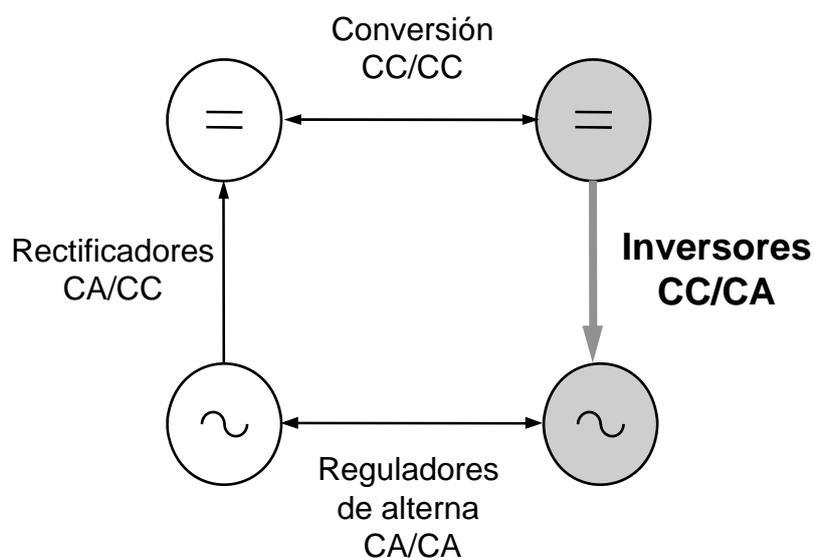




Conversión CC/CA. Inversores

Tema 6

SITUACIÓN DENTRO DE LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA



OBJETIVO

Generar tensión alterna a partir de tensión continua. Además interesa poder variar la tensión eficaz y la frecuencia de la tensión alterna generada

CONCEPTOS BÁSICOS.

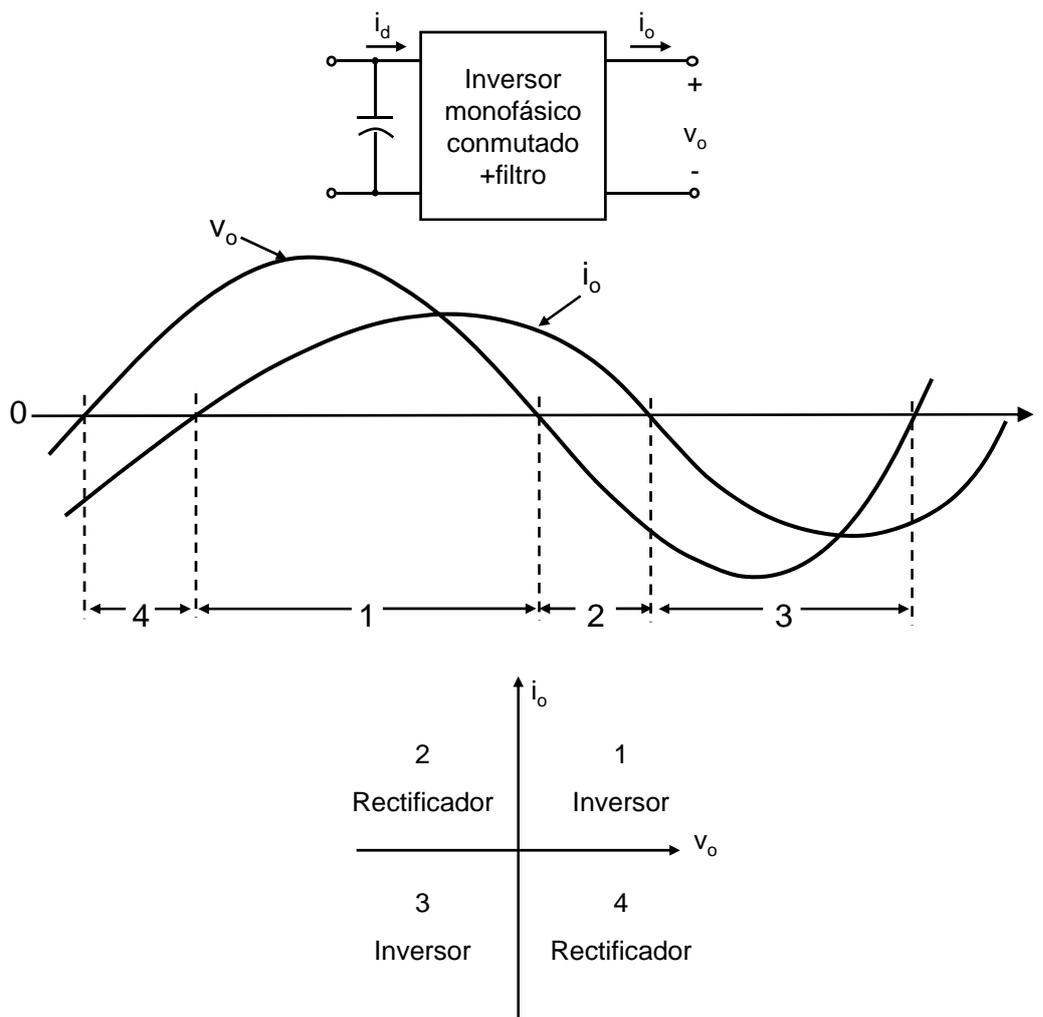
Cuadrantes de funcionamiento.

Para que un convertidor de energía funcione como **inversor**, debe transferir potencia desde un BUS de C.C. hasta una carga de C.A.

El sentido de la tensión y corriente en la carga, nos habla del flujo de potencia.

- **Cuadrante 1:** Tensión $V_o > 0$, corriente $i_o > 0 \Rightarrow$ potencia absorbida $p_o > 0$.
- **Cuadrante 2:** Tensión $V_o < 0$, corriente $i_o > 0 \Rightarrow$ potencia absorbida $p_o < 0$.
- **Cuadrante 3:** Tensión $V_o < 0$, corriente $i_o < 0 \Rightarrow$ potencia absorbida $p_o > 0$.
- **Cuadrante 4:** Tensión $V_o > 0$, corriente $i_o < 0 \Rightarrow$ potencia absorbida $p_o < 0$.

$$\text{Potencia instantánea} = p_o = v_o \cdot i_o$$

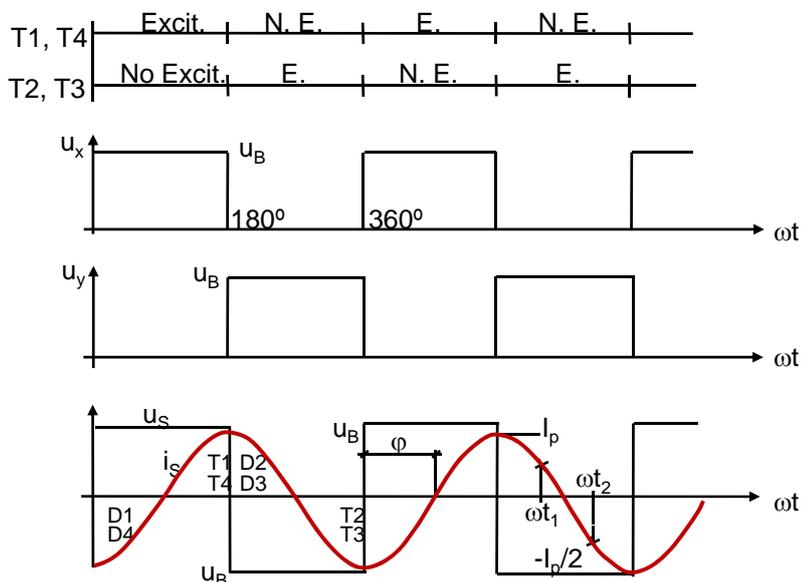
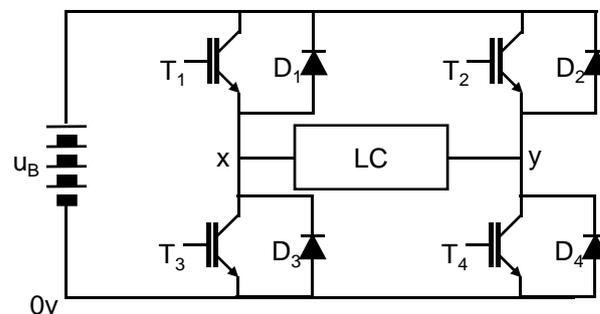


Ejemplo de operación de un inversor en puente completo monofásico:

Suponemos que la corriente que circula por la carga es senoidal pura y definimos:

- φ como el ángulo de retraso de la corriente de carga respecto al primer armónico de la tensión aplicada a la carga.
- i_{TM} como la intensidad media por los tiristores (áreas rayadas en diagonal y marcadas como T_1, T_4 o T_2, T_3).
- i_{DM} será la intensidad media por los diodos, cuyo sentido siempre es entrante en la batería (áreas rayadas en horizontal y marcadas como D_1, D_4 , o D_2, D_3).
- i_{BM} intensidad media que circula por la batería, se define positiva si sale de la batería.

Inversor monofásico en puente con carga reactiva pura $\varphi=90^\circ$.



Podemos encontrar los siguientes casos:

- $\varphi < 90^\circ$: $i_{TM} > i_{DM} \Rightarrow i_{BM} > 0$ la batería cede potencia a a carga de forma que el convertidor se comporta como inversor.
- $\varphi > 90^\circ$: $i_{TM} < i_{DM} \Rightarrow i_{BM} < 0$ en la carga estaría conectado un generador de C.A. Y es éste quien cede energía a la batería. En este caso el convertidor se comporta como rectificador.
- $\varphi = 90^\circ$: $i_{TM} = i_{DM} \Rightarrow i_{BM} = 0$ la batería no cede potencia a la carga, ya que esta es reactiva pura.

CLASIFICACIÓN

Varios son los puntos de vista respecto a los que podemos realizar la clasificación de los inversores:

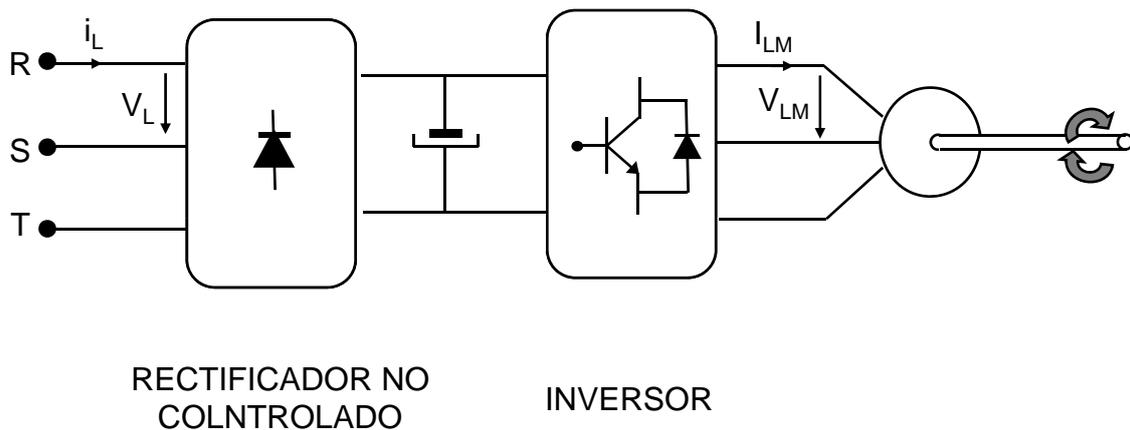
- Topología del circuito de potencia.
- Funcionamiento como fuente de tensión o de intensidad.
- Método de síntesis de la onda de salida, o control de la tensión de salida.



APLICACIONES:

Ejemplo: Control de velocidad de motores de corriente alterna (asíncronos y síncronos).

Variador de velocidad



Variando el valor eficaz y la frecuencia de la tensión aplicada al estator de un motor de inducción logramos variar su velocidad para diferentes pares. Hoy en día esta es una aplicación con un gran volumen de negocio, ya que el motor de inducción es muy sencillo, robusto, de mantenimiento casi nulo y actualmente el conjunto motor de inducción – variador de velocidad es muy competitivo en cuanto a su precio.

Algunas aplicaciones típicas de reguladores electrónicos de velocidad son:

- Tracción ferroviaria.
- Máquinas Herramientas.
- Sistemas de bombeo y ventilación.
- Cintas Transportadoras.
- Laminadoras y bobinadoras...



MONOFÁSICAS

Medio Puente (Half Bridge)

Puente Completo (Full Bridge)

Push-Pull

TRIFÁSICAS

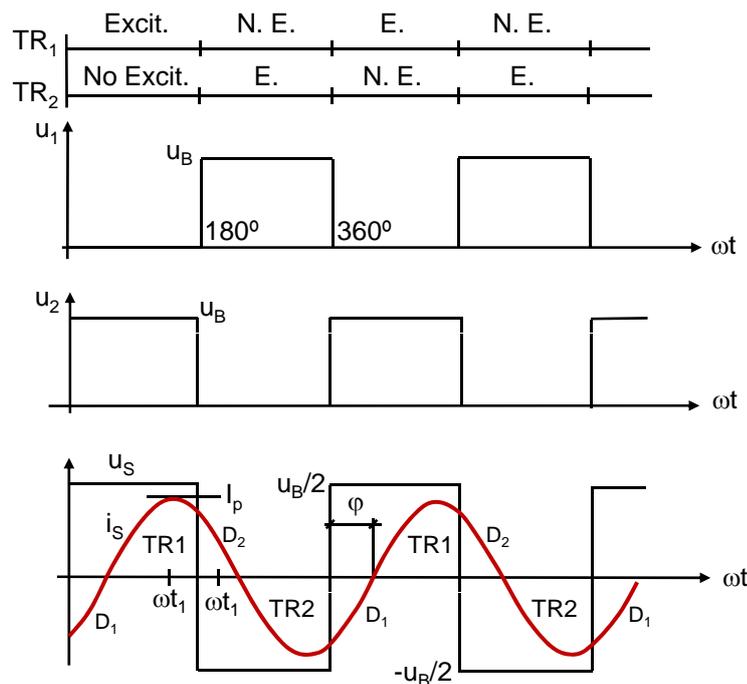
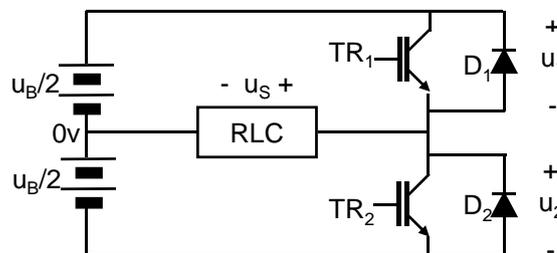
Puente Trifásico

MONOFÁSICAS

Medio Puente (Half Bridge)

CARACTERÍSTICAS:

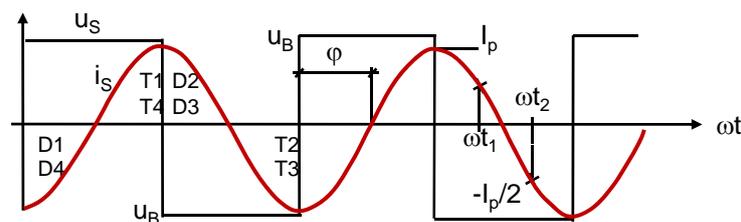
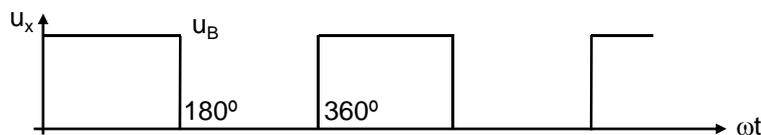
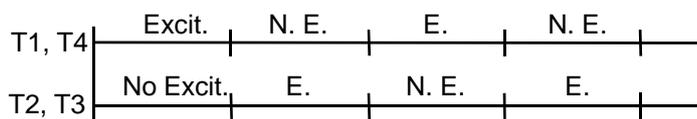
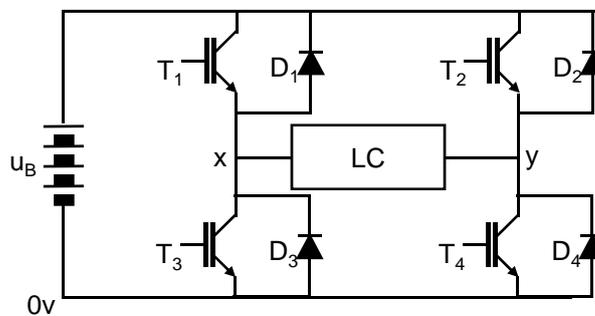
- Tensión máxima que deben soportar los interruptores de potencia: U_B , más las sobretensiones que originen los circuitos prácticos.
- Tensión máxima en la carga $U_B/2$, por tanto para igual potencia corrientes más elevadas que en el puente completo.
- Topología adecuada para tensión en la batería alta y potencia en la carga media.



Puente Completo (Full Bridge)

CARACTERÍSTICAS:

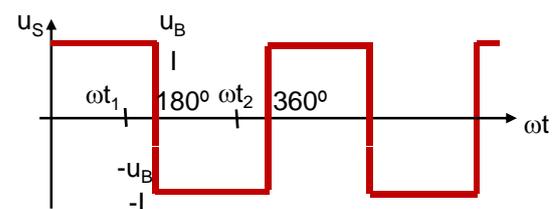
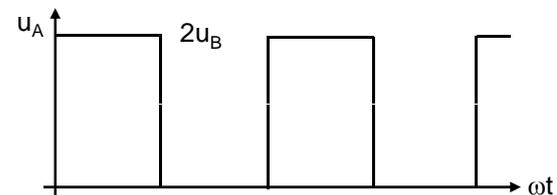
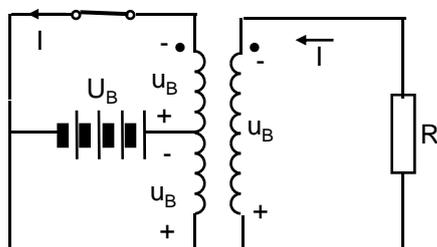
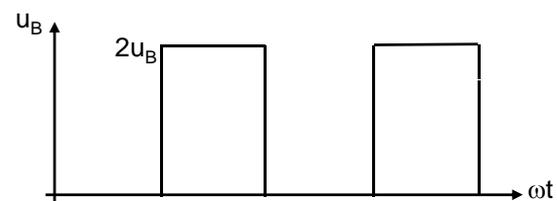
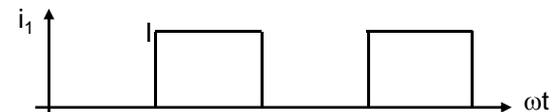
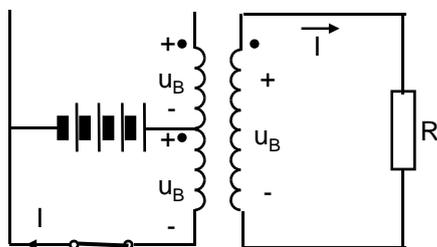
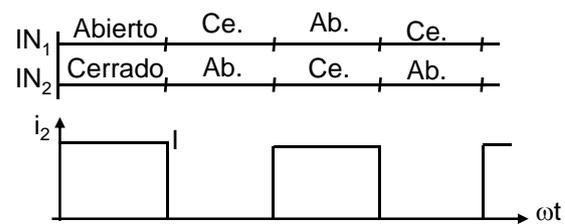
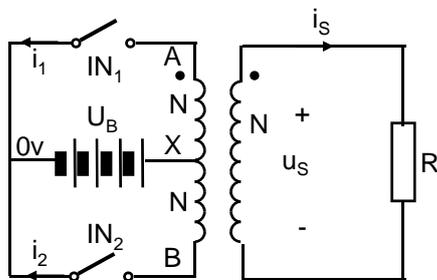
- Tensión máxima que deben soportar los interruptores de potencia: U_B , más las sobretensiones que originen los circuitos prácticos.
- Tensión máxima en la carga U_B , por tanto para igual potencia corrientes más bajas que en el medio puente.
- Topología adecuada para tensión en la batería alta y potencia en la carga alta.
- Doble nº de interruptores de potencia que en el medio puente y que en el *Push-Pull* y de gobierno más complejo por no tener un terminal referido a masa, (T1 y T3).



Push-Pull

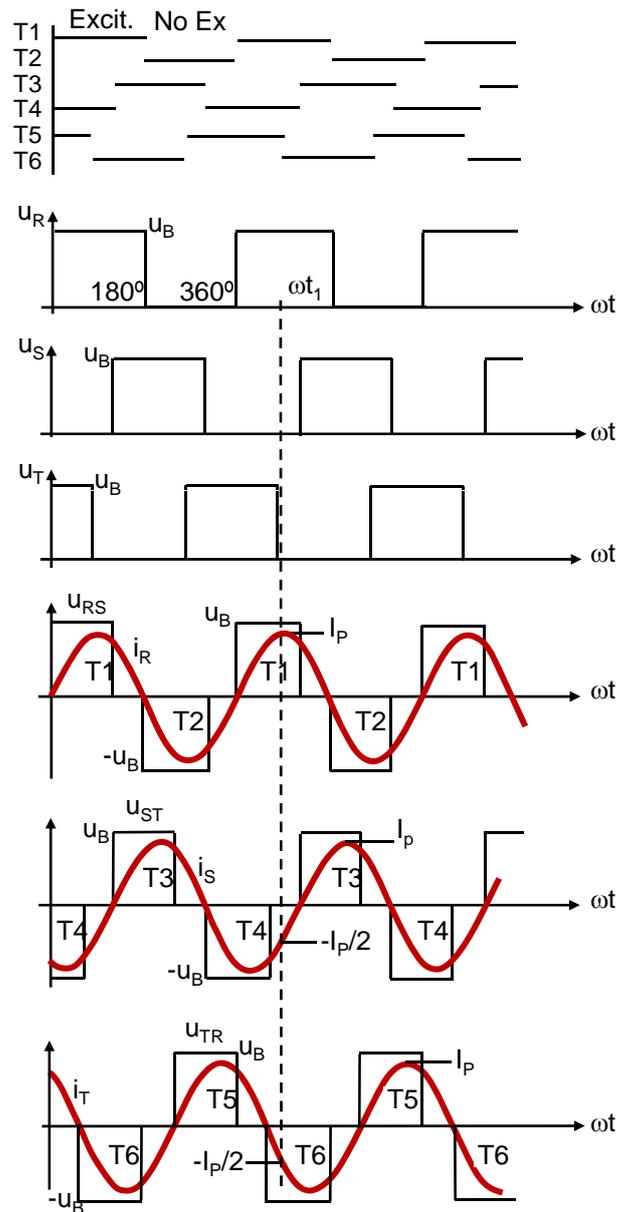
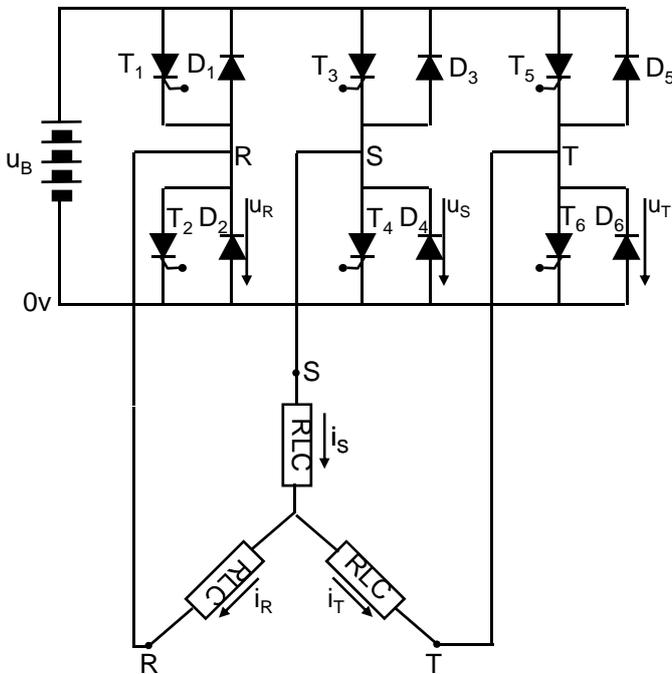
CARACTERÍSTICAS:

- Tensión máxima que deben soportar los interruptores de potencia: U_B , más las sobretensiones que originen los circuitos prácticos, que en este caso serán mayores debido a la inductancia de dispersión del transformador.
- Tensión máxima en la carga U_B .
- El transformador de toma media tiene un factor de utilización bajo en el primario y empeora bastante el rendimiento de los circuitos prácticos. No es aconsejable utilizar esta topología para potencias de más de 10kVA.
- Solo utiliza dos interruptores de potencia y ambos están referidos a masa y por tanto su gobierno es sencillo.



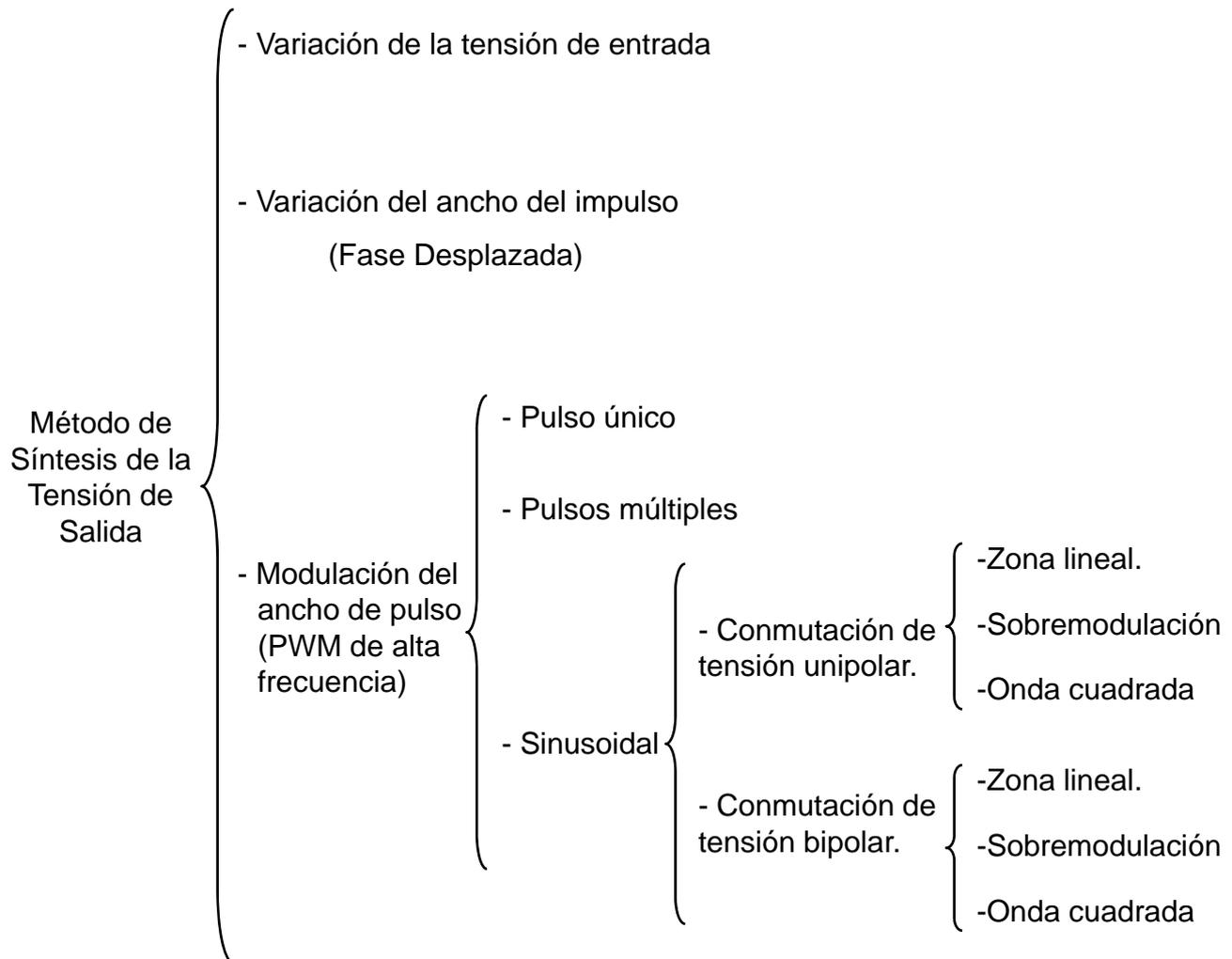
Puente Trifásico

Puente trifásico de tres ramas





MÉTODOS DE SÍNTESIS DE LA TENSIÓN DE SALIDA





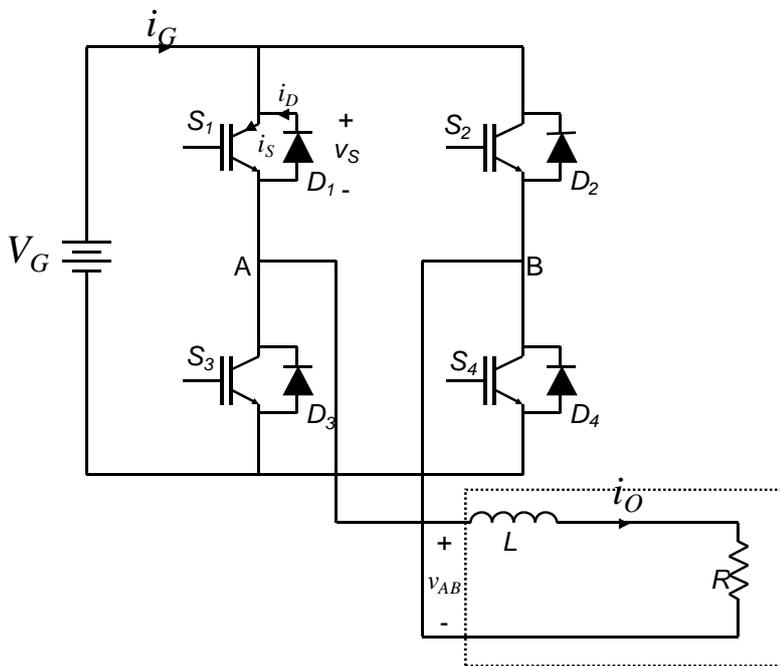
Control por desplazamiento de fase

- El valor eficaz de la tensión de salida, se controla mediante el regulador de C.C. (chopper) de entrada o mediante el ángulo de conducción θ .
- Las señales de disparo de Q1 y Q3 (y las de Q2 y Q4) deben ser complementarias obligatoriamente.
- El ciclo de trabajo para todos los transistores es: $d=50\%$.
- Manejando el ángulo de conducción θ conseguimos controlar:
 - El contenido armónico de la tensión o corriente en la carga; p. ej. para $\theta=120^\circ$ el 3^{er} armónico se anula y por tanto la Distorsión Armónica Total (D.A.T.) es mínima.

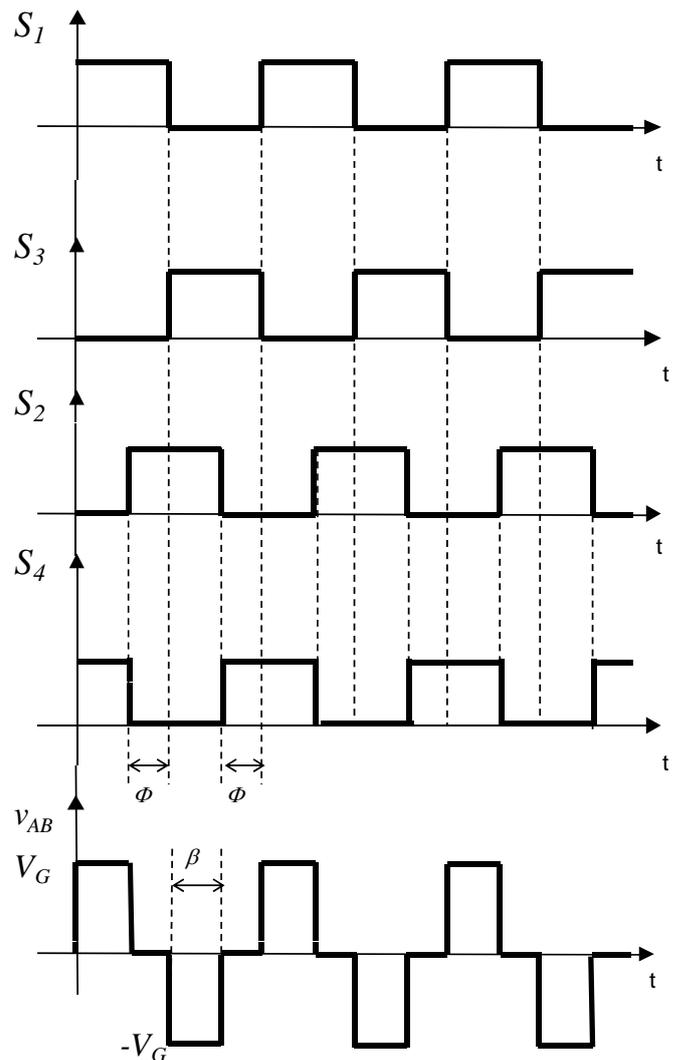
$$DAT = \frac{\sqrt{I_{1ef}^2 + I_{3ef}^2 + I_{5ef}^2 + \dots}}{I_{1ef}} \quad (\text{Onda con armónicos impares})$$

- La posibilidad que durante ciertos intervalos de un periodo, la carga ceda energía a la fuente (esto requiere una fuente especial) o intervalos en los cuales la fuente no cede energía.
 - ◇ Conducción de dos transistores, la fuente cede potencia.
 - ◇ Conducción de dos diodos, la carga cede potencia.
 - ◇ Conducción de un diodo y un transistor, no se cede potencia desde la fuente.

SÍNTESIS DE LA TENSION DE SALIDA



- Las señales de gobierno son S_1 y S_2 , estas señales van desfasadas un ángulo ϕ .
- S_3 es complementaria de S_1 .
- S_4 es complementaria de S_2 .
- Cuando conducen $S_1 - S_4$ aplican tensión positiva a la carga: $v_{AB} = +V_G$
- Cuando conducen $S_1 - S_2$ aplican tensión nula a la carga: $v_{AB} = 0$
- Cuando conducen $S_2 - S_3$ aplican tensión negativa a la carga: $v_{AB} = -V_G$
- Cuando conducen $S_3 - S_4$ aplican tensión nula a la carga: $v_{AB} = 0$



CONCEPTOS EN PWM SINUSOIDAL

Definiremos:

RELACIÓN DE LA AMPLITUD DE MODULACIÓN

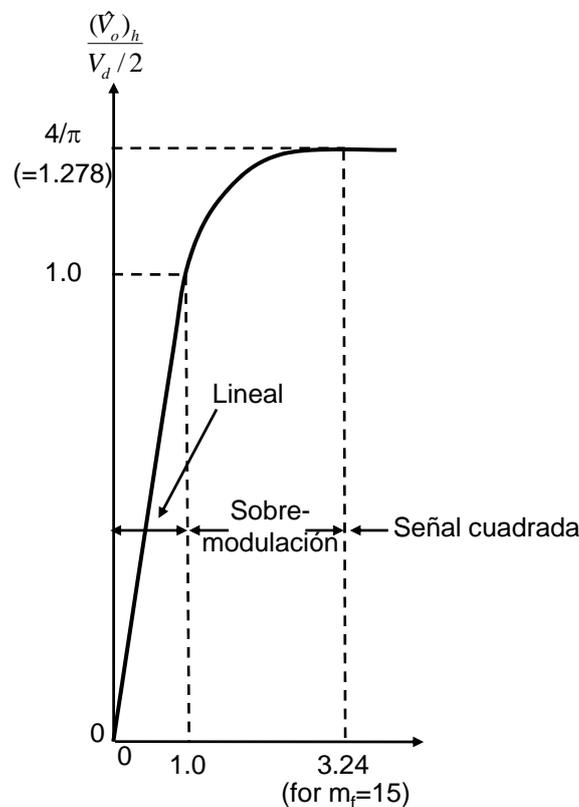
$$m_a = \frac{V_{\max \text{ control}}}{V_{\max \text{ triangular}}}$$

RELACIÓN DE LA FRECUENCIA DE MODULACIÓN

$$m_F = \frac{f_{\text{triangular}}}{f_{\text{onda_control}}}$$

CONTROL DE LA TENSIÓN DE SALIDA POR VARIACIÓN DE m_a

- ZONA LINEAL
- SOBREMÓDULACIÓN
- ONDA CUADRADA



SÍNTESIS DE LA TENSIÓN DE SALIDA



ZONA LINEAL

- La relación de amplitud de modulación está comprendida entre 0 y 1.
- La amplitud de la componente fundamental de la tensión de salida es proporcional a m_a .

$$(V_o)_1 = m_a \cdot V_d$$

- Existe una banda de armónicos alrededor de mf , $2mf$, $3mf$, etc.
- Para $mf < 21$, f_1 y f_s deben estar sincronizadas, con el fin de disminuir el número de subarmónicos de la frecuencia fundamental.
- Para $mf > 21$, la amplitud de los subarmónicos disminuye por lo que se podrá utilizar PWM asíncrono, aunque cuando la carga es un motor de corriente, alterna provoca altas corrientes por lo que no se recomienda.

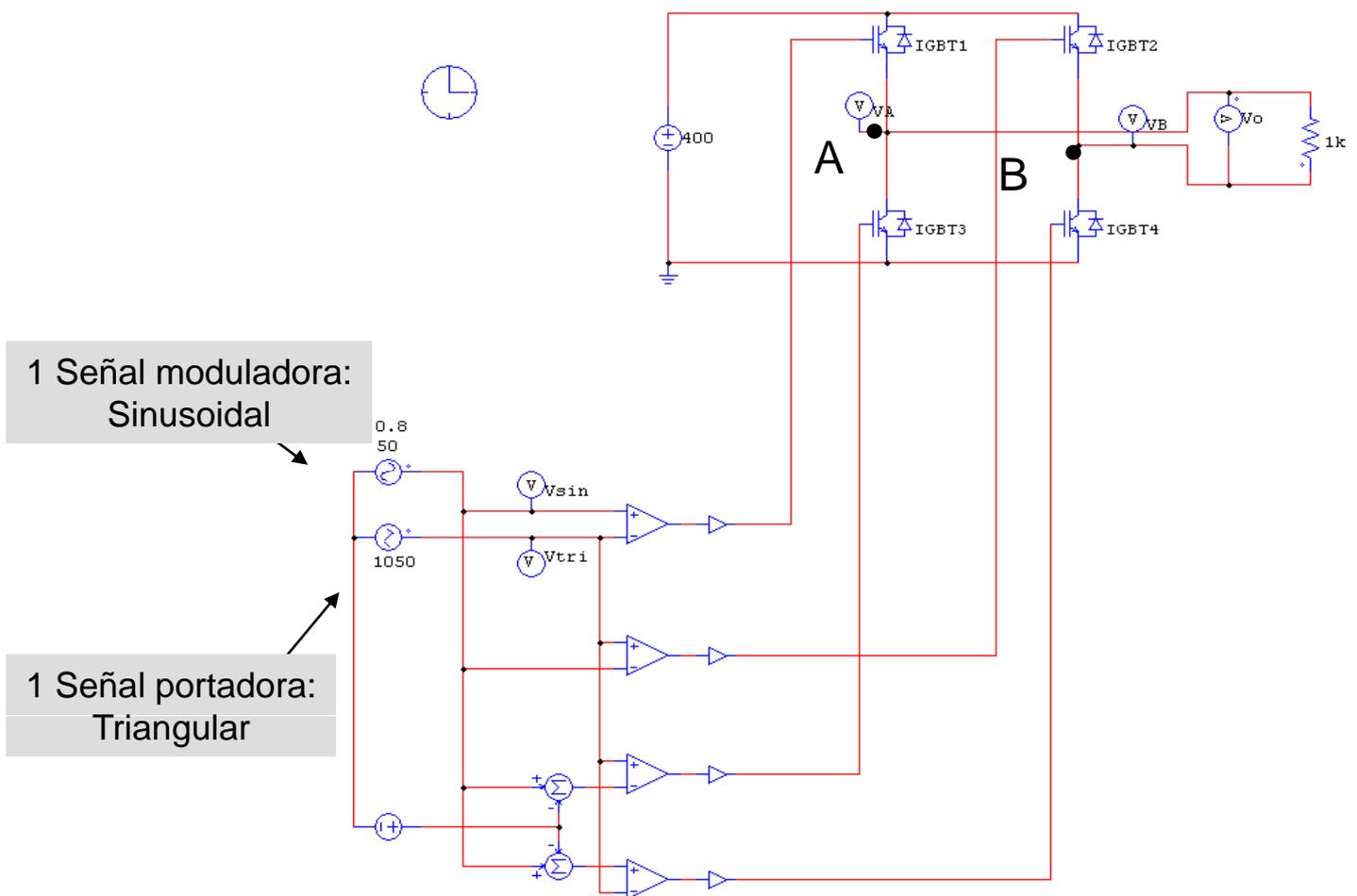
SOBREMÓDULACIÓN

- La relación de amplitud de modulación es mayor que 1.
- Se producen muchos más armónicos.
- La amplitud de los armónicos dominantes en la zona lineal, no son dominantes durante la sobremodulación.
- La amplitud de la componente fundamental de la tensión de salida no solamente depende de m_a , sino que también depende de m_f , por lo cual la relación con la tensión de entrada deja de ser lineal.

ONDA CUADRADA

- La amplitud de la componente fundamental de la tensión de salida, toma el valor máximo durante todo este periodo.
- El valor máximo de la amplitud es de 1,273 veces la tensión de entrada.
- El número de armónicos es mayor que en los casos anteriores, por lo tanto la tensión a la salida es menos parecida a una sinusoidal pura.

PWM SINUSOIDAL CON CONMUTACIÓN DE TENSIÓN BIPOLAR



1 Señal moduladora:
Sinusoidal

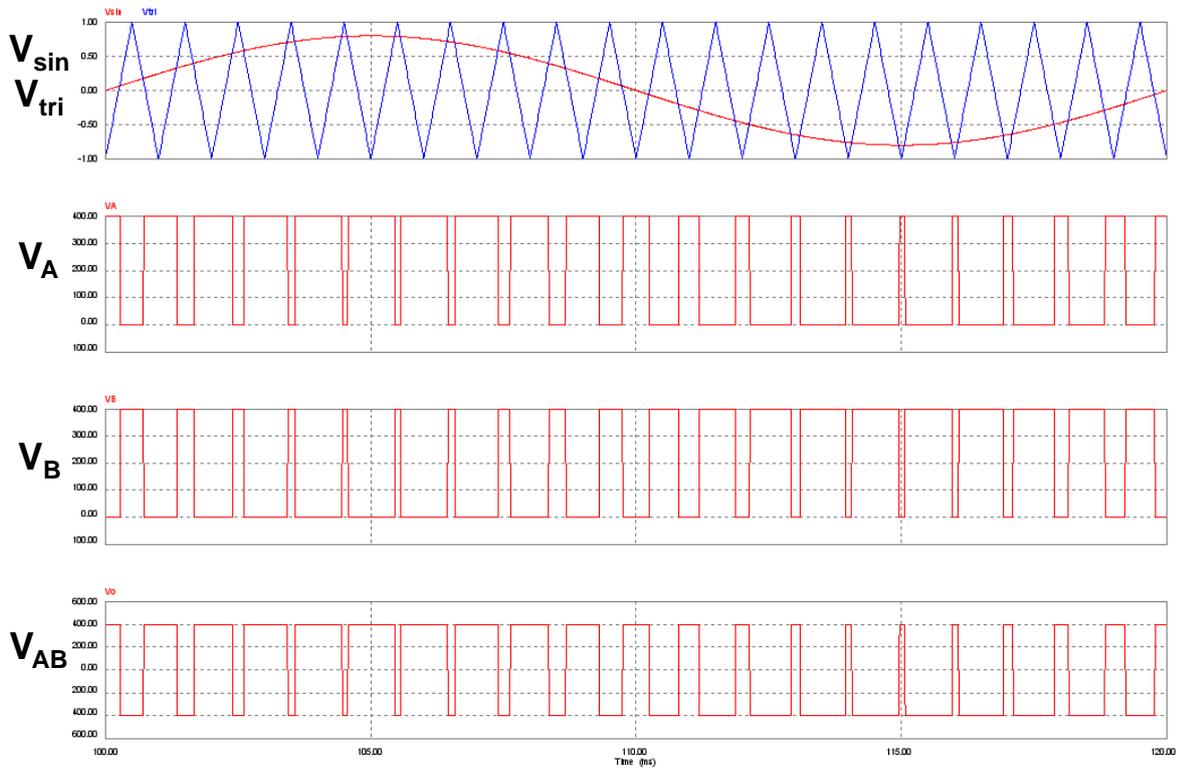
1 Señal portadora:
Triangular

SÍNTESIS DE LA TENSIÓN DE SALIDA



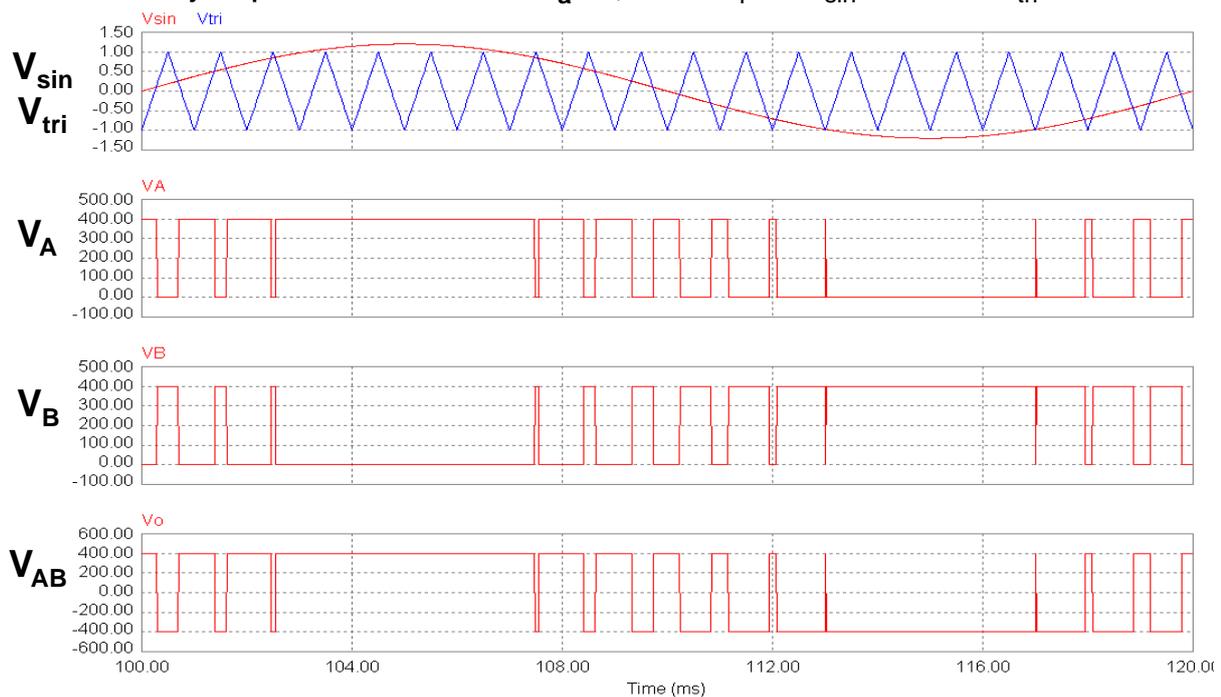
Zona lineal. Modulación PWM sinusoidal bipolar

Ejemplo: $V_{cc}=400V$ $m_a=0,8$ $m_f=21$ $f_{sin}=50Hz$ $f_{tri}=1050Hz$



Zona de sobremodulación. Modulación PWM sinusoidal bipolar

Ejemplo: $V_{cc}=400V$ $m_a=1,25$ $m_f=21$ $f_{sin}=50Hz$ $f_{tri}=1050Hz$



SÍNTESIS DE LA TENSIÓN DE SALIDA



Análisis zona lineal modulación PWM bipolar

- La amplitud del primer armónico de V_{AB} es proporcional a m_a

$$\hat{V}_{AB} = m_a \cdot V_{cc}$$

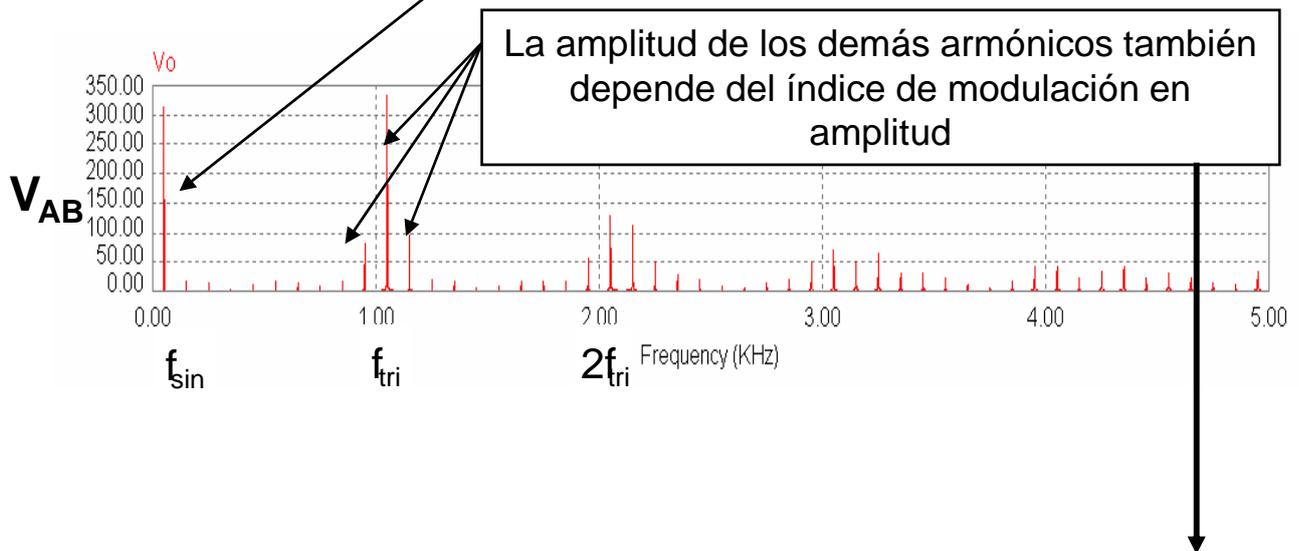
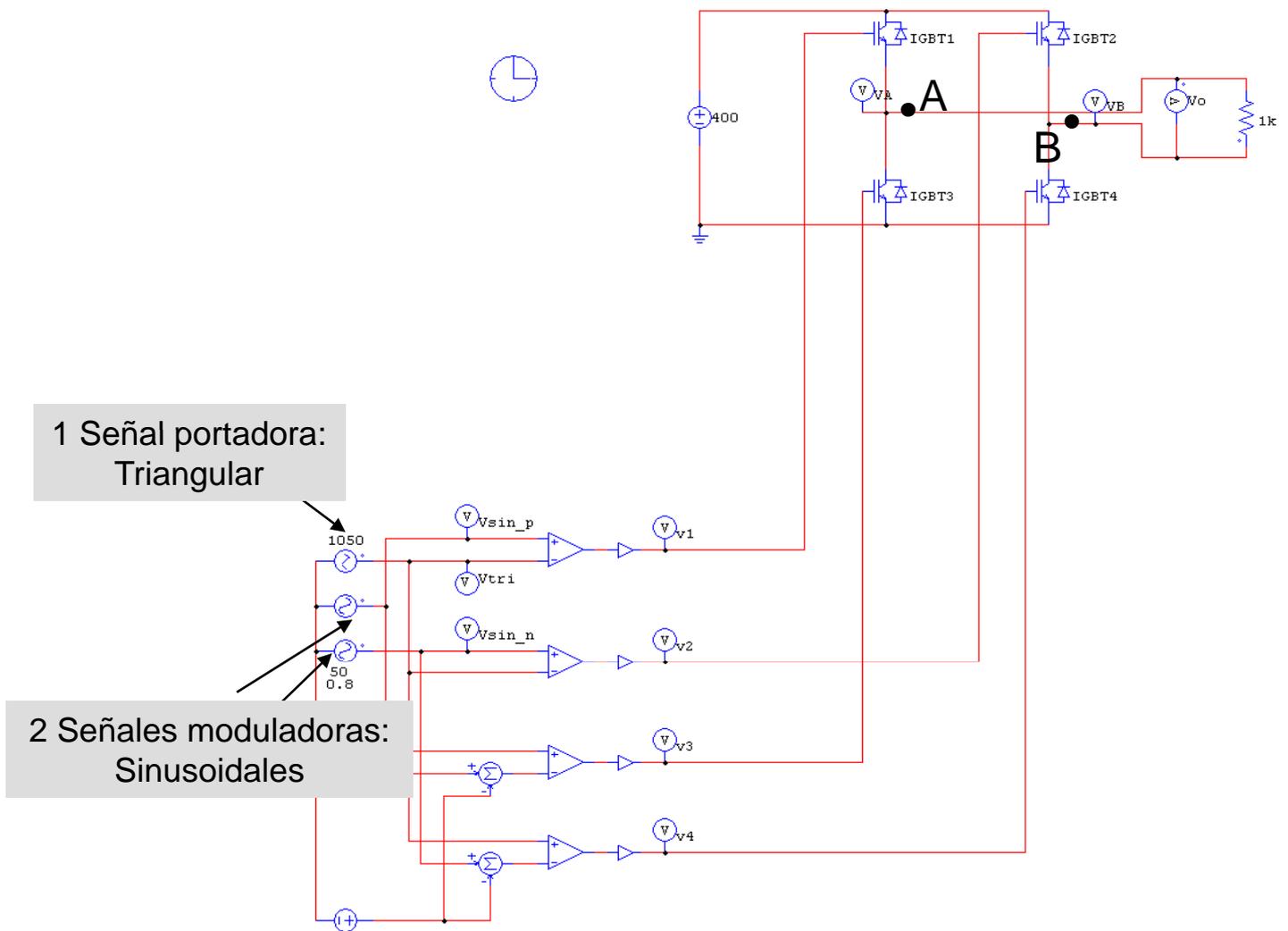


Tabla de amplitudes normalizadas, modulación PWM sinusoidal bipolar

Amplitudes normalizadas $V_n/(V_{CC})$ para modulación PWM Sinusoidal Bipolar										
m_a	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
$n=1$	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
$n= mf$	1,27	1,24	1,20	1,15	1,08	1,01	0,92	0,82	0,71	0,60
$n= mf \pm 2$	0,00	0,02	0,03	0,06	0,09	0,13	0,17	0,22	0,27	0,32

PWM SINUSOIDAL CON CONMUTACIÓN DE TENSIÓN UNIPOLAR



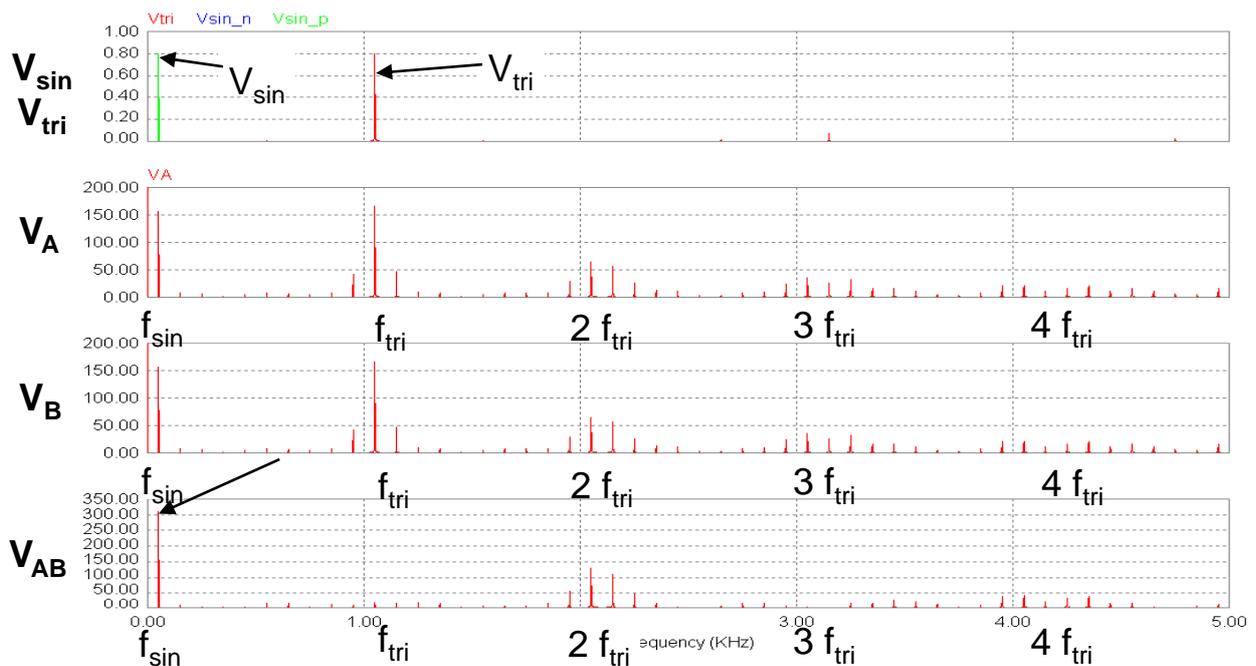
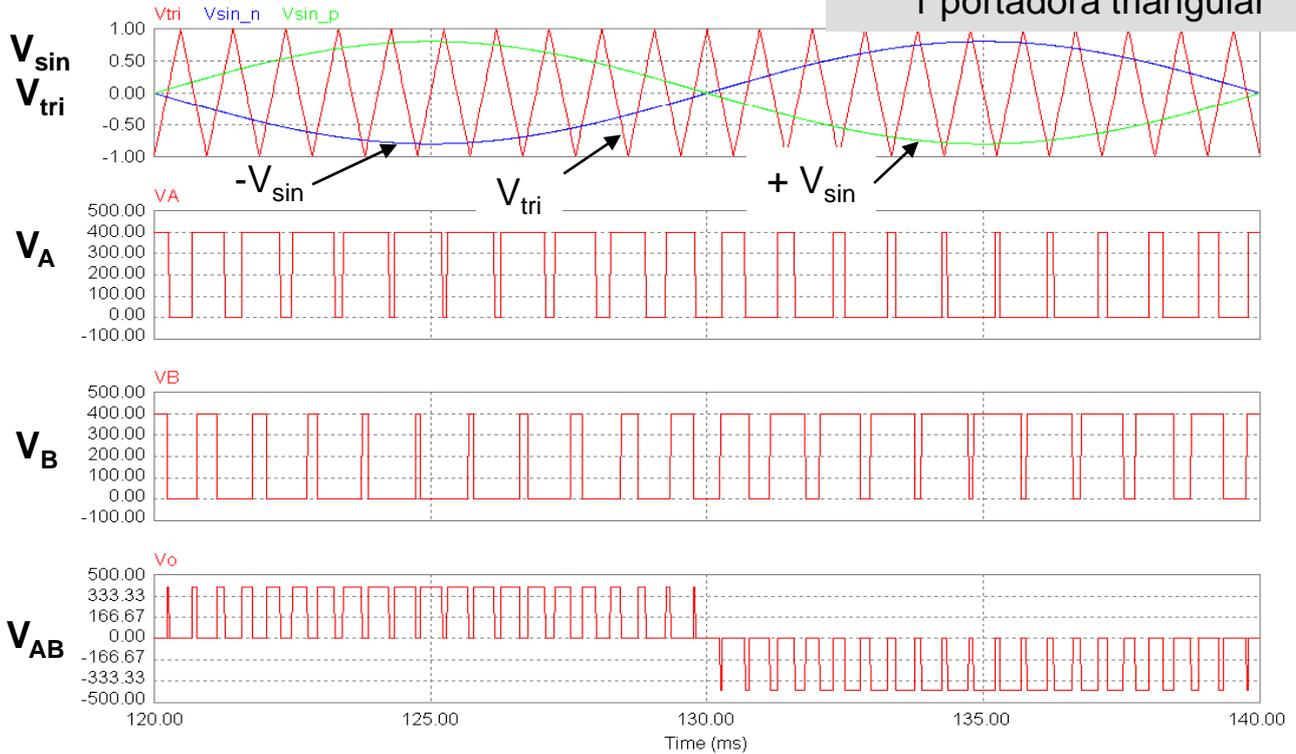
SÍNTESIS DE LA TENSIÓN DE SALIDA



Zona lineal. Modulación PWM sinusoidal unipolar

Ejemplo: $V_{cc}=400V$ $m_a=0,8$ $m_f=21$ $f_{sin}=50Hz$ $f_{tri}=1050Hz$

2 moduladoras sinusoidales
1 portadora triangular



Los armónicos de la tensión de salida aparecen a mayor frecuencia que en el caso bipolar

SÍNTESIS DE LA TENSIÓN DE SALIDA



Análisis zona lineal modulación PWM unipolar

- La amplitud del primer armónico de V_{AB} es proporcional a m_a

$$\hat{V}_{AB} = m_a \cdot V_{cc}$$

La amplitud de los demás armónicos también depende del índice de modulación en amplitud

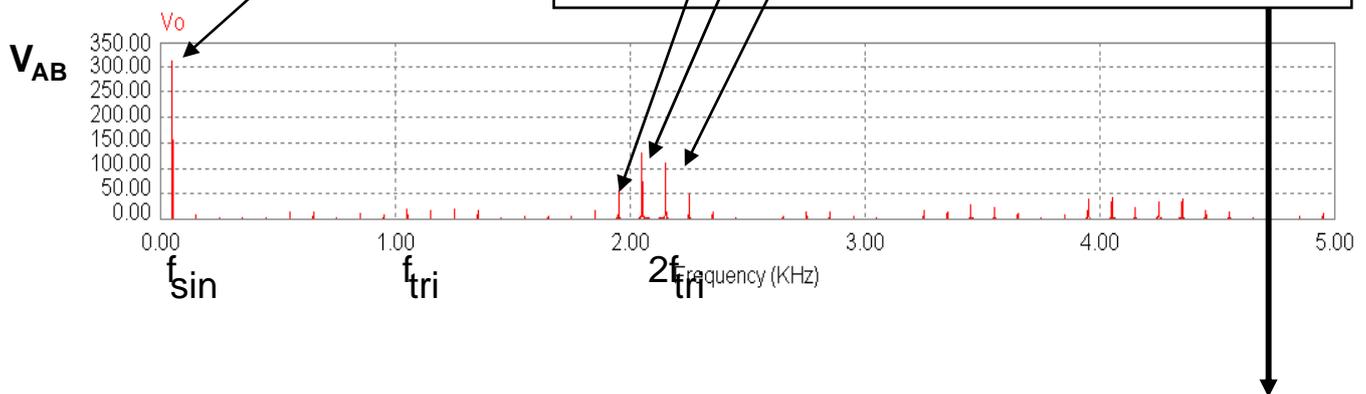
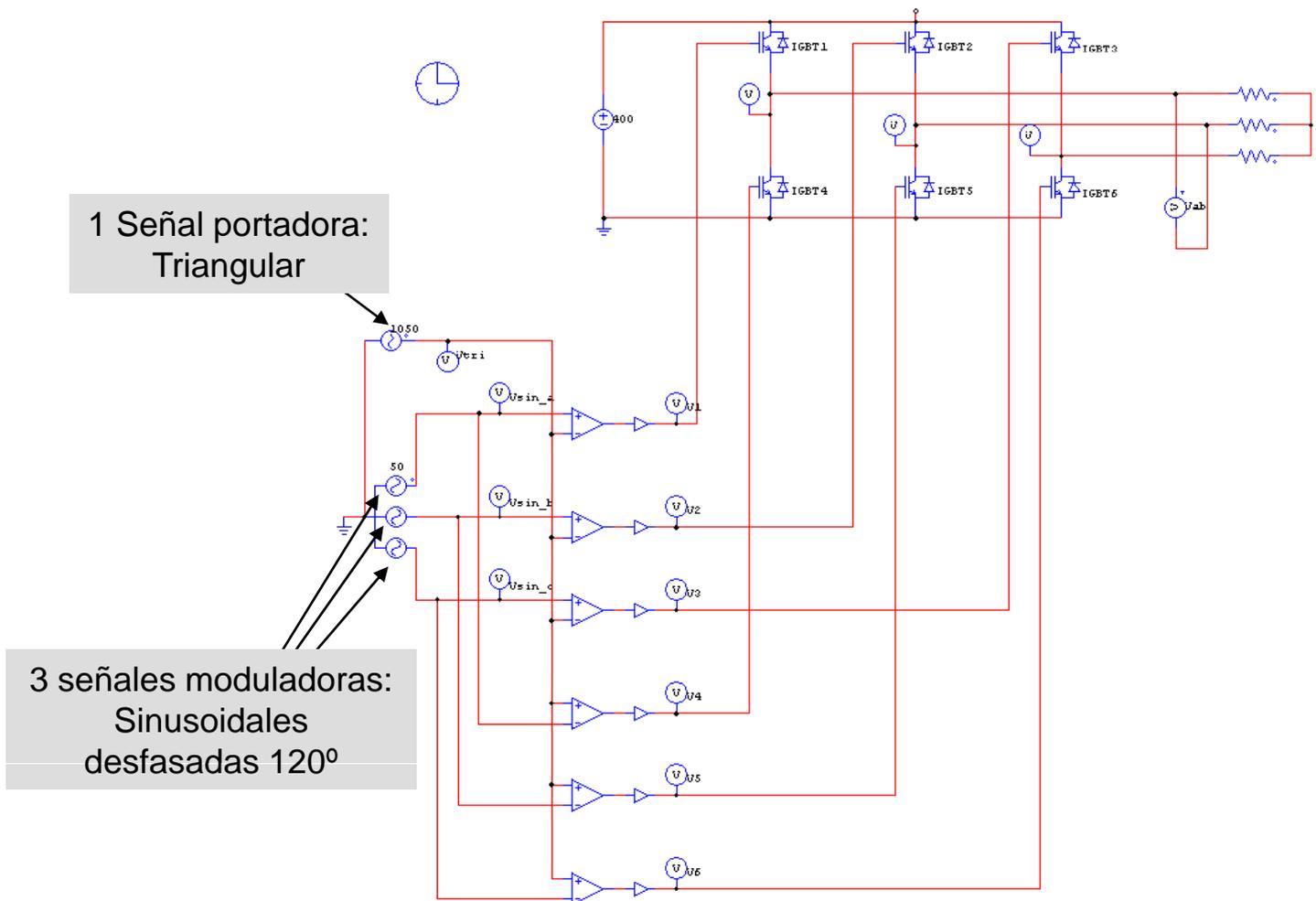


Tabla de amplitudes normalizadas, modulación PWM sinusoidal unipolar

Amplitudes normalizadas $V_n/(V_{cc})$ para modulación PWM Sinusoidal Unipolar										
m_a	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
$n=1$	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
$n=2mf+1$	0,10	0,19	0,27	0,33	0,36	0,37	0,35	0,31	0,25	0,18
$n=2mf\pm 3$	0,00	0,00	0,01	0,02	0,04	0,07	0,10	0,14	0,18	0,21

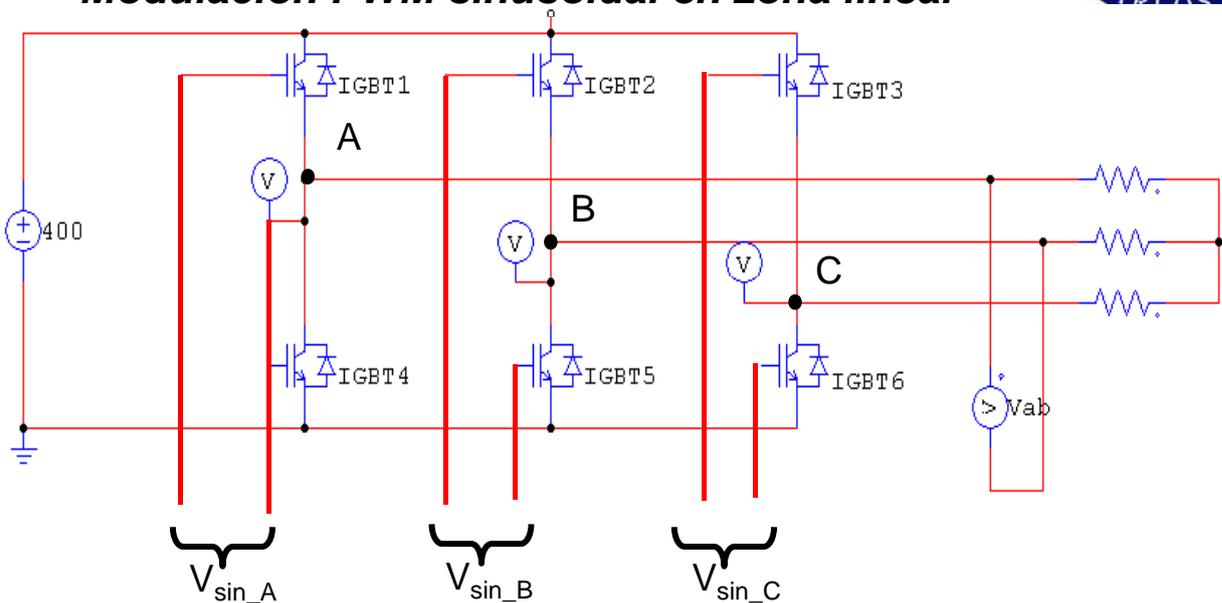
INVERSORES TRIFÁSICOS CON MODULACIÓN PWM SINUSOIDAL



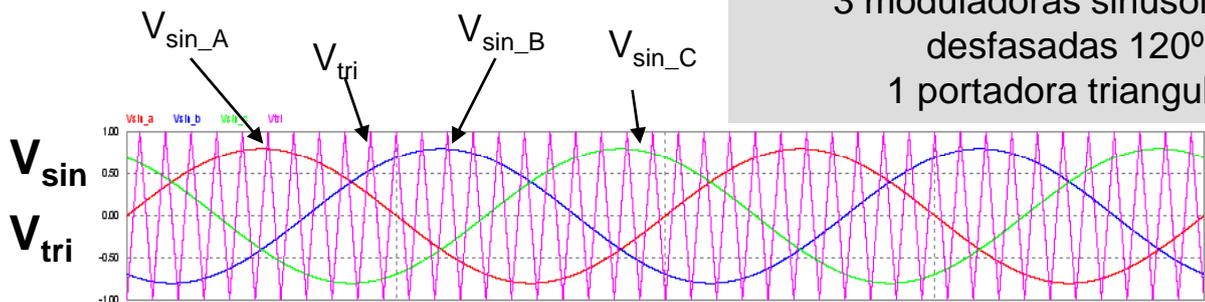
SÍNTESIS DE LA TENSIÓN DE SALIDA



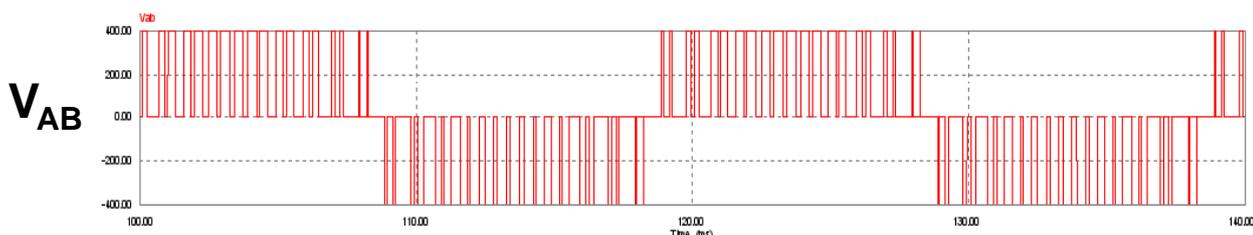
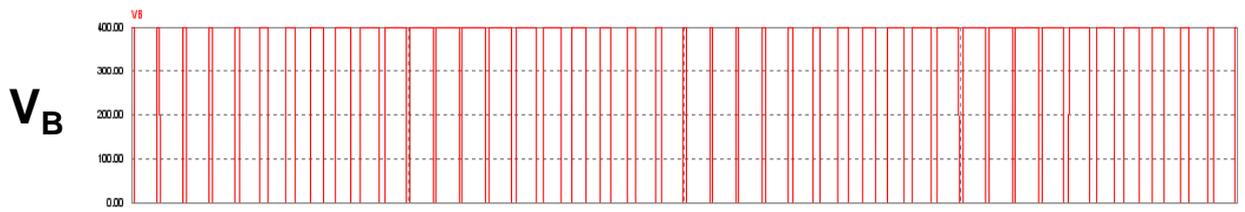
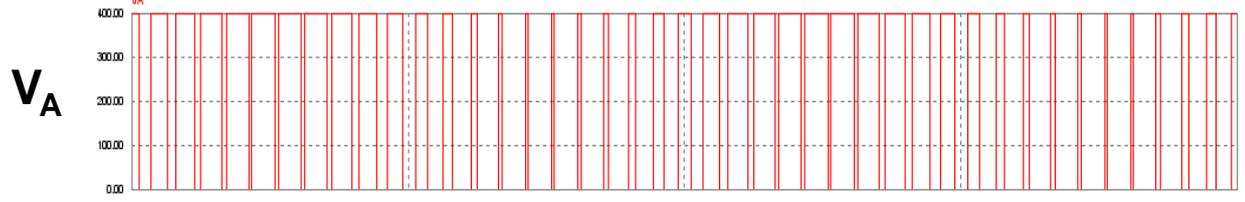
Modulación PWM sinusoidal en zona lineal



3 moduladoras sinusoidales desfasadas 120°
1 portadora triangular

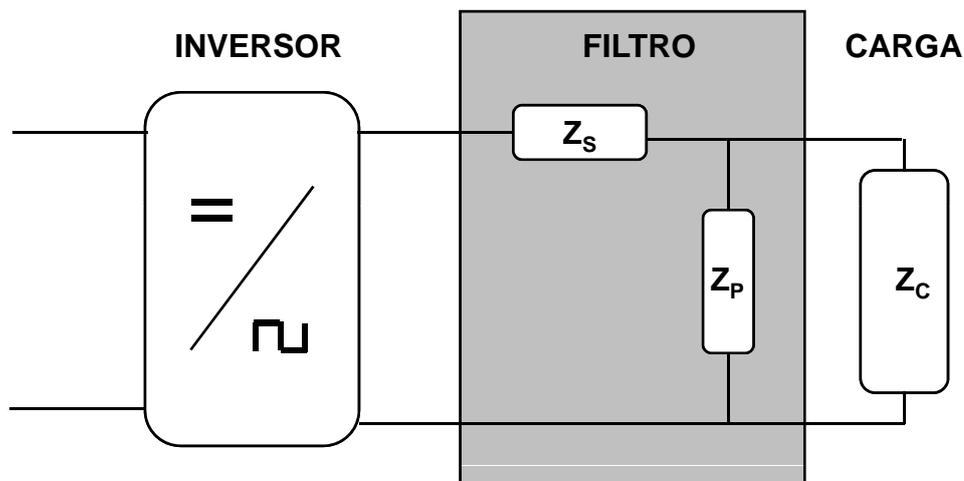


Ejemplo: $V_{cc}=400V$ $m_a=0,8$ $m_f=21$ $f_{sin}=50Hz$ $f_{tri}=1050Hz$



FILTRADO DE LA TENSIÓN DE SALIDA

El objetivo del filtrado es ofrecer a la carga únicamente el primer armónico de la tensión que ha sintetizado el inversor, prescindiendo de los armónicos de orden superior que esta tensión lleva asociados. Por poner un ejemplo, en un motor de inducción, la componente fundamental de la forma de onda produce el par útil mientras que los armónicos se traducen en pérdidas y por tanto en un rendimiento bajo y un calentamiento extra.

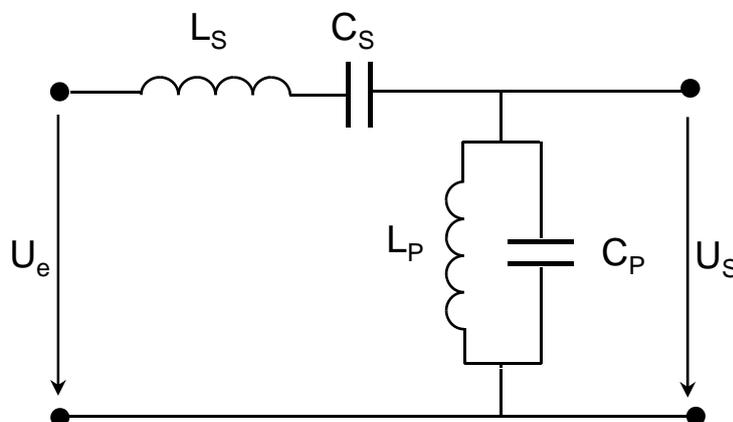


Filtro de salida: Configuración en L generalizada

Nos interesa que Z_S sea , para el armónico fundamental y muy alta para los demás; Z_P al contrario, muy elevada para el armónico fundamental y muy baja para el resto de los armónicos.

¿Cómo conseguimos esto?

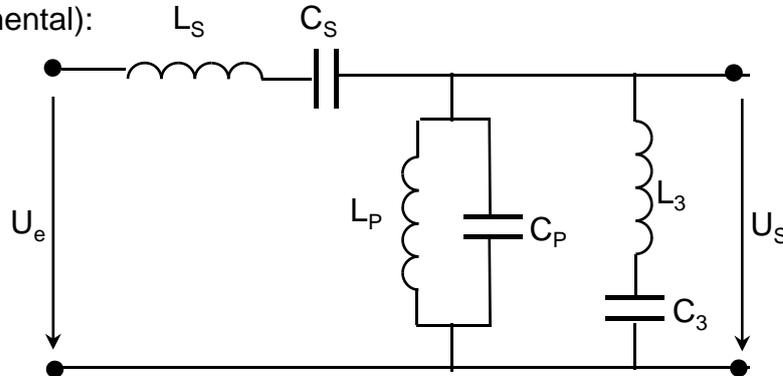
Mediante ramas resonantes sintonizadas a la frecuencia del armónico fundamental.



FILTRADO DE TENSIÓN DE SALIDA



Si en algún caso tras el filtro en L todavía queremos eliminar algún armónico en particular, por ejemplo el 3º, sintonizaremos una rama resonante $L_3 C_3$ a esta frecuencia (triple de la fundamental):



El filtro total es un filtro de 6º orden con 3 ramas:

- la rama serie (L_S , C_S) sintonizada a la frecuencia fundamental.
- la rama para el 3º armónico L_3 , C_3 .
- la rama paralelo L_P , C_P

Debemos hacer notar que el cálculo de L_3 , C_3 y L_P , C_P ya no se puede hacer de manera independiente. Se puede encontrar un sistema de cálculo completo en [1].

Algunas cargas también tienen un efecto de filtro.

Por ejemplo, vamos a observar cómo un motor de inducción, que como carga tiene un carácter altamente inductivo, filtra la corriente que absorbe, cuando le alimentamos con una tensión PWM.

