

TEMA1: TEORÍA DE CONVERTIDORES ELECTRÓNICOS DE POTENCIA DC-AC O INVERSORES

F. Javier Maseda

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS Y AUTOMÁTICA
SISTEMEN INGENIARITZA ETA AUTOMATIKA SAILA**



Introducción

Por inversión entendemos la transformación de energía continua en energía alterna. Esta energía alterna tendrá unas características de frecuencia y valor eficaz que se deberán poder controlar.

El proceso de transformación en este tipo de convertidores también va a producir una distorsión armónica que deberemos analizar para minimizar su efecto, tanto en la carga como en la fuente de energía continua a la que estará conectado el inversor.

En los inversores los **dos objetivos que se deberá tratar de optimizar** son:

1. El mayor valor eficaz del primer armónico para el nivel de tensión continua de entrada
2. La mínima generación de armónicos.

Se van a analizar dos topologías básicas de inversores:

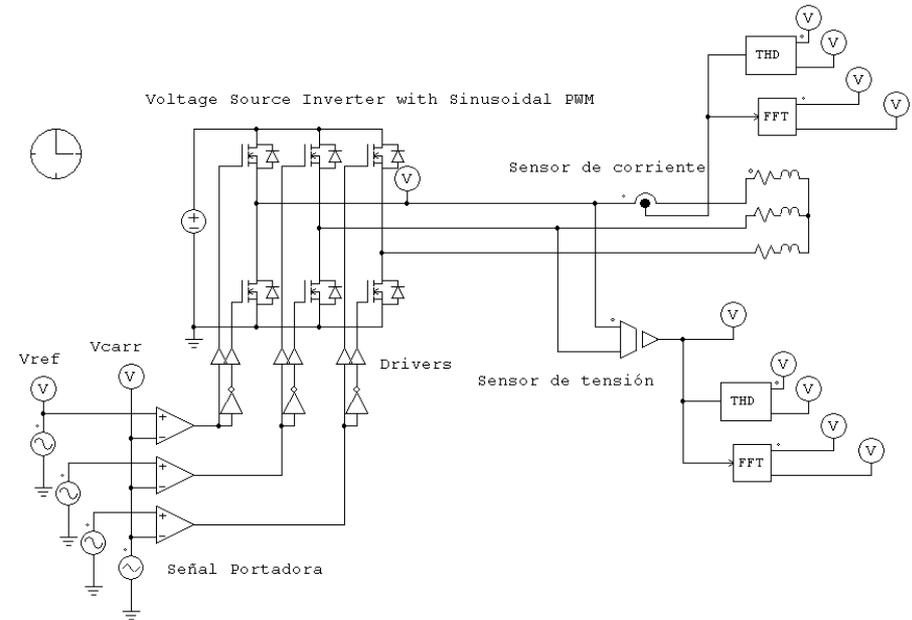
- Inversores monofásicos
- Inversores trifásicos



Introducción: Modelo de simulación

En los convertidores DC-AC o inversores es necesario, para su mejor comprensión, el uso de modelos de simulación e instrumentación especializada. En este curso se va a utilizar el software de simulación PSIM.

Se puede obtener una versión demo en la pagina de PSIM (www.powersimtech.com) con la que se pueden implementar todos los ejemplos presentados en el curso.



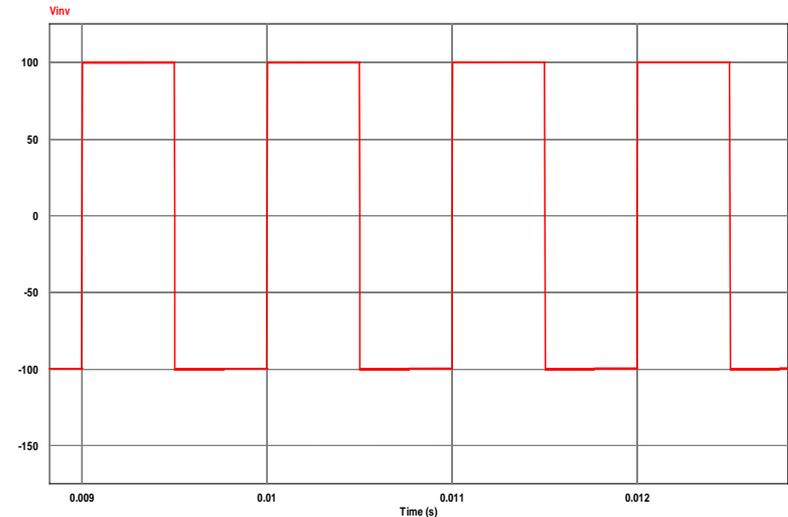
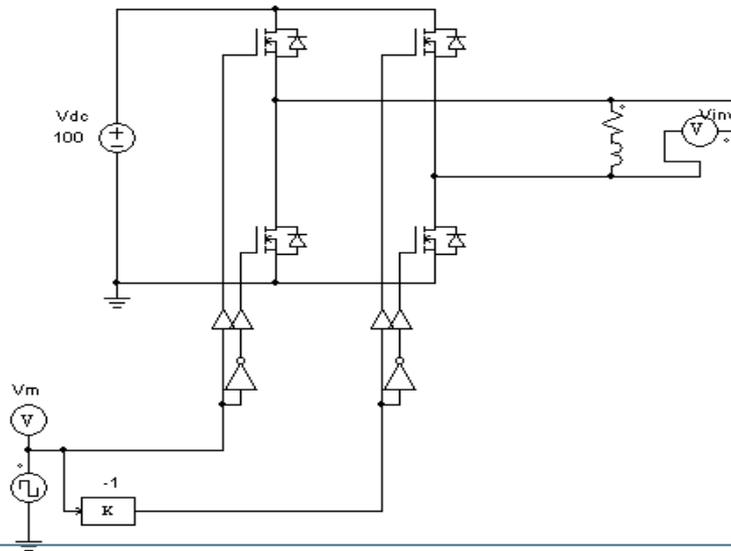
Inversor modelado con PSIM

Los modelos de simulación que van a ser utilizados para estudiar los convertidores electrónicos de potencia DC-AC o inversores, van a estar compuestos de los siguientes elementos:

- **El bloque de potencia** inversor. Compuesto por 4 ó 6 interruptores electrónicos
- **Los drivers** que van a enlazar el control y el bloque de potencia
- **El modulador** que va controlar el disparo de cada transistor del bloque de potencia
- **Los sensores** de corriente o tensión, para monitorizar el sistema
- **La instrumentación** que va permitir medir parámetros de calidad de la transformación (THD, FFT...)



Inversores monofásicos



Serie de Fourier

$$V_{inv} = \frac{4V_{dc}}{\pi} \left(\text{sen}\omega t + \frac{1}{3} \text{sen}3\omega t + \frac{1}{5} \text{sen}5\omega t + \frac{1}{7} \text{sen}7\omega t + \dots \right)$$

Un inversor monofásico está formado por cuatro transistores que llevan en paralelo un diodo que se denomina **diodo de recuperación inversa**.

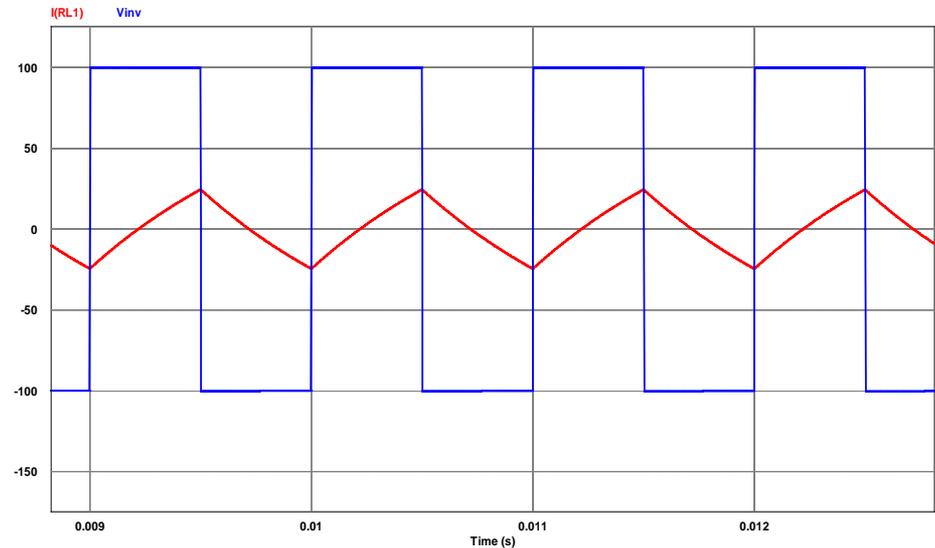
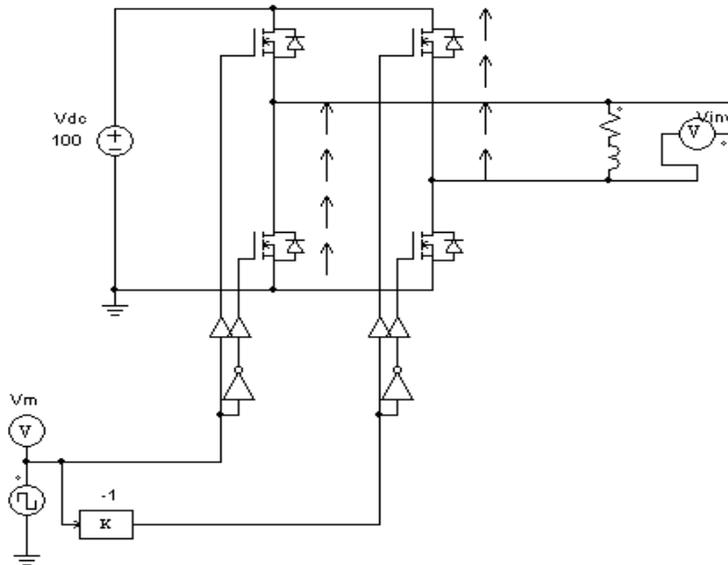
El trabajo conmutado de las parejas de interruptores de diferentes rama, con un desfase de 180° entre los pertenecientes a la misma rama, hace que en bornes de la carga la polaridad de la tensión continua se vaya alternando. **El efecto es la transformación de una tensión continua en una tensión alterna.**

Valor máximo y eficaz del primer armónico

$$V_{o,1} = \frac{4U_{dc}}{\pi}; \quad V_{1,rms} = \frac{4U_{dc}}{\sqrt{2}}$$



Inversores monofásicos



Al analizar la figura, se puede apreciar **la necesidad de los diodos de recuperación**, que siempre deberán existir en los inversores.

Debido al **efecto inductivo de la carga**, la corriente no puede invertirse en ella cuando se invierte la tensión, la corriente conmutará a los diodos que están en paralelo con los transistores de relevo. Cuando la energía de inductancia ha desaparecido dichos transistores pueden empezar a conducir.

Conviene recordar que los transistores electrónicos solo dejan pasar la corriente en un sentido y que la tensión en los bornes de la carga debe conmutar de positivo a negativo. **Sin los diodos** se producirían discontinuidades en las corrientes y fuertes sobretensiones inductivas en los transistores, lo que haría al sistema inviable.

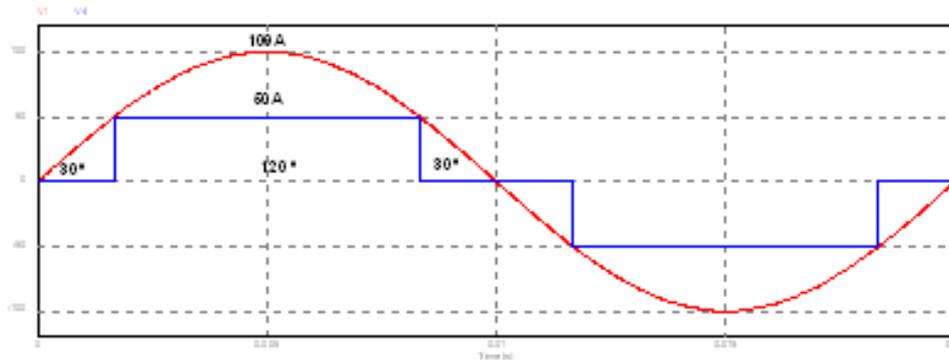


Inversores monofásicos

En los inversores por impulso único se puede controlar con facilidad la frecuencia de la tensión de salida, pero no se va a poder controlar el valor eficaz de la tensión de salida. Existen dos posibles soluciones:

- Controlar el valor medio del sistema de continua, con lo que se controla la altura de la onda cuadrada y de esa forma su valor eficaz.
- Controlar el ancho de pulso o trocear cada pulso en múltiples pulsos de diferente anchura.

El desarrollo en Series de Fourier será la herramienta matemática para analizar el proceso de transformación de la energía eléctrica con convertidores electrónicos de potencia.



$$I(t) = 100 \cdot \text{sen} \omega t$$

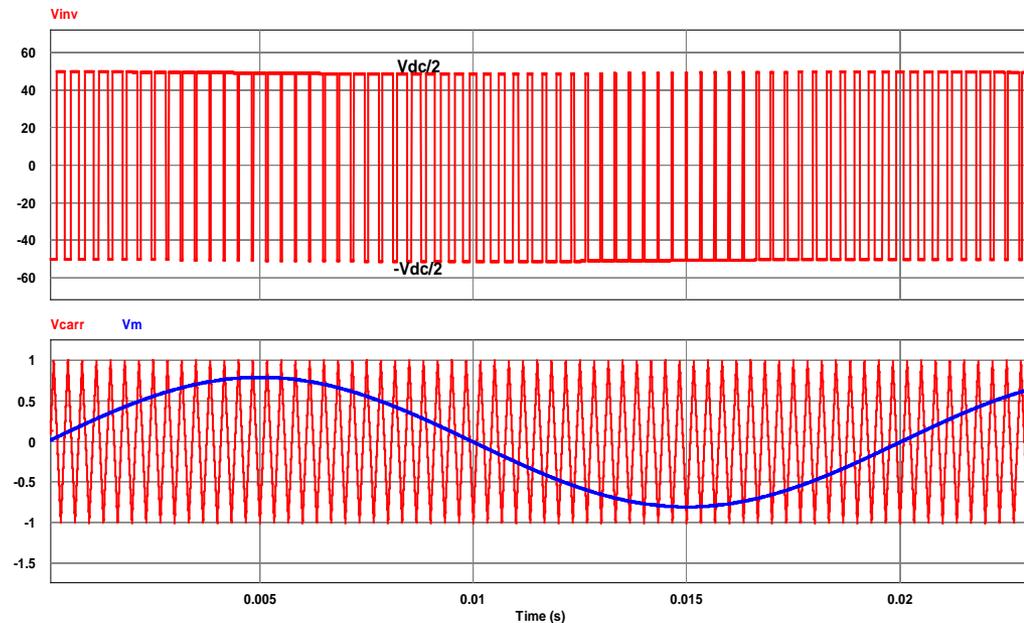
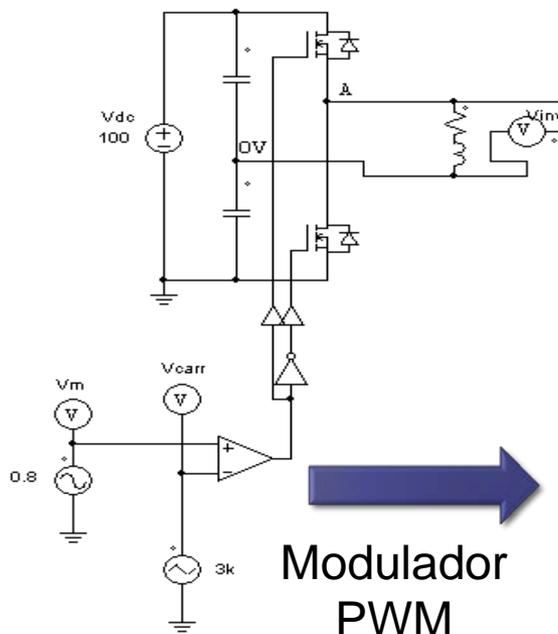
$$I(t) = \frac{2 \cdot \sqrt{3}}{\pi} 50 \left[\text{sen} \omega t - \frac{1}{5} \text{sen} 5 \omega t - \frac{1}{7} \text{sen} 7 \omega t + \frac{1}{11} \text{sen} 11 \omega t \dots \right]$$

Desarrollo en series de Fourier de una onda senoidal y cuadrangular

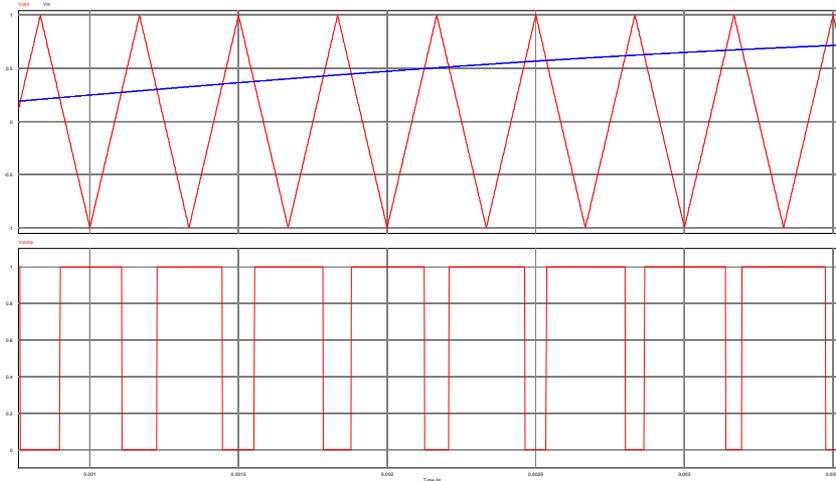
Inversores monofásicos

Debido al alto contenido armónico de la modulación por impulso único. El método de modulación más utilizado en la práctica es **la modulación por ancho de impulso PWM (Pulse Width Modulation)**.

La modulación PWM se basa en **la comparación de una onda moduladora de baja frecuencia** (la información que se desea modular) **y de una onda portadora de alta frecuencia** (generalmente una onda triangular). La comparación de esas dos señales da una lógica de conmutación para el inversor que permite la transformación de una señal continua en una señal alterna, **en la que se puede controlar el valor eficaz y la frecuencia.**



Inversores monofásicos



La figura deja apreciar la proporción de la modulación PWM en relación al valor de la amplitud de señal de control y el valor de pico de la señal triangular. Que una vez multiplicado por el valor de la amplitud de la señal continua de entrada, da la amplitud del primer armónico de la señal alterna de salida:

$$(V_{A0})_1 = \frac{V_{o,control}}{\hat{V}_{o,tringular}} \frac{V_{entrada}}{2} = m_a \text{sen} \omega t \frac{V_{entrada}}{2}$$

El parámetro con el que se controlará el valor eficaz de la tensión de salida será el índice de modulación m_a :

$$m_a = \frac{\hat{V}_{o,control}}{\hat{V}_{o,tringular}}$$

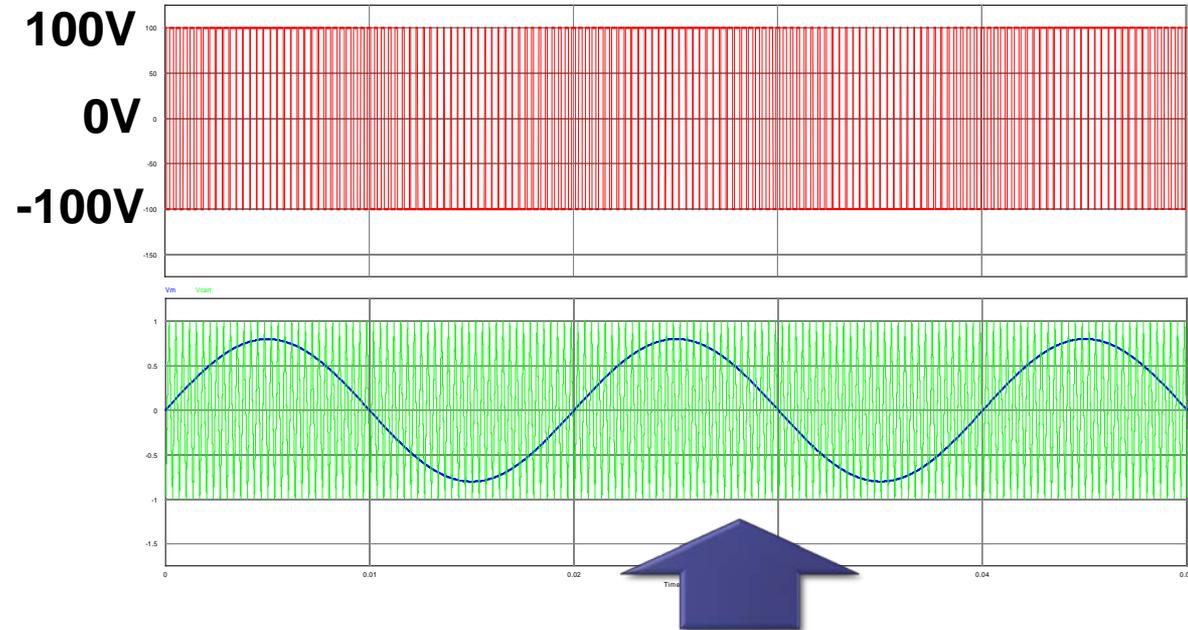
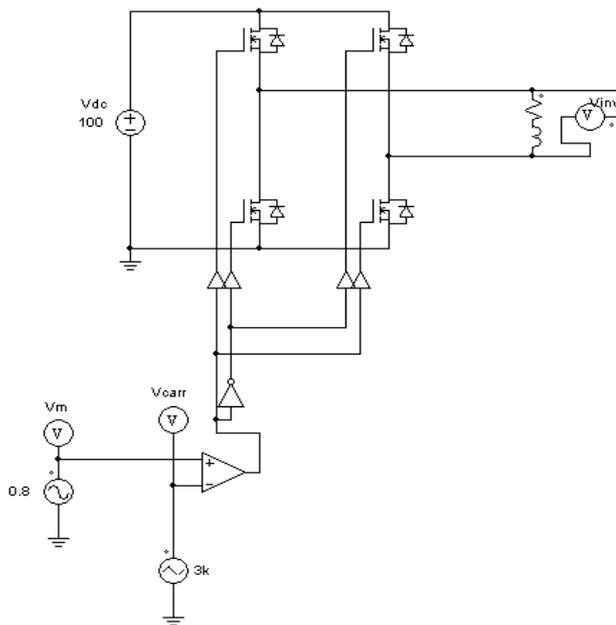
En la modulación PWM es conveniente la utilización de frecuencias elevadas para la portadora, mejorando así los índices de distorsión armónica; el límite está fijado por la frecuencia de conmutación y las pérdidas en los transistores del convertidor.

Existen dos estrategias básicas de modulaciones monofásicas PWM:

- Bipolar
- Unipolar



Inversores monofásicos PWM bipolares



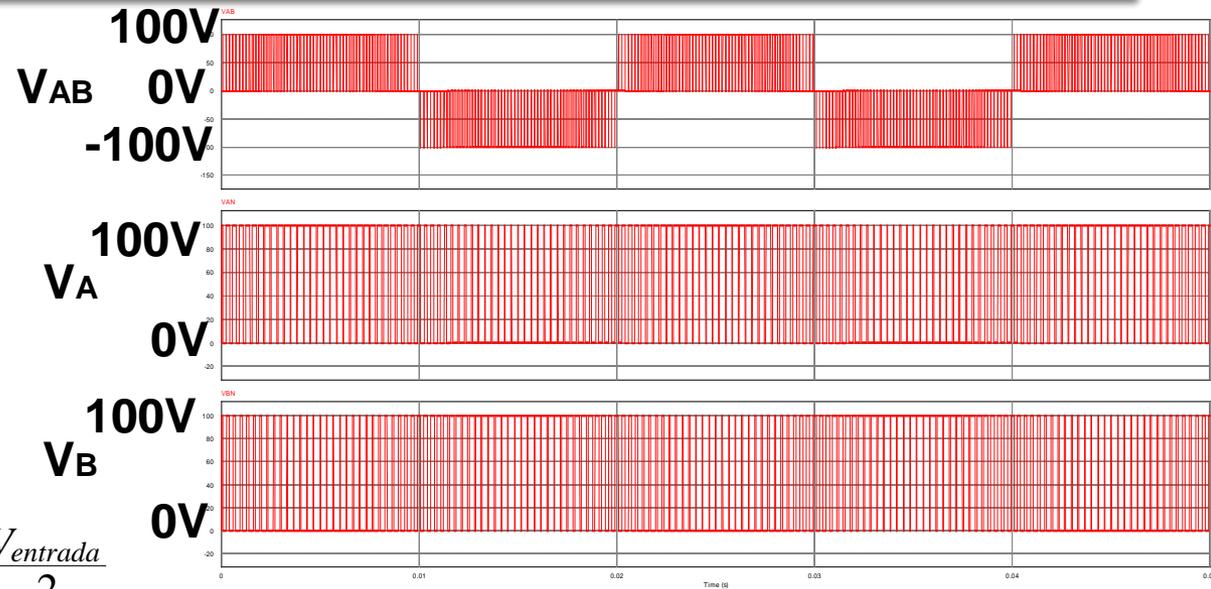
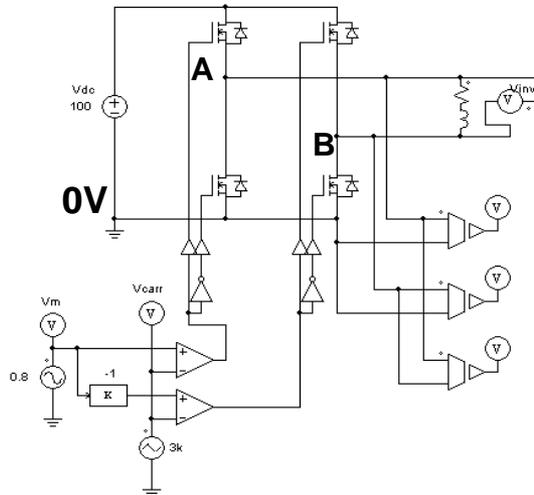
$$(V_{AO})_I = \frac{V_{o,control}}{V_{o,tringular}} V_{entrada} = m_a \sin \omega t V_{entrada}$$

Una sola señal moduladora senoidal para el control de los cuatro transistores.

El control bipolar conmuta los transistores por parejas, de tal forma, que la carga soporta en bornes, la tensión continua con polaridades inversas. La amplitud de armónico fundamental está relacionado con el índice de modulación y la tensión continua de entrada al inversor. La componente armónica está relacionada con la frecuencia de la señal portadora utilizada.



Inversores monofásicos PWM unipolar



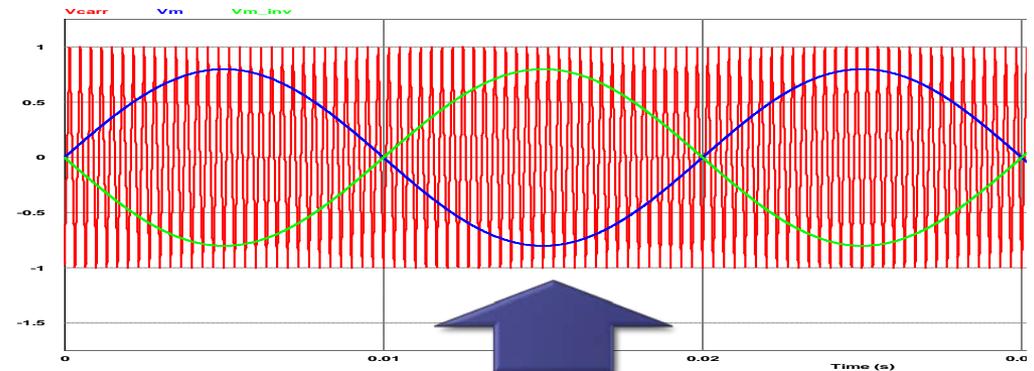
$$(V_{A0})_1 = \frac{v_{o,control}}{\hat{V}_{o,triangular}} \frac{V_{entrada}}{2} = m_a \text{sen}(\omega t) \frac{V_{entrada}}{2}$$

$$(V_{B0})_1 = \frac{v_{o,control}}{\hat{V}_{o,triangular}} \frac{V_{entrada}}{2} = m_a \text{sen}(\omega t - \pi) \frac{V_{entrada}}{2}$$



$$(V_{AB})_1 = (V_{A0})_1 - (V_{B0})_1 = m_a \text{sen} \omega t V_{entrada}$$

Cada rama del inversor es controlada por una de estas señales de modulación, de tal forma que cada borne de la carga va siendo conectado al borne positivo o $0V$, de forma alternada. La carga soporta la diferencia de tensión entre sus bornes **A** y **B**.



El control unipolar utiliza dos señales de modulación desfasadas 180° .



Conclusiones inversores monofásicos

Como conclusiones sobre los inversores bipolares y unipolares PWM, relacionándolas con los objetivos planteados al principio del tema, se puede concluir:

- 1. En relación al valor eficaz,** se puede ver que se obtiene el mismo valor eficaz del primer armónico a partir de la misma tensión continua de entrada.
- 2. La componente armónica** será menor en los inversores unipolares. Por lo que salvo por motivos de control o configuración de hardware, será más aconsejable.



Inversores trifásicos

Los inversores trifásicos son en la actualidad uno de los convertidores más utilizados en la industria. Este uso masivo está relacionado con su utilización en los sistemas de propulsión eléctrica y en los nuevos sistemas de generación de energías renovables.

En relación con los convertidores trifásicos habrá dos conceptos importantes para su optimización:

- 1. La estrategia de modulación para obtener un mejor aprovechamiento de la tensión continua de entrada, con una componente armónica mínima en la salida**
- 2. La arquitectura de aislamiento galvánico que se utilizará en los drivers para enlazar el control y los interruptores electrónicos que forman parte del inversor.**



Sistemas de modulación

Entre los métodos de modulación se pueden destacar:

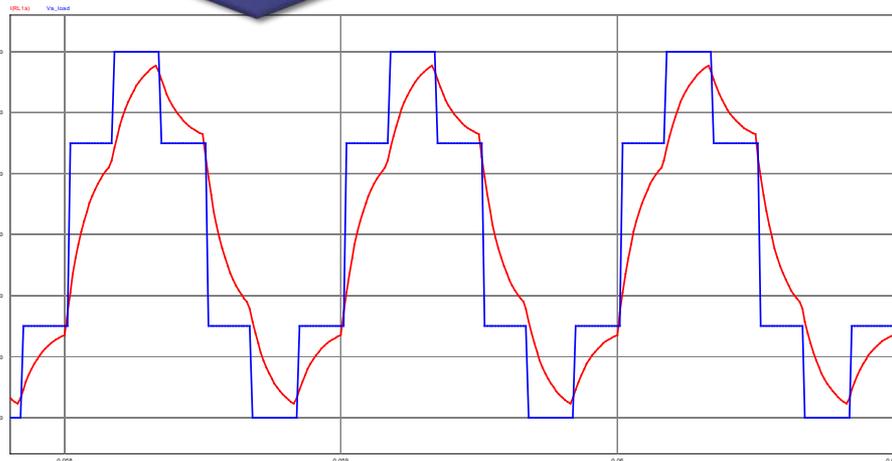
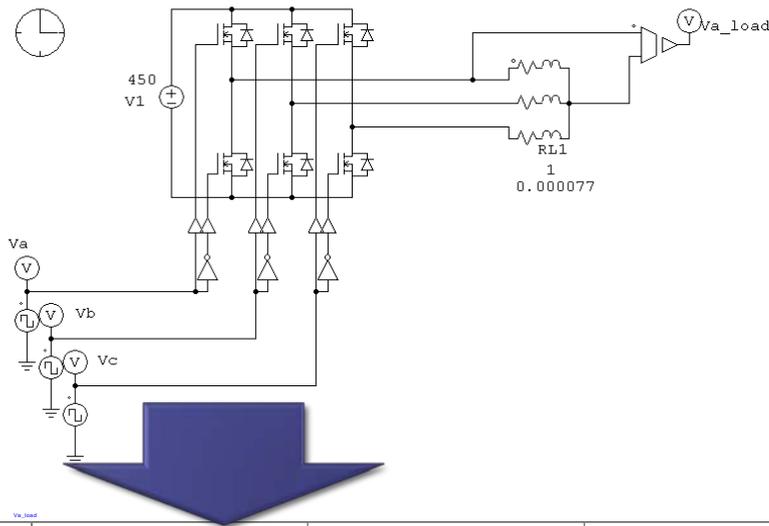
- ❑ **Modulación por ancho de impulso único o Six-step.**
- ❑ **Modulación con eliminación selectiva de armónicos SHE.**
- ❑ **Modulación por ancho de impulso PWM sinusoidal.**
- ❑ **Modulación por ancho de impulso espacio vectorial SVPWM.**
- ❑ **Modulación espacio vectorial discontinua.**
- ❑ **Otras modulaciones (banda de histéresis, trapezoidales, etc...).**

Nota: algunas de estas modulaciones, como por ejemplo, la modulación para la eliminación selectiva de armónicos, se aplicó en situaciones muy especiales de potencia hace años, debido a lo especial de su filosofía es muy interesante desde el punto de vista académico. Otras como las de banda de histéresis se utilizan en algunas aplicaciones especiales, pero hay que tener cuidado con sus efectos a nivel armónico, ya serán generados a frecuencias desconocidas lo que dificultará su eliminación.



Modulación por impulso único (Six-Step)

Voltage Source Inverter with "six-step" modulation



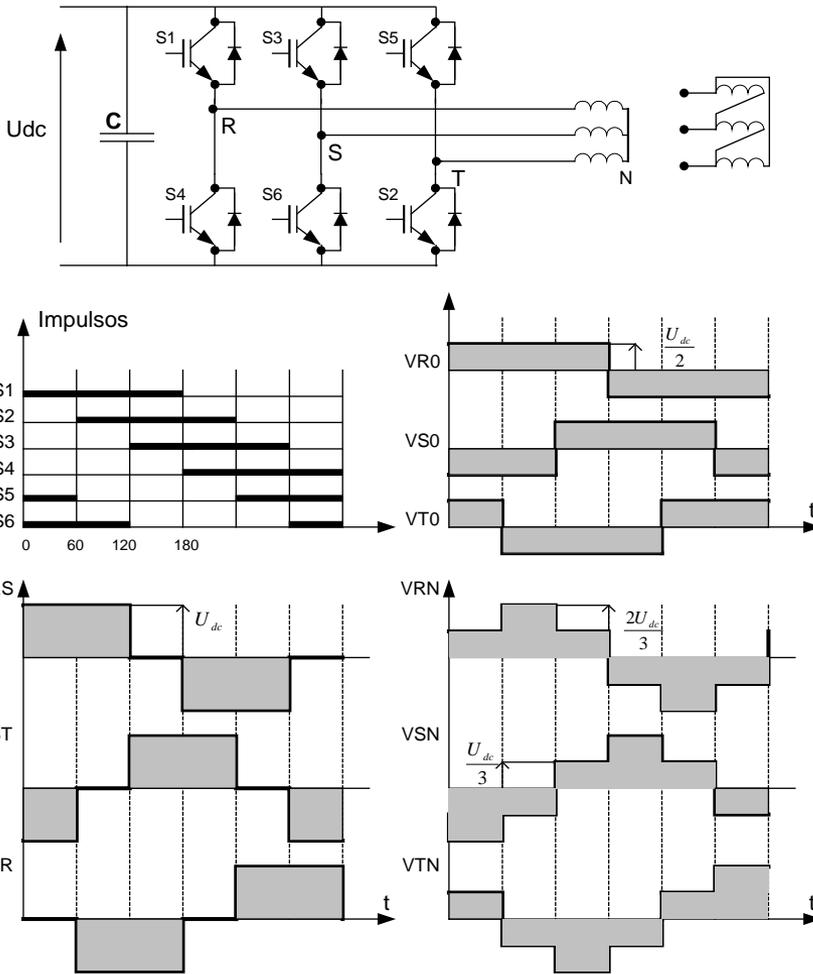
Tensión y corriente en la carga en el modelo de conducción a 180°

En el modelo de conducción por impulso único "Six-step", los desfases entre transistores y ramas seguirá el patrón común (120° entre ramas y 180° entre transistores de la misma rama). Siendo la duración en la conducción de todos y cada uno de los transistores de 180° o de 120° (darán lugar a formas de onda diferentes).

Una característica muy importante de este tipo de modulación es que modulaciones como la **PWM** y **SVPWM** pueden llegar funcionamiento en sobremodulación, cuando se quiere aprovechar la tensión continua de entrada por encima de la zona de control lineal del modulador, y entonces su comportamiento se aproxima al de moduladores por impulso único.



Modulación por impulso único (Six-Step)



Modelo de conducción a \$180^\circ\$

Se puede observar como en las tensiones trifásicas generadas ya no existe el tercer armónico ni todos sus múltiplos. También, como el quinto y el séptimo pulsos en contrafase en la tensión simple y en la compuesta. Esta última característica favorece su posible eliminación por simetría en determinadas aplicaciones.

$$V_R = \frac{4U_{dc}}{\pi^2} \left(\text{sen}\omega t + \frac{1}{3}\text{sen}3\omega t + \frac{1}{5}\text{sen}5\omega t + \frac{1}{7}\text{sen}7\omega t + \dots \right)$$

$$V_{RS} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} U_{dc} \left(\text{sen}\omega t - \frac{1}{5}\text{sen}5\omega t - \frac{1}{7}\text{sen}7\omega t + \frac{1}{11}\text{sen}11\omega t \dots \right)$$

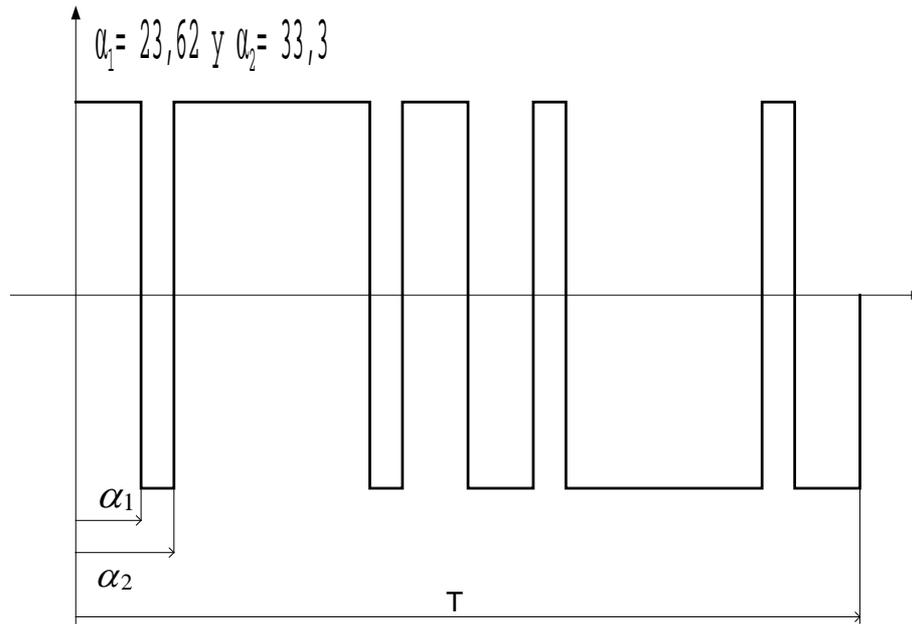
$$V_{RN} = \frac{2}{\pi} U_{dc} \left(\text{sen}\omega t + \frac{1}{5}\text{sen}5\omega t + \frac{1}{7}\text{sen}7\omega t + \frac{1}{11}\text{sen}11\omega t \dots \right)$$

Desarrollo en Series de Fourier de cada una de estas tensiones



Modulación con supresión selectiva de armónicos (SHE)

La eliminación selectiva de armónicos, se basa en una matriz de cálculo numérico en la se puede eliminar un armónico por cada conmutación, que se calcula de forma única. Estas conmutaciones se calculan de 0 a 90°, luego por simetría se construye todo el periodo completo de la señal modulada de salida.



Matriz de conmutación

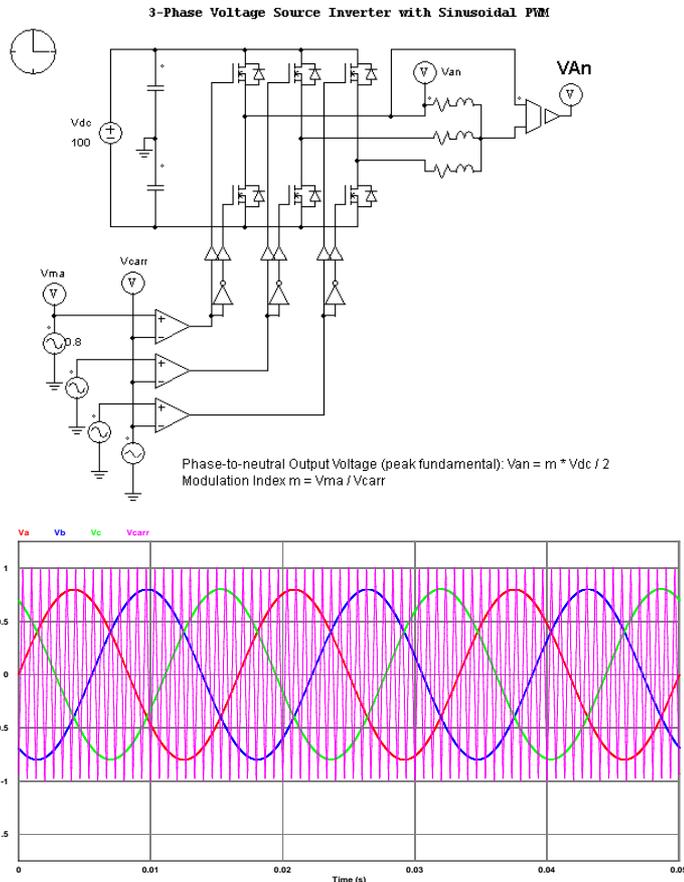
$$a_n = 0$$

$$b_n = 4 \frac{U_{dc}}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^k (-1)^k \cos n \alpha_k \right]$$

Señal para la eliminación de dos armónicos, en este caso el armónico 3 y 5, conmutando en 23.62° y en 33.3°.



Modulación PWM



La modulación PWM ya fue analizada en los inversores monofásicos, y como en aquellos, la estrategia de control y los objetivos no han cambiado. La diferencia fundamental es que se van a necesitar tres moduladores independientes de ondas desfasadas 120° y que van a ser comparadas con una misma onda portadora triangular.

Esto hace que los interruptores superiores conmuten con un desfase de 120° y los inferiores con un desfase de 180° respecto del superior de su rama.

El desarrollo en Series de Fourier de la tensión de una fase:

$$V_{An} = \frac{1}{2} m_a U_{dc} \sin(\omega t) + \sum (M\omega_c \pm N\omega)$$

U_{dc} : tensión continua de entrada

m_a : índice de modulación

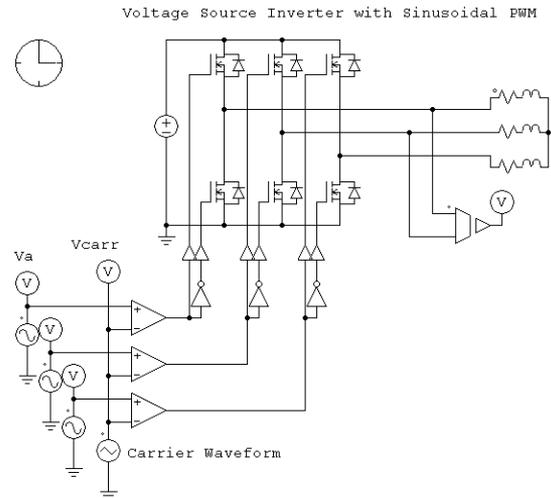
Distorsión armónica

$$m_a = \frac{\hat{V}_{o,control}}{\hat{V}_{o,triangular}}$$

Índice de modulación:
valor de pico de la señal referencia senoidal y de la señal portadora triangular.



Modulación PWM



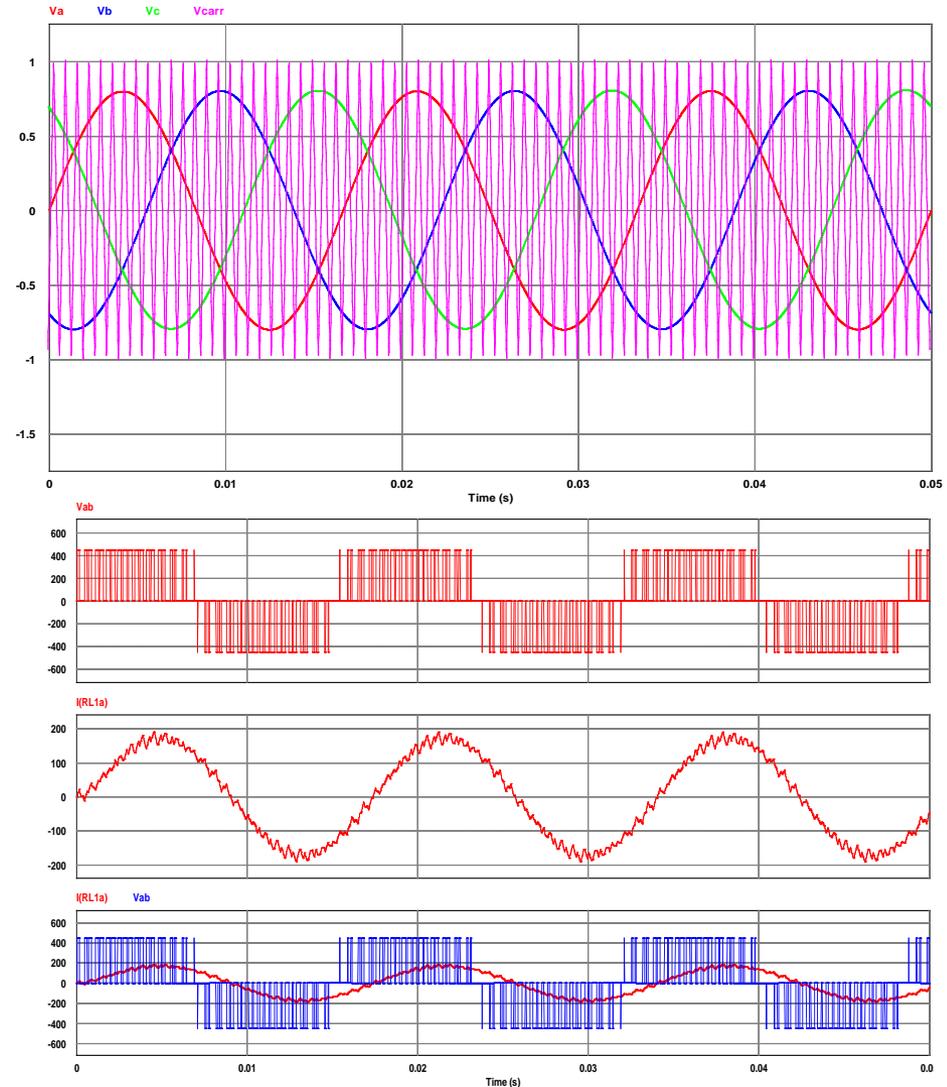
Modulación lineal:

$$(V_{AB})_1 = \sqrt{3} m_a \frac{V_{entrada}}{2} \text{sen} \omega_1 t = 0.866 m_a V_{entrada} \text{sen} \omega_1 t$$

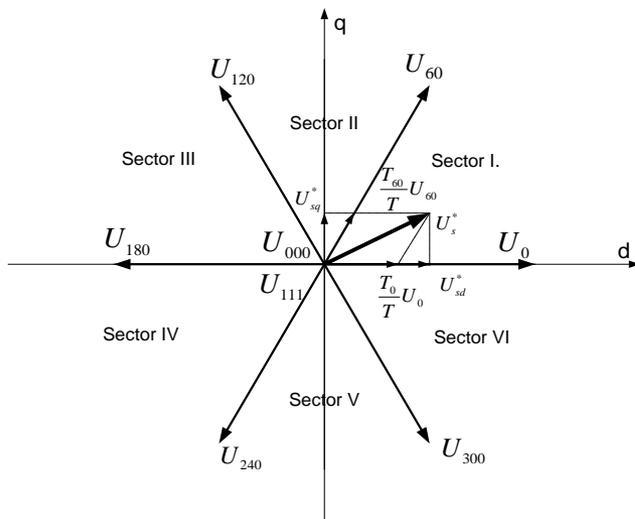
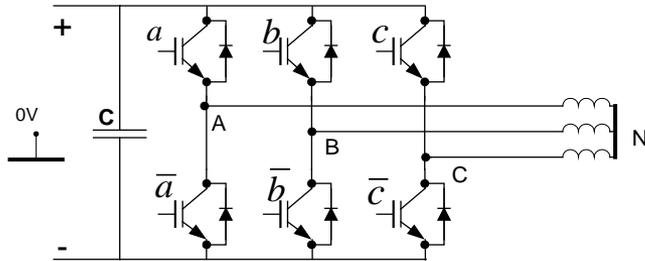
Sobremodulación:

$$(V_{AB})_1 = \sqrt{3} \frac{4}{\pi} \frac{V_{entrada}}{2} \text{sen} \omega_1 t = 1.1 V_{entrada} \text{sen} \omega_1 t$$

Forma de onda de la tensión compuesta entre fases, la corriente de fase y la combinación de ambas.



Modulación PWM espacio vectorial (SVPWM)



El vector de salida se compone en base a los seis vectores de conmutación ($U_0, U_{60}..$) y el tiempo que van a estar conmutando cada uno de ellos en función del ángulo, la magnitud y el sector en que se ubique.

Esta modulación está asociada a las estrategias de control FOC (Field Oriented Control) de las máquinas de corriente alterna asíncronas y síncronas. Se basa en las teorías de Clarke y Park sobre la transformación de sistemas trifásicos en sistemas ortogonales de referencia estacionarios y rotativos (Nota de aplicación: AN1930 de Freescale).

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = U_{DCBus} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{U_{DCBus}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}$$



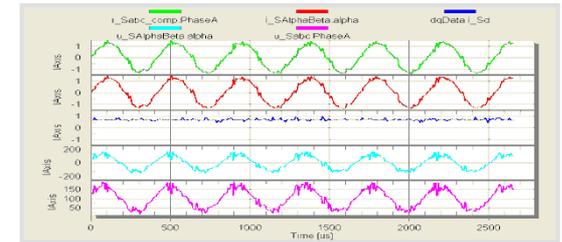
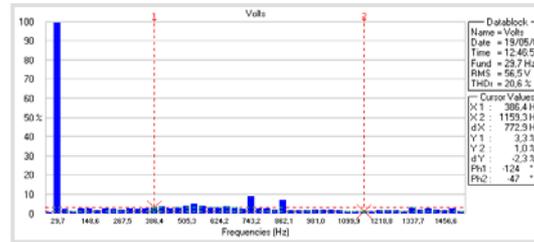
Resumen de estrategias de modulación

- En las siguientes transparencias se pueden apreciar diferentes formas de onda generadas en un accionamiento trifásico para motores de corriente alterna.
- Se trata de ver como las diferentes ondas generadas hacen girar a la máquina con unas características de control similares, pero con unas características de eficiencia energética diferente.
- Se debe tener en cuenta que los armónicos no solamente son conducidos por las líneas, sino radiados al entorno.
- Los armónicos van a afectar a la calidad del giro de la máquina, pero también a su calentamiento, ya que van a quedar confinados en las partes metálicas de la misma.
- Todo ello hace que el estudio de la distorsión tenga diferentes facetas de eficiencia y sea susceptible de un gran desarrollo en investigación.

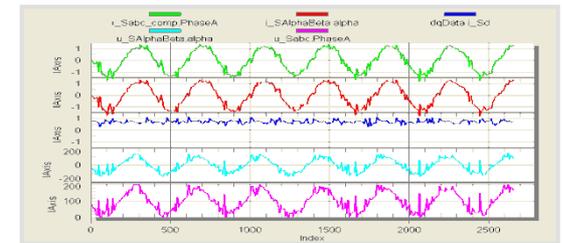
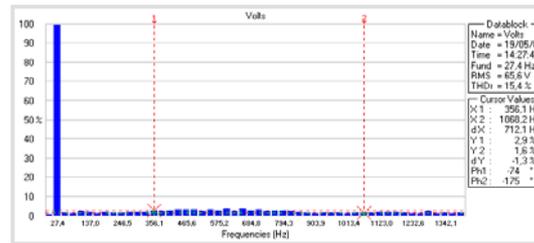
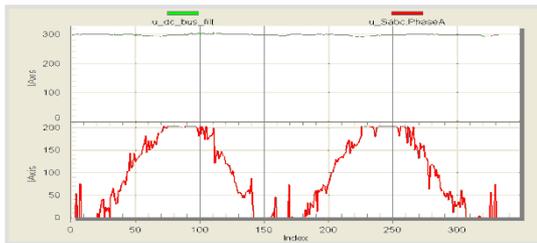


Sistemas de modulación

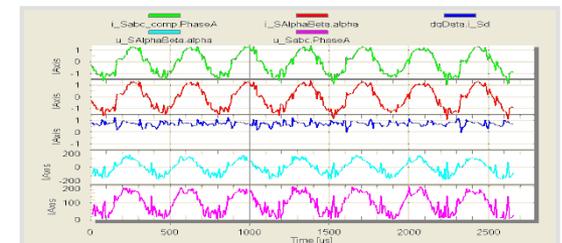
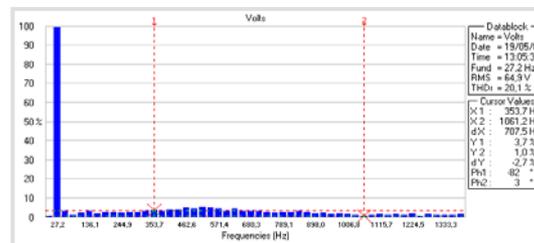
ANÁLISIS COMPARATIVO Y ESTUDIO DE RENDIMIENTO EN LA CONMUTACIÓN



Modulación SPWM



Modulación THIPWM



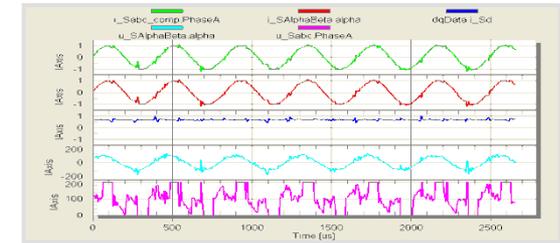
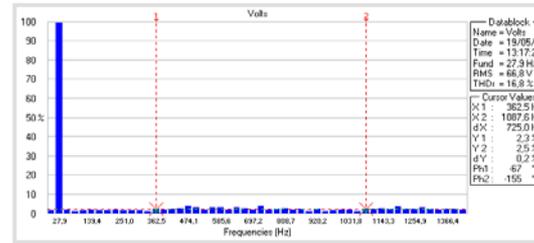
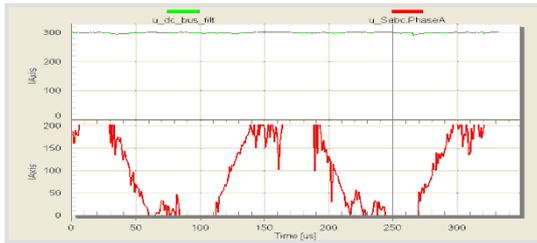
Modulación SVPWM

Modulaciones continuas

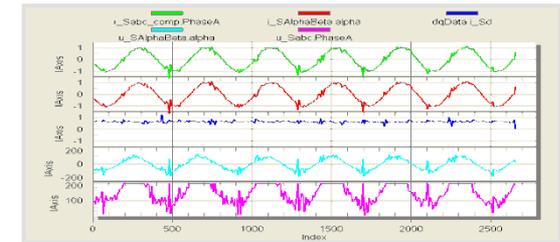
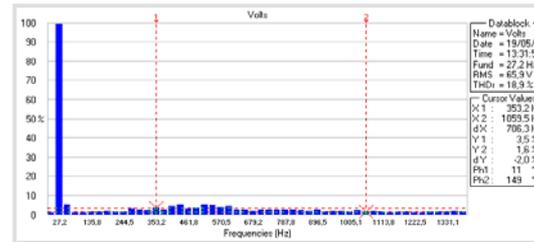
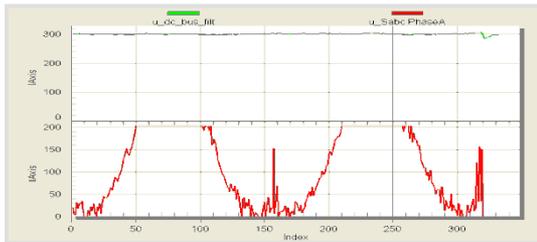


Sistemas de modulación

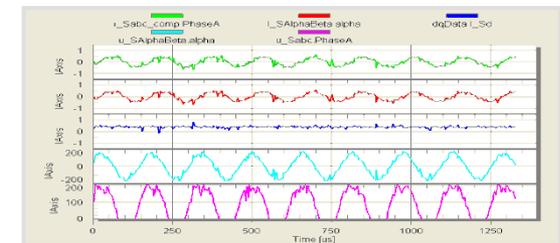
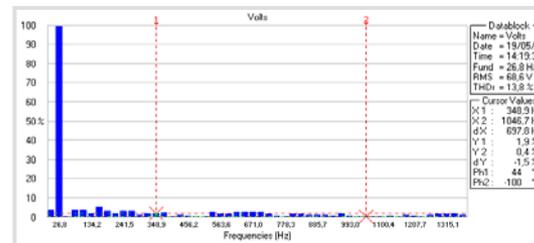
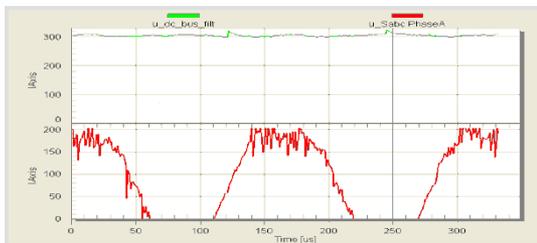
ANÁLISIS COMPARATIVO Y ESTUDIO DE RENDIMIENTO EN LA CONMUTACIÓN



Modulación DPWM2



Modulación DPWMMAX



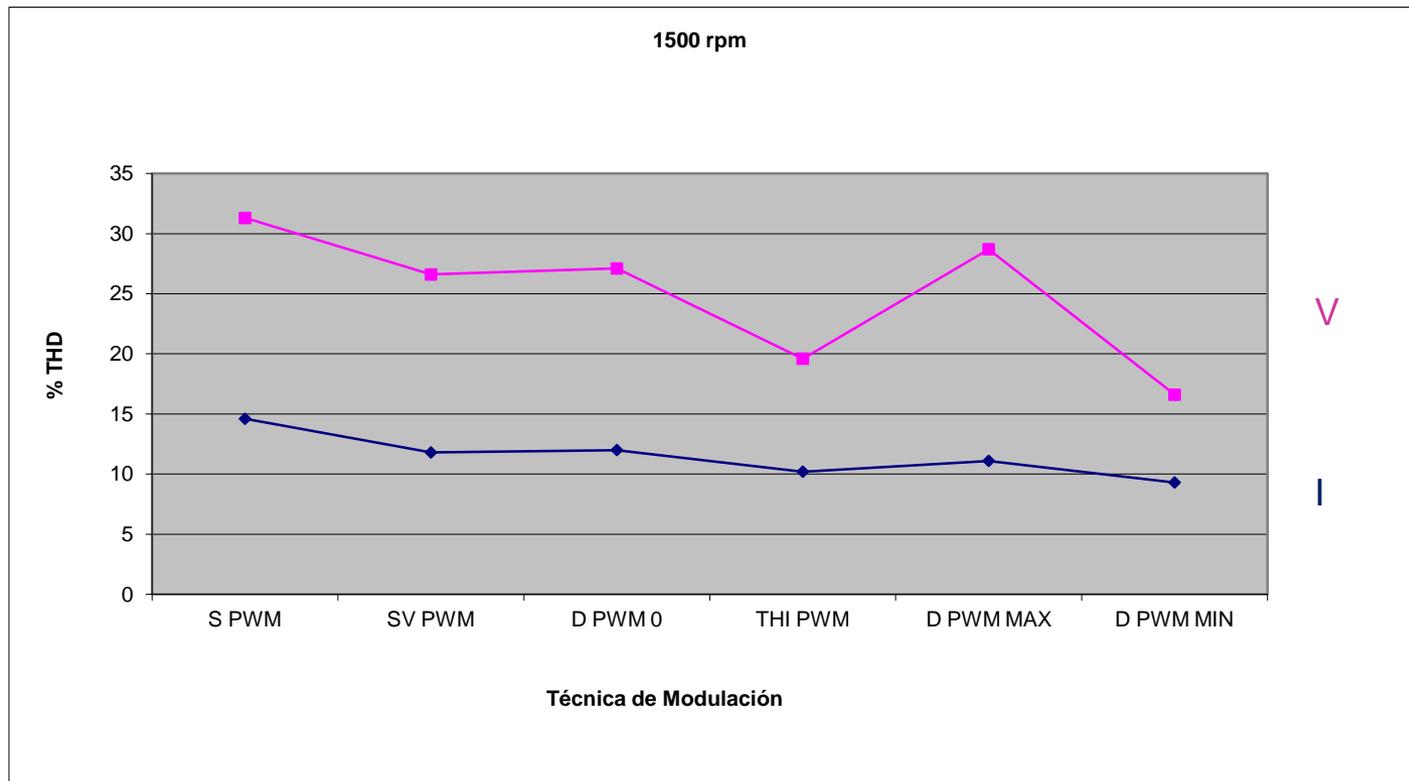
Modulación DPWMMIN

Modulaciones discontinuas



Sistemas de modulación

ANÁLISIS COMPARATIVO Y ESTUDIO DE RENDIMIENTO EN LA CONMUTACIÓN

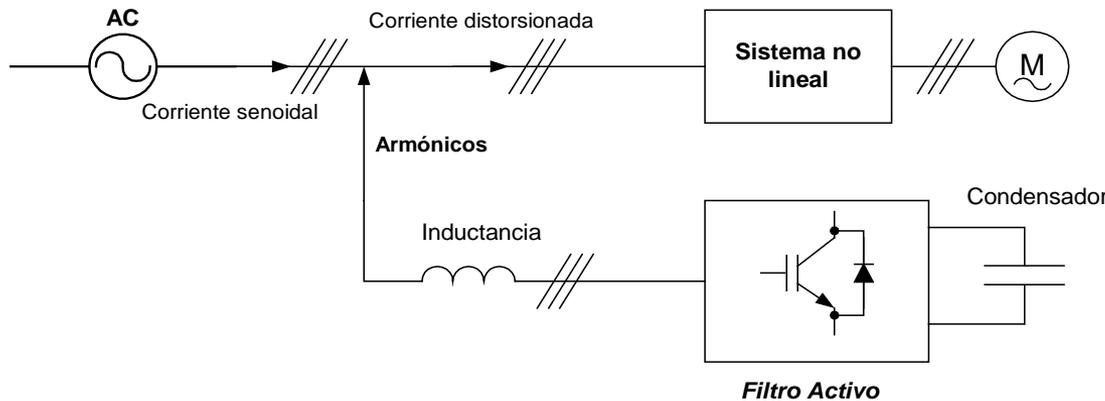


Índice de distorsión armónica total en corrientes y tensiones en bornes del motor usando diferentes tipos de modulación.

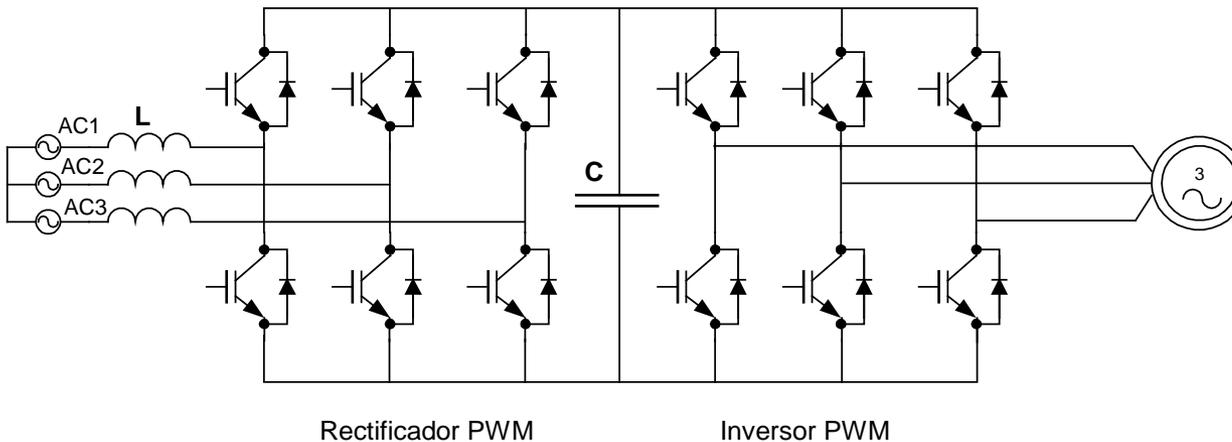


Usos avanzados de los convertidores DC-AC

El uso de los convertidores DC-AC en aplicaciones avanzadas como filtros activos, rectificadores PWM, entre otras muchas, sigue en esencia las mismas pautas de lo que se estudiará en este curso, y será el control de los mismos lo que definirá su uso.



Filtro activo para mejorar el factor de potencia y compensación de la distorsión armónica en la red



Accionamiento para el control de un motor de corriente alterna con un elevado factor de potencia



Conclusiones

- Los convertidores DC-AC o Inversores van a ser los encargados de la transformación de energía continua en energía alterna con características eléctricas regulables.
- Mediante la estrategia de modulación utilizada se obtendrán unas características de control y eficiencia energética diferente, por lo que habrá que adaptar dicha estrategia al uso del inversor en determinadas aplicaciones industriales.
- Las nuevas fuentes de energía renovables y los nuevos sistemas de propulsión eléctrica en todo tipo de vehículos, van a promover un crecimiento en el interés de desarrollo e investigación en este convertidor electrónico de potencia.
- La eficiencia energética y la distorsión armónica debe ser un factor de calidad de la energía transformada mediante inversores.

