sistemas eléctricos de diferentes frecuencias, o con estrategias de regulación de frecuencia diferentes.



En Uruguay actualmente tenemos una convertidora de frecuencia funcionando en Rivera, que conecta el sistema eléctrico uruguayo, de 50 Hz, con el sistema brasilero, de 60 Hz. El vínculo es capaz de transportar del orden de 70 MVA de potencia.

Próximamente, se instalará una nueva convertidora de frecuencia en Melo, para interconectar nuevamente Uruguay y Brasil, esta vez con un vínculo mucho mayor, de 500 MVA.

APLICACIONES

UPS



Variadores de frecuencia



Generador Eólico:



Aplicación HVDC



PLAN DE TRABAJO

1. Rama inversora.
2. Puente inversor.
3. Técnicas de control para reducir o eliminar armónicos.
 - a) Técnicas de reducción de armónicos.
 - Control por desfasaje de ondas.
 - PWM sinusoidal
 - b) Técnicas de eliminación explícita de armónicos.
 - PWM calculado
4. Generalización a sistemas trifásicos.
 - a) Conexión Fork.

Se realizarán simulaciones empleando el simulador de circuitos SiMEEP.

Se podrán variar ciertos parámetros durante la simulación.

PLAN DE TRABAJO

1. **Rama inversora.**
2. Puente inversor.
3. Técnicas de control para reducir o eliminar armónicos.
 - a) Técnicas de reducción de armónicos.
 - Control por desfasaje de ondas.
 - PWM sinusoidal
 - b) Técnicas de eliminación explícita de armónicos.
 - PWM calculado
4. Generalización a sistemas trifásicos.
 - a) Conexión Fork.

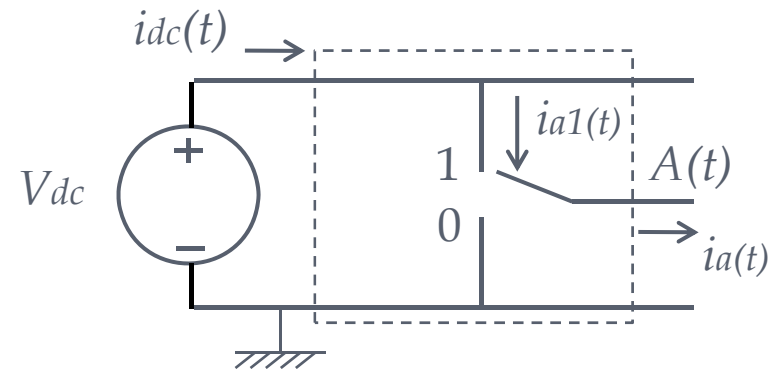
RAMA INVERSORA

- Llamaremos rama inversora al circuito contenido en el recuadro punteado. Se asimila a una llave de dos posiciones.

- Tiene tres bornes de conexión:

- Borne positivo (1).
- Borne negativo (0).
- Referencia de potenciales.
- Borne de salida (A).

La tensión de salida, referida al borne 0, será $A(t)$.



- La función $a(t)$ controla la posición de la llave. Tomando los valores 0 y 1 lleva la llave a la posición 0 o 1 respectivamente.

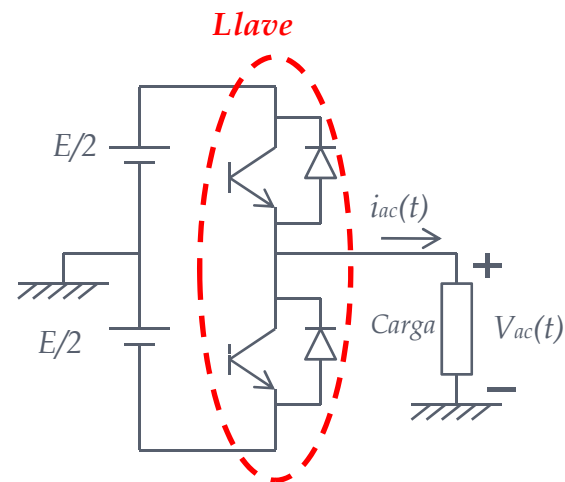
- El potencial de salida de la rama se puede expresar como: $A(t) = a(t)V_{dc}$

- La corriente entregada por la fuente de continua se puede expresar como: $i_{dc}(t) = a(t)i_a(t)$

- Se observa que la llave debe ser bidireccional, para dar camino a la corriente en ambos sentidos. **¿Cómo se implementa la llave?**

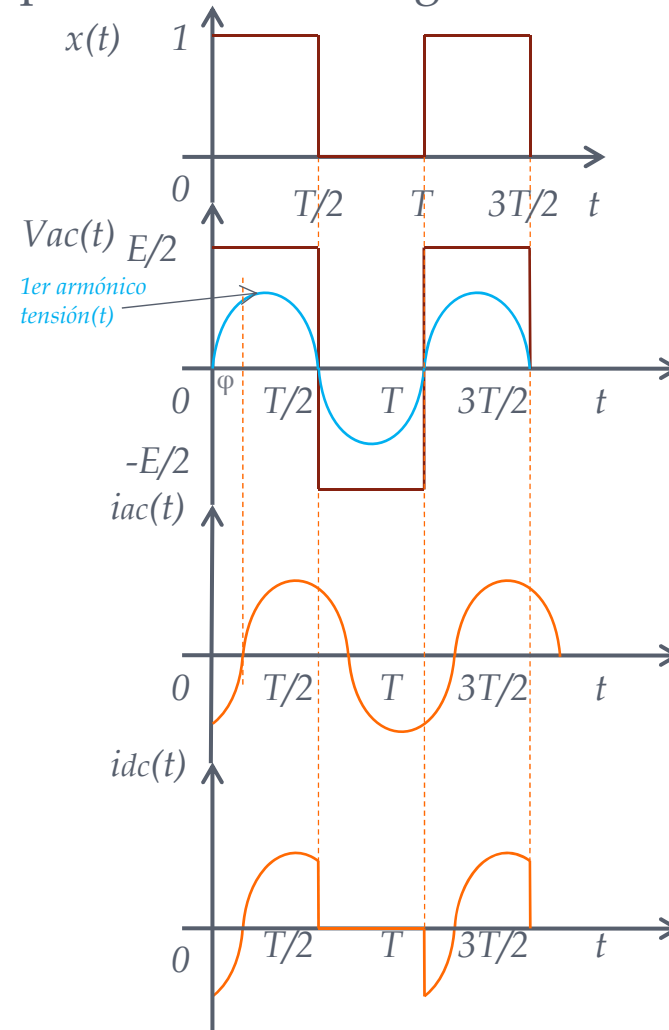
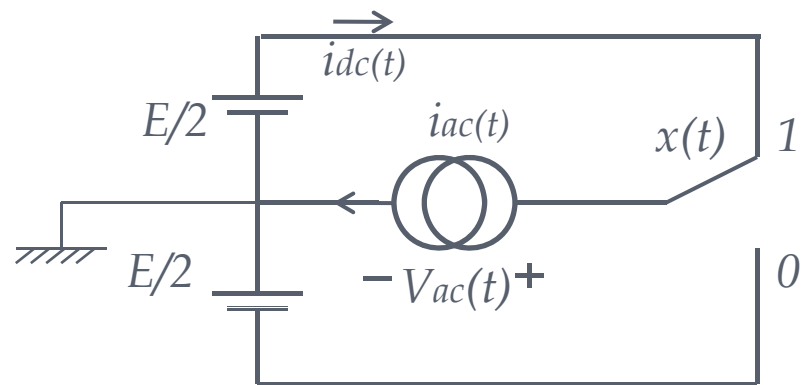
RAMA INVERSORA

- La llave se implementa mediante dos conjuntos de transistor y diodo de rueda libre.
 - Cuando la función de control vale 1, conducirá el grupo transistor + diodo superior, imponiendo una tensión igual a $+E/2$ a la salida.
 - Cuando la función de control vale 0, conducirá el grupo transistor + diodo inferior, imponiendo una tensión igual a $-E/2$ a la salida.
 - En cada caso, dependiendo de la polaridad de la corriente consumida por la carga, conducirá o el transistor, o el diodo.



RAMA INVERSORA

- Suponiendo que la función de control de la rama $x(t)$ es periódica, del mismo período de la corriente alterna $i_{ac}(t)$ que consume la carga, tendremos las siguientes formas de onda:



RAMA INVERSORA

- Potencia eléctrica que consume la carga:

$$P_{AC} = \frac{1}{T} \int_0^T V_{AC}(t) i_{AC}(t) dt = \frac{E I_{ef} \sqrt{2}}{T} \left[\int_0^{\frac{T}{2}} \sin(2\pi ft - \varphi) dt - \int_{\frac{T}{2}}^T \sin(2\pi ft - \varphi) dt \right]$$

$$P_{AC} = \frac{\sqrt{2} E I_{ef}}{\pi} \cos(\varphi)$$

donde φ es el desfase entre el primer armónico de la corriente y el primer armónico de la tensión de salida.

- Potencia entregada por la fuente de continua superior:

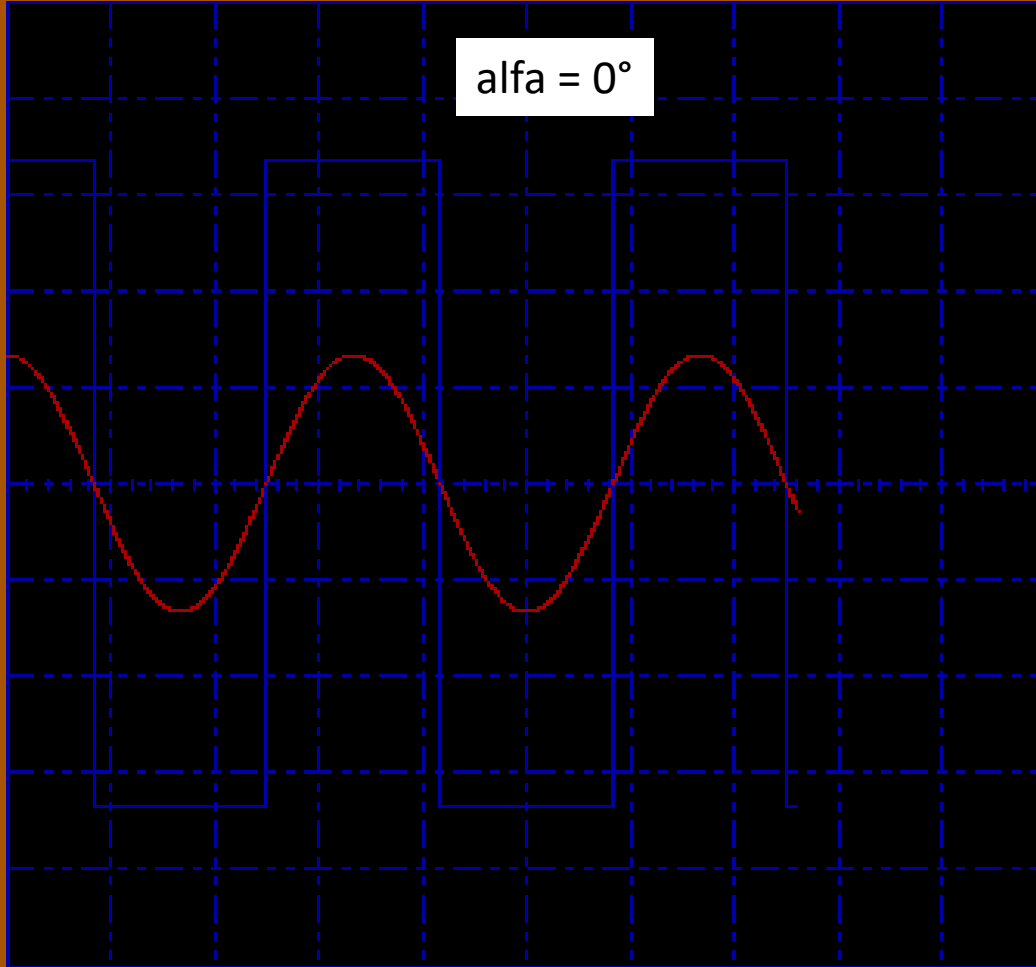
$$P_{DC\ sup} = \frac{E}{2} \times \frac{1}{T} \int_0^T i_{DC}(t) dt = \frac{\sqrt{2} E I_{ef}}{2T} \left[\int_0^{\frac{T}{2}} \sin(2\pi ft - \varphi) dt \right] = \frac{\sqrt{2} E I_{ef}}{2\pi} \cos(\varphi) = \frac{P_{AC}}{2}$$

- **Simulación 1.**
- Al variar el desfase entre el primer armónico de la corriente y el primer armónico de la tensión de salida varía la potencia activa suministrada por la fuente de continua. En particular si el desfase es 90° , la potencia entregada por la fuente de continua es nula.

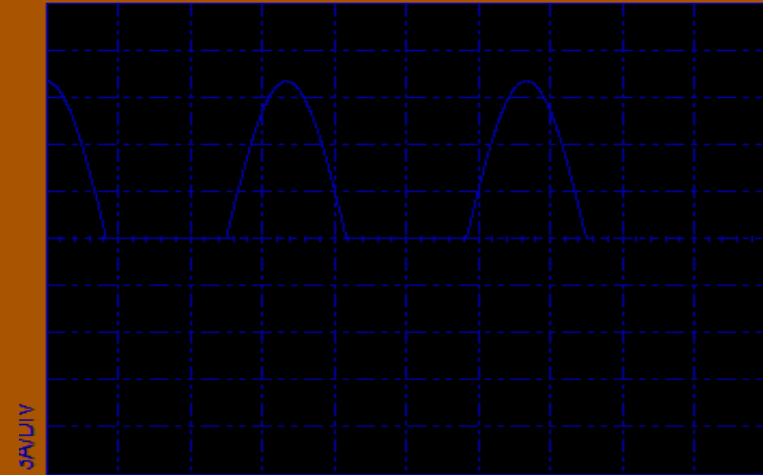
Sim01 de InvSiMEEP: Rama Inversora

Vac (Azul) - Iac (Rojo)

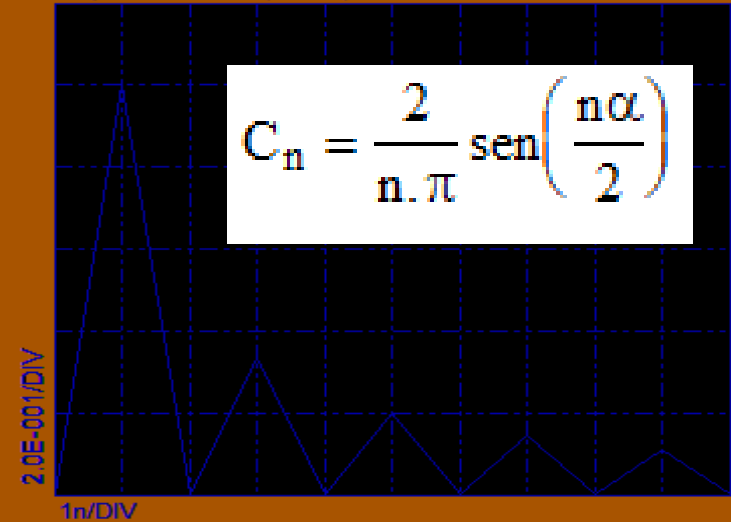
alfa = 0°



I_{dc}



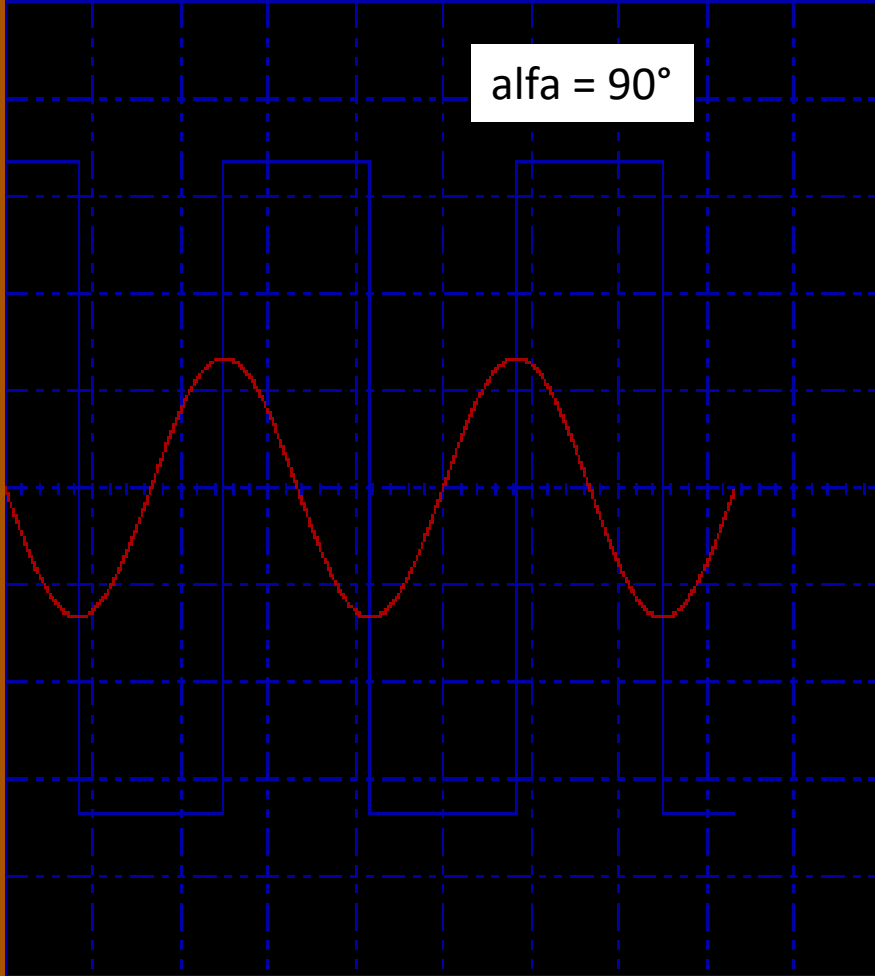
Espectro de Vac (Un/U1)



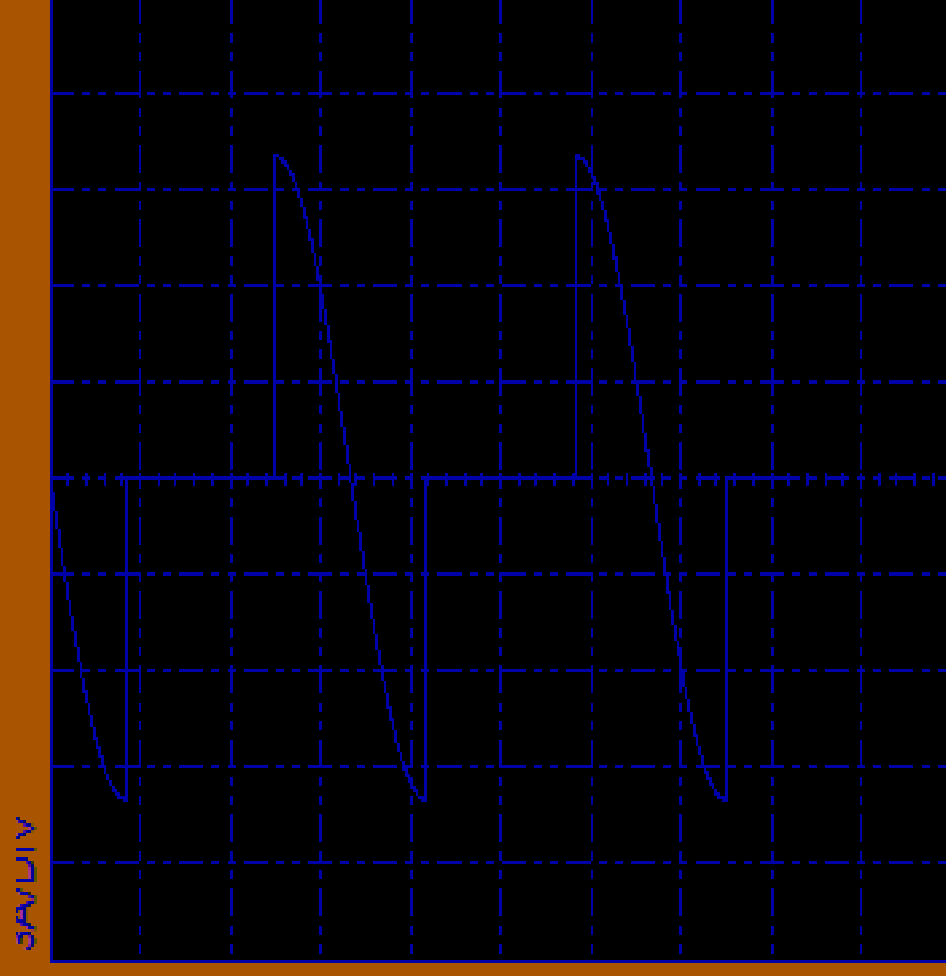
Sim01 de InvSiMEEP: Rama Inversora

Vac (Azul) - Iac (Rojo)

alfa = 90°



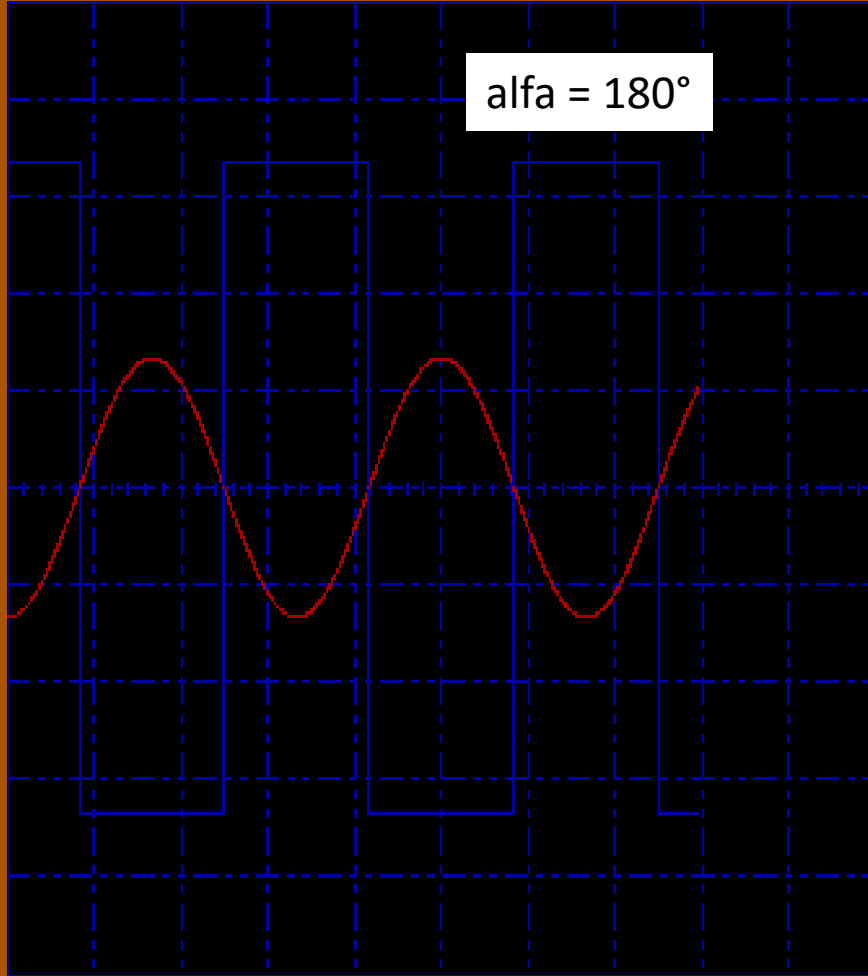
I_{dc}



Sim01 de InvSiMEEP: Rama Inversora

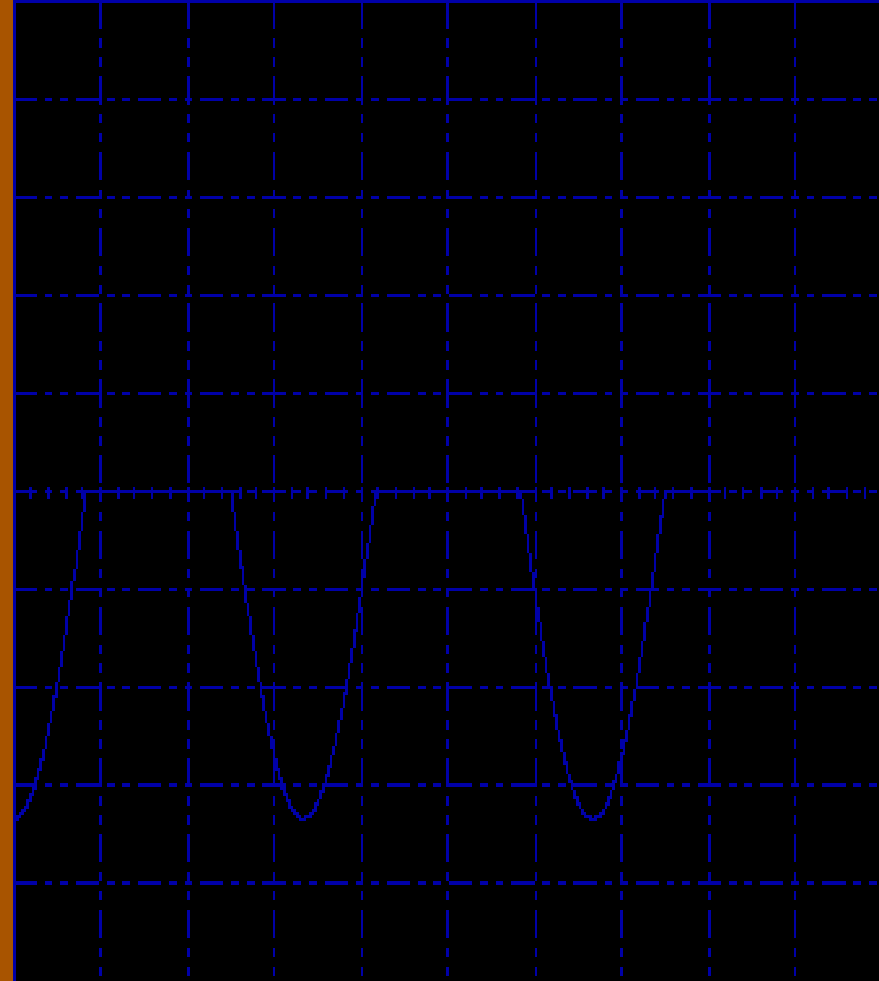
Vac (Azul) - Iac (Rojo)

alfa = 180°

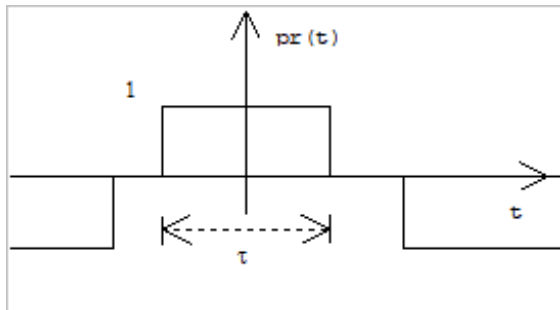


I_{dc}

3A/DIV



¿Forma fácil de calcular P_{AC} , P_1 y P_2 ?

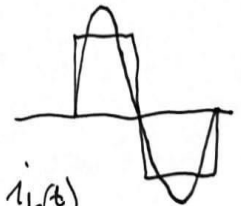


$$C_n = \frac{2}{n \cdot \pi} \text{sen}\left(\frac{n\alpha}{2}\right)$$

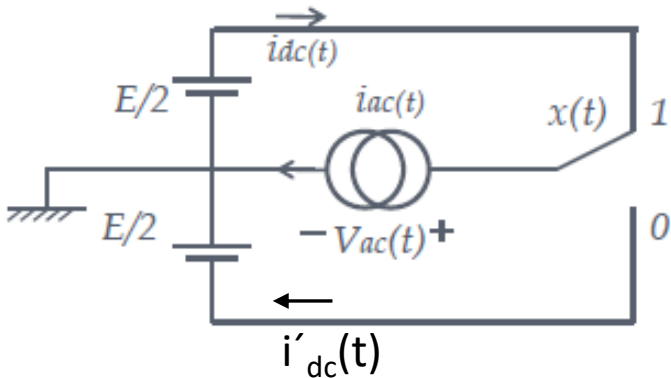
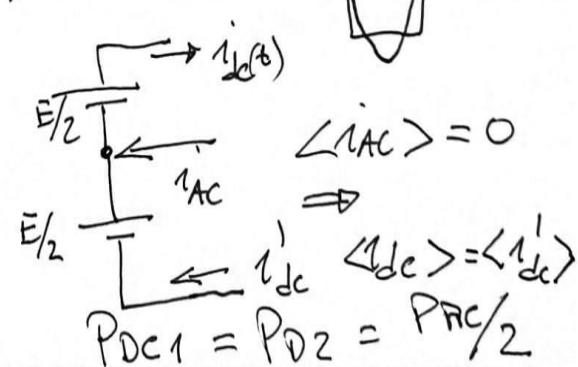
$$P_{AC} = P_{DC} + \sum_{\substack{n=1 \\ \phi \neq n \neq 1}}^{\infty} \underbrace{U_{nq}}_{\langle V_{ac} \rangle} \cdot \underbrace{I_{nq}}_{\langle i_{ac} \rangle} \cos \phi_n = \underline{\underline{U_{1ef} \cdot I_{1q} \cos \phi}}$$

$\langle V_{ac} \rangle = 0$

tonces $U_{1ef} = \underbrace{\frac{2}{n\pi} \times \text{sen}\left(\frac{n\pi}{2}\right)}_{\pm 1} \times 2 \times \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{E}{2} = \frac{E\sqrt{2}}{\pi}$



$$P_{AC} = \frac{\sqrt{2} E I_{1q} \cos \phi}{\pi}$$

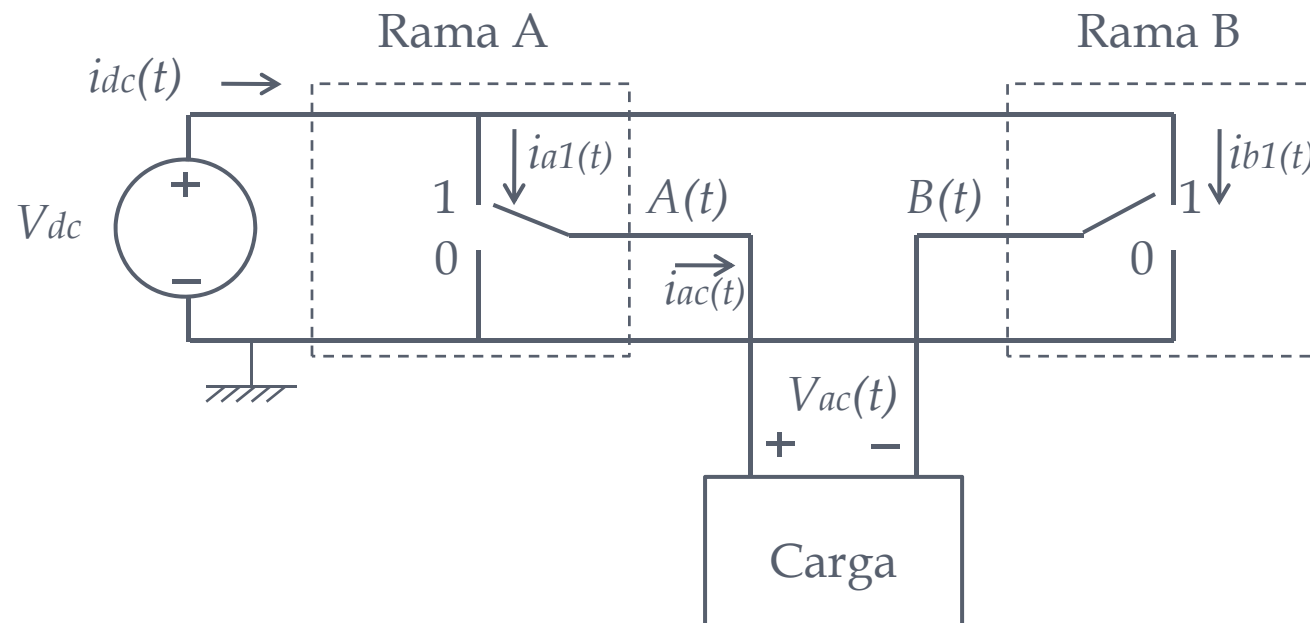


PLAN DE TRABAJO

1. Rama inversora.
2. **Puente inversor.**
3. Técnicas de control para reducir o eliminar armónicos.
 - a) Técnicas de reducción de armónicos.
 - Control por desfasaje de ondas.
 - PWM sinusoidal
 - b) Técnicas de eliminación explícita de armónicos.
 - PWM calculado
4. Generalización a sistemas trifásicos.
 - a) Conexión Fork.

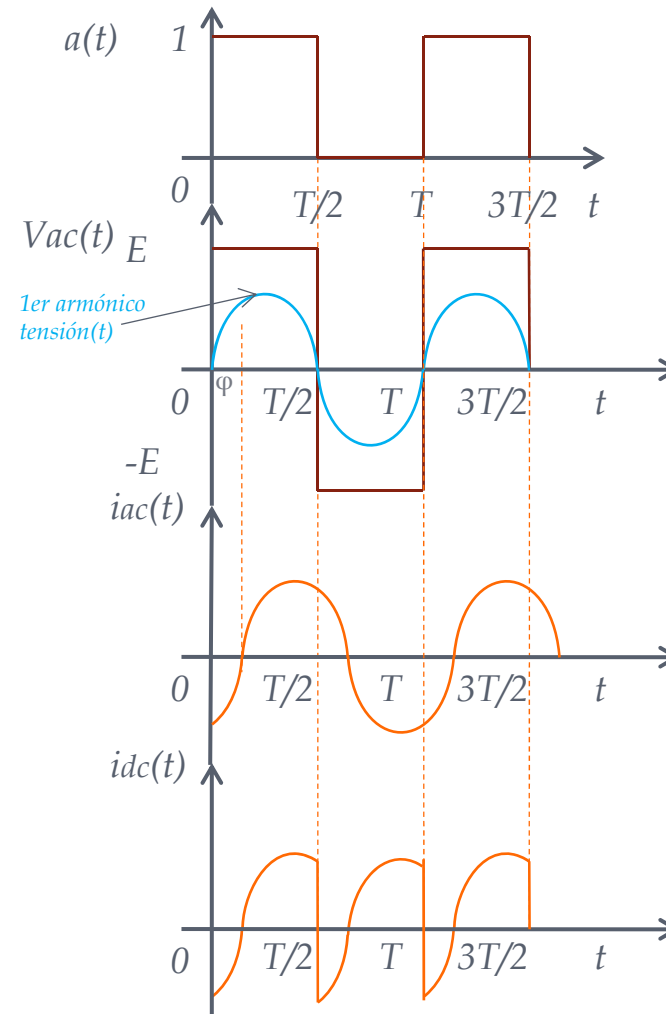
PUENTE INVERSOR

- Un inversor está formado generalmente por más de una rama. Las identificaremos como ramas A, B, etc. y la tensión en sus bornes de salida será $A(t)$, $B(t)$, etc. respectivamente.
- Sea el puente inversor de 2 ramas, que alimenta una carga de alterna (con funciones de control de ramas $a(t)$ y $b(t)$ respectivamente) de la figura:

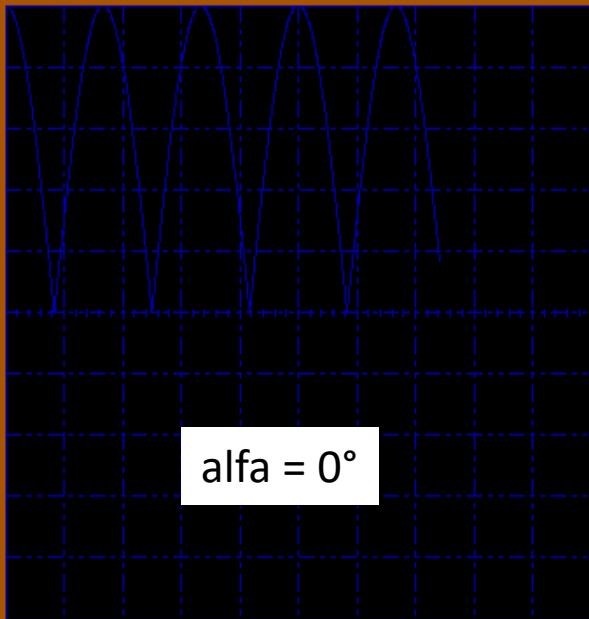


PUENTE INVERSOR

- Suponiendo que las llaves se manejan de manera complementaria y que las señales de control $a(t)$ y $b(t)$ son periódicas, del mismo período de la corriente alterna $i_{ac}(t)$ que consume la carga, se tiene una tensión de salida de la forma:
- **Simulación 2.**
- Es posible observar cómo cambia la corriente media entregada por la fuente de continua al variar el ángulo de desfase entre los primeros armónicos de corriente y tensión en la carga.

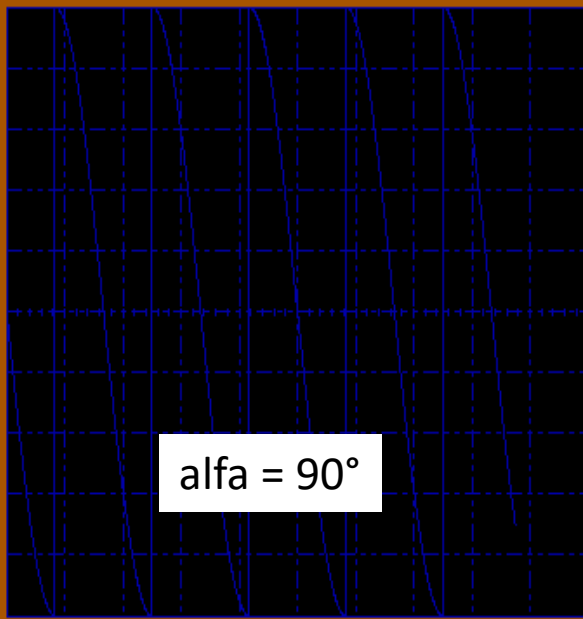


Idc



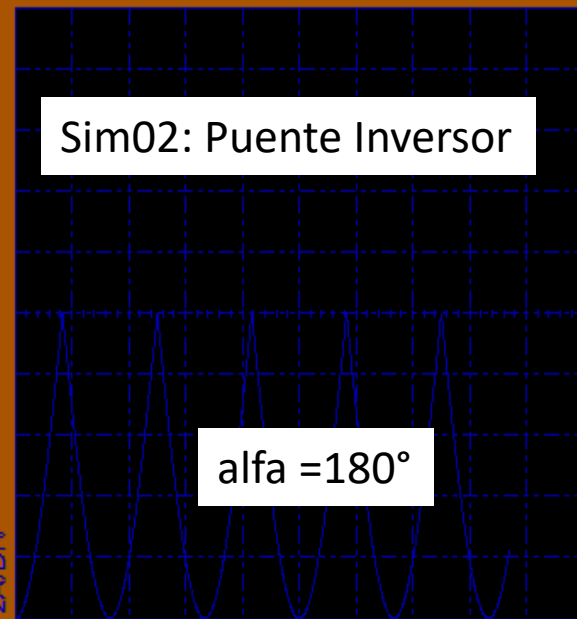
alfa = 0°

Idc



alfa = 90°

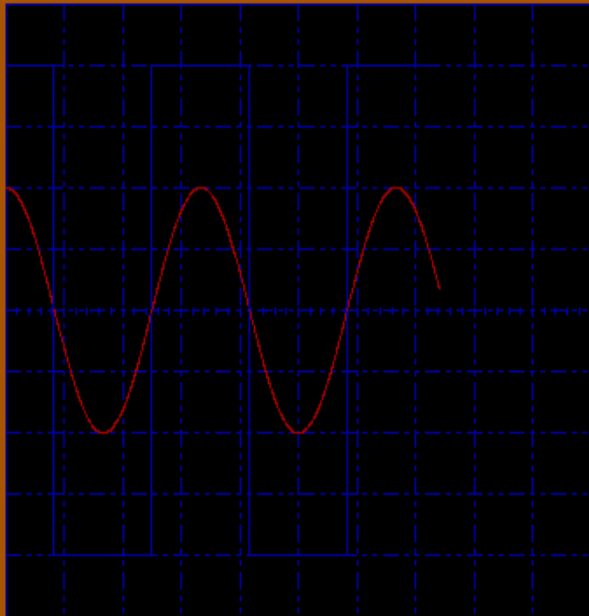
Idc



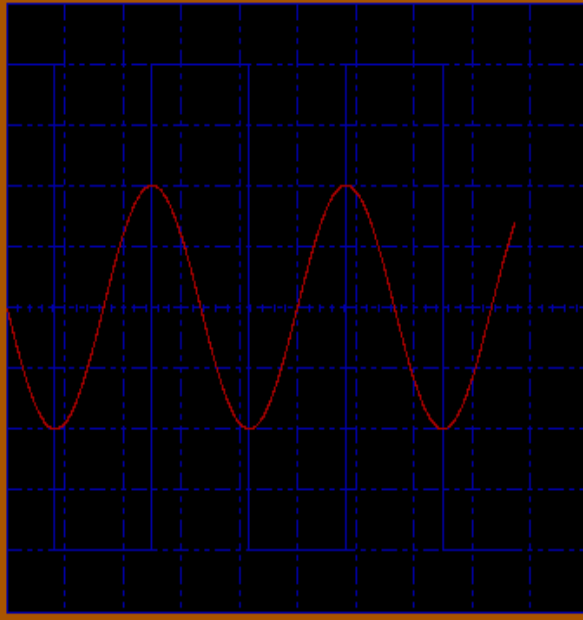
alfa = 180°

Sim02: Puente Inversor

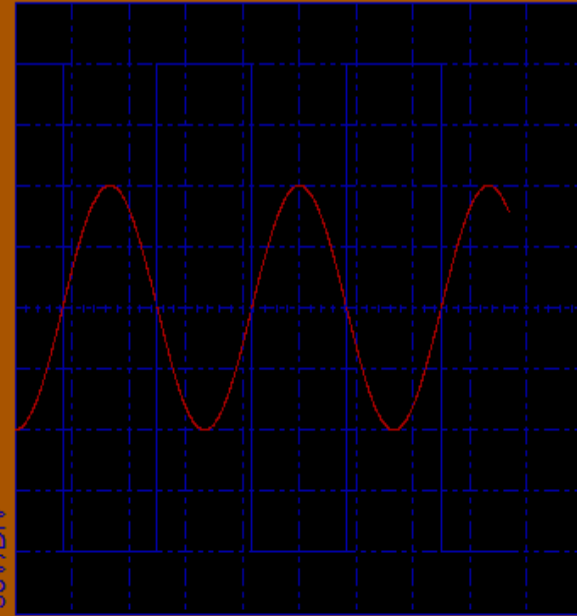
Vac (Azul) - Iac (Rojo)



Vac (Azul) - Iac (Rojo)



Vac (Azul) - Iac (Rojo)



PUENTE INVERSOR

- El contenido armónico de la tensión de salida vale:
$$\begin{cases} C_n = \frac{2E}{\pi n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \forall n \neq \dot{2} \\ C_n = 0 \forall n = \dot{2} \text{ y } n = 0 \end{cases}$$
 - Están presentes todos los armónicos impares.
 - El contenido armónico decrece al aumentar **n**.

- El valor eficaz de los armónicos de la onda de salida es:

$$V_{n_{ef}} = \frac{2}{\sqrt{2}} C_n = \frac{2\sqrt{2}E}{\pi n} \sin\left(\frac{n\pi}{2}\right) \forall n \neq \dot{2}$$

- El valor eficaz de la onda de salida es:

$$V_{ac_{ef}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T V_{ac}(t)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} E^2(T)} = E$$

PUENTE INVERSOR

- Aplicando Parsevall es posible calcular de manera exacta el valor de la distorsión armónica de la salida del inversor (aplicando una de las definiciones de la misma):

$$D = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{+\infty} C_{n_{ef}}^2}}{V_{ac_{ef}}} = \frac{\sqrt{V_{ac_{ef}}^2 - V_{1_{ef}}^2}}{V_{ac_{ef}}} = \frac{\sqrt{E^2 - \left(E \frac{2\sqrt{2}}{\pi}\right)^2}}{E} = 0.435$$

Parsevall

- En general no es tan sencillo predecir cual es el valor eficaz total de la salida, por lo que a los efectos prácticos, el residuo armónico se define por Norma, por ejemplo hasta el armónico 25 inclusive. En este caso la distorsión armónica valdría **0.420**.

PLAN DE TRABAJO

1. Rama inversora.
2. Puente inversor.
3. **Técnicas de control para reducir o eliminar armónicos.**
 - a) Técnicas de reducción de armónicos.
 - Control por desfasaje de ondas.
 - PWM sinusoidal
 - b) Técnicas de eliminación explícita de armónicos.
 - PWM calculado
4. Generalización a sistemas trifásicos.
 - a) Conexión Fork.

TÉCNICAS DE REDUCCIÓN Y ELIMINACIÓN DE ARMÓNICOS

- El principal objetivo al controlar un inversor, es determinar el valor del primer armónico de la tensión de salida, y reducir o eliminar el residuo armónico.
- Existen 2 grupos de técnicas para implementar el control de un inversor:
 - Técnicas de reducción del contenido armónico no deseado.
 - Técnicas de eliminación explícita de ciertos armónicos seleccionados.
- La elección de la técnica dependerá de los requerimientos de la aplicación para la que se diseñe, y las herramientas disponibles.
- Limitantes para estas técnicas son la tecnología (componentes semiconductores) y la capacidad de procesamiento digital.

PLAN DE TRABAJO

1. Rama inversora.
2. Puente inversor.
3. **Técnicas de control para reducir o eliminar armónicos.**
 - a) **Técnicas de reducción de armónicos.**
 - **Control por desfasaje de ondas.**
 - PWM sinusoidal
 - b) Técnicas de eliminación explícita de armónicos.
 - PWM calculado
4. Generalización a sistemas trifásicos.
 - a) Conexión Fork.

CONTROL POR DESFASAJE DE ONDAS

- El comando del inversor monofásico de onda cuadrada se implementa enviando la misma señal de control a ambas ramas del puente, pero desfasadas un tiempo τ (ángulo α) que variaremos.
- Modificando éste ángulo, es posible controlar el valor del primer armónico de tensión de la carga.
- Observamos que:
 - Si $\alpha=180^\circ$, $V_{ac}(t)$ es la onda cuadrada convencional
 - Si $\alpha=0^\circ$, $V_{ac}(t) = 0$
 - Si α toma un valor intermedio, $V_{ac}(t)$ será un pulso rectangular genérico.

CONTROL POR DESFASAJE DE ONDAS

○ Estas son las formas de onda para un puente inversor que alimenta una carga modelada como fuente de corriente sinusoidal, con control por desfase de ondas.

○ La forma de onda de la tensión de salida es un pulso rectangular periódico.

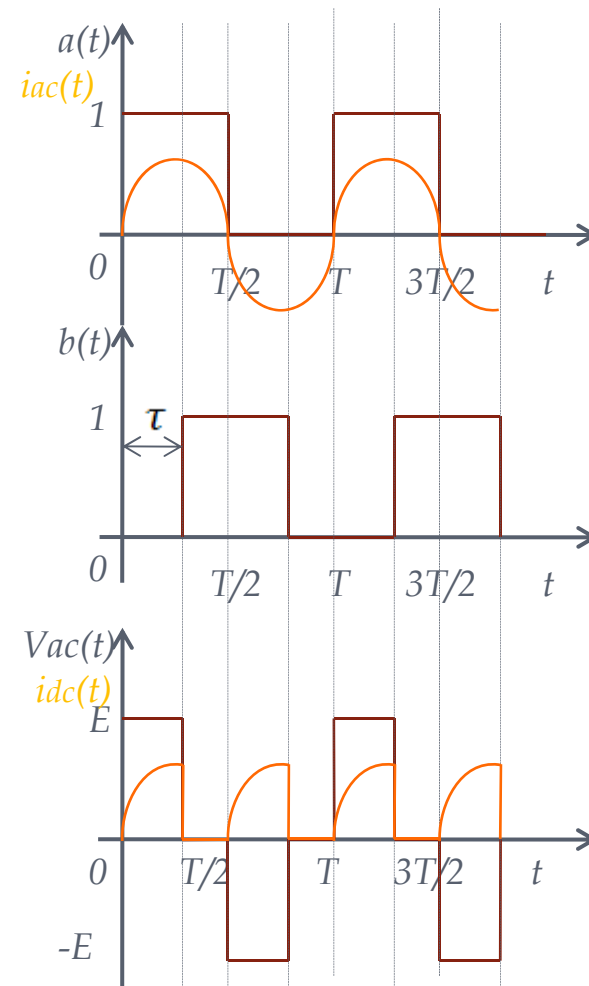
○ El contenido armónico de esta forma de onda ya es conocido por nosotros:

$$\begin{cases} C_n = \frac{2E}{\pi n} \sin\left(\frac{\alpha n}{2}\right) \forall n \neq 2 \\ C_n = 0 \forall n = 2 \text{ y } n = 0 \end{cases} \quad \text{con } \alpha = \frac{2\pi\tau}{T}$$

○ Y el valor eficaz de los armónicos vale:

$$V_{nef} = \frac{2}{\sqrt{2}} C_n = \frac{2\sqrt{2}E}{\pi n} \sin\left(\frac{\alpha n}{2}\right) \forall n \neq 2$$

○ Simulación 3.



CONTROL POR DESFASAJE DE ONDAS

- Valor eficaz de la tensión de salida:

$$V_{ac\,ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V_{ac}(t)^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \left[\int_0^\tau E^2 dt + \int_{\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}+\tau} E^2 dt \right]}$$

$$V_{ac\,ef} = E \sqrt{\frac{2\tau}{T}} = E \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}$$

- Distorsión armónica de la tensión de salida (aplicando una de las definiciones de la misma):

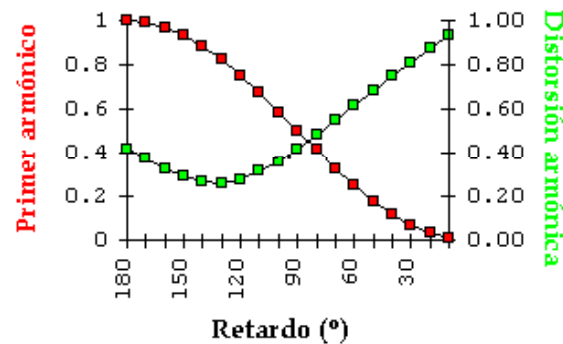
$$D = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{+\infty} C_{n\,ef}^2}}{V_{ac\,ef}} = \frac{\sqrt{V_{ac\,ef}^2 - V_{1\,ef}^2}}{V_{ac\,ef}} = \frac{\sqrt{\left(E \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}\right)^2 - \left(E \frac{2\sqrt{2}}{\pi}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)}}{E \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}}$$

Parsevall

$$D = \sqrt{1 - \frac{8}{\pi\alpha} \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

CONTROL POR DESFASAJE DE ONDAS

- Modificando el ángulo de retardo, es posible, además de controlar el valor del primer armónico de tensión de la carga, incidir en el contenido armónico residual en la carga.
 - Con $\alpha=120^\circ$ se elimina el 3^{er} armónico.
 - Con $\alpha=72^\circ$ o 144° se elimina el 5^{to} armónico.
- Alrededor de los 120° y 144° la distorsión armónica es mínima.
- Es razonable controlar la tensión del inversor en el rango $[180^\circ, 90^\circ]$ dado que fuera de este rango la distorsión armónica crece considerablemente.



- En este caso también puede observarse como cambia la corriente media entregada por la fuente de continua al variar el ángulo de desfase entre el primer armónico de corriente y el primer armónico de tensión.

Control por desfasaje: Distorsión Armónica

$$V_{n_{ef}} = \frac{2}{\sqrt{2}} C_n = \frac{2\sqrt{2}E}{\pi n} \sin\left(\frac{\alpha n}{2}\right) \quad \forall n \neq 2$$

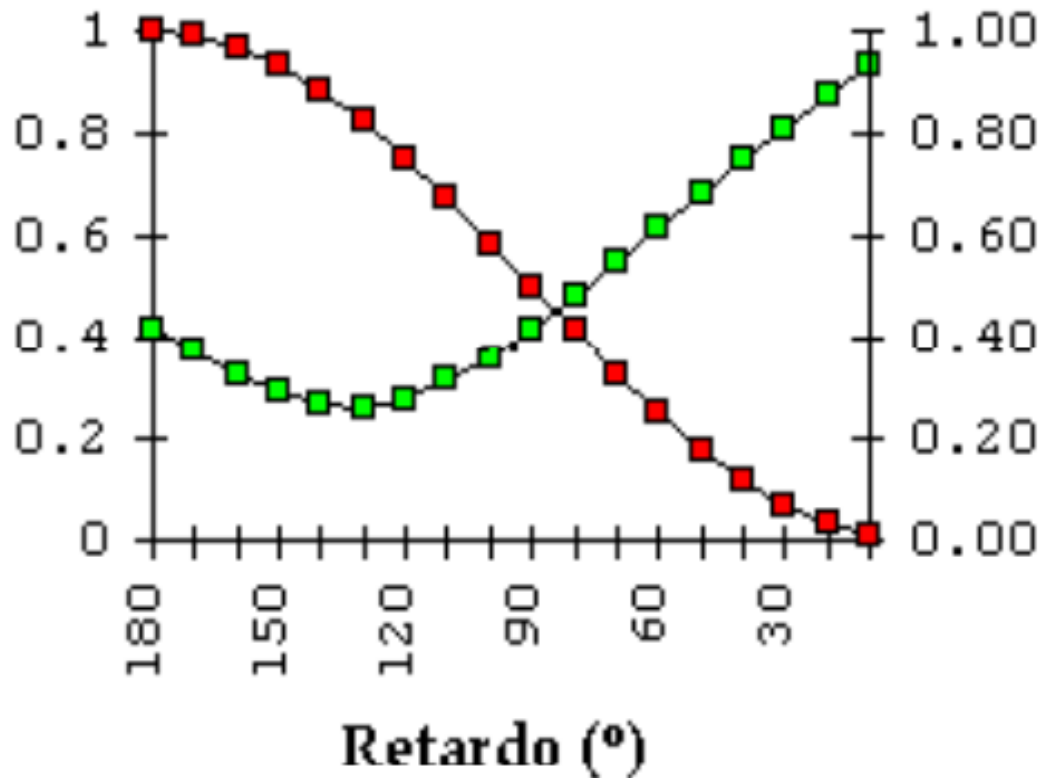
- Con $\alpha=120^\circ$ se elimina el 3^{er} armónico.
- Con $\alpha=72^\circ$ o 144° se elimina el 5^{to} armónico.

$$V_{ac_{ef}} = E \sqrt{\frac{2\tau}{T}} = E \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}$$

$$D = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{+\infty} C_{n_{ef}}^2}}{V_{ac_{ef}}}$$

$$D = \sqrt{1 - \frac{8}{\pi\alpha} \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)}$$

Primer armónico



Distorsión armónica