

PRÁCTICA 7: DISEÑO Y VERIFICACIÓN DE INVERSOR ALIMENTADO POR TENSIÓN EN PUENTE COMPLETO CON DISTINTAS TÉCNICAS DE MODULACIÓN DE ANCHURA DE PULSO

Alumnos: _____

Grupo: _____

OBJETIVO:

- Introducción al alumno a la caracterización y diseño de los inversores.
- Diseño y verificación de la estructura de puente completo como circuito inversor monofásico.
- Estudio de las distintas técnicas de modulación. Determinación de los principales parámetros referentes a la "calidad" de la tensión en la carga.

1 Introducción y definiciones

Por circuito inversor se entiende aquellos circuitos que convierten una tensión dc de entrada en una tensión ac de salida, de magnitud y frecuencia controlable. Su aplicación va desde el control de la velocidad en motores ac, el caldeo por inducción, los SAI, etc.

En esta práctica vamos a implementar un inversor en configuración de puente completo, tal como se muestra en la figura 1:

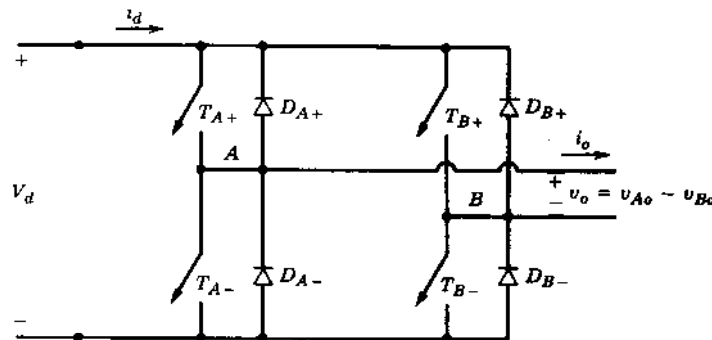


Figura 1: Inversor monofásico en puente completo.

En un primer semiciclo ($T_s/2$) los conmutadores T_{A+} y T_{B-} están activos y la tensión instantánea a través de la carga es V_d . Durante el segundo semiciclo se lleva a T_{B+} y T_{A-} a conducción, con lo que la tensión aplicada a la carga será ahora de $-V_d$. Es importante establecer un cierto tiempo muerto en la conducción de los transistores, para evitar la conducción simultánea de los transistores de una misma rama, que llevaría a un cortocircuito momentáneo de la fuente de alimentación, y a la destrucción de los transistores.

Cuando la carga disponga de componentes reactivas, la intensidad estará desfasada positiva o negativamente frente a la tensión. En los intervalos en los que la corriente y la tensión no coincidan en signo, los interruptores se cortarían necesitando la incorporación de diodos en antiparalelo, para posibilitar un conmutador bidireccional en corriente. Generalmente este diodo en antiparalelo es parte constructiva del conmutador utilizado (ver hoja de datos del fabricante). Cuando los diodos en antiparalelo conducen, la energía es devuelta a la fuente de continua.

En los inversores ideales, la tensión de salida debe ser senoidal, aunque en un caso real siempre tenemos armónicos no deseados. Para aplicaciones de baja y media potencia se considera aceptable una tensión de salida cuadrada o casi cuadrada. La calidad de un inversor se evalúa en términos de los siguientes parámetros que definen la proximidad de nuestra señal de salida con una senoide perfecta (primer armónico o armónico fundamental).

- **Factor armónico de la enésima componente:**
Mide la contribución ideal de cada armónico

$$HF_n = \frac{V_n}{V_1}$$

- **Distorsión armónica total:**

Mide la forma de dependencia entre una forma de onda y su componente fundamental. Así mide el contenido total de armónicos. Normalmente se expresa en porcentaje.

$$THD = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{n=2,3,\dots}^{\infty} V_n^2 \right)^{1/2}$$

- **Factor de distorsión:**

El factor de distorsión es una medida del alejamiento de la forma de onda de salida con respecto a otra con forma de onda senoidal pura, que corresponde a su componente fundamental. Este factor de distorsión, normalmente se expresa en porcentaje, siendo del 100% en el caso ideal.

$$\text{Factor de distorsión} = \frac{V_1}{\left(\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2 \right)^{1/2}} = \left(\frac{1}{1 + THD^2} \right)^{1/2}$$

Reducir el contenido en armónicos va a ser una de las tareas primordiales en el diseño de inversores, no sólo por el efecto negativo que tiene sobre el factor de potencia, sino también por el ruido que estos introducen en la red, el cual no debe superar los márgenes que establece la normativa.

En muchas aplicaciones industriales se necesita controlar la tensión de salida, tanto en amplitud como en frecuencia. El control del valor eficaz de la tensión de salida se consigue fácilmente mediante un control PWM, que básicamente consiste en la comparación de una señal triangular (V_{tri}) que llamaremos señal **portadora**, con una señal de control ($V_{control}$) o señal **moduladora**.

La tensión de salida promediada sobre un periodo de la frecuencia de conmutación depende del cociente entre $V_{control}$ y V_{tri} . Para una tensión de alimentación V_d dada:

$$V_{AB} = \frac{v_{control}}{V_{peak-triangular}} \cdot V_d, \quad \text{con } v_{control} \leq V_{peak-triangular}$$

Donde el cociente $m_a = \frac{v_{control}}{V_{peak-triangular}}$ recibe el nombre de **índice de modulación en amplitud**,

cuya variación permite controlar la ganancia de nuestro inversor y, por tanto, la potencia en la carga (valor eficaz de la tensión aplicada a la salida).

Dependiendo de la tensión de control aplicada encontramos las siguientes técnicas de modulación por anchura de pulso, que vamos a implementar en la práctica:

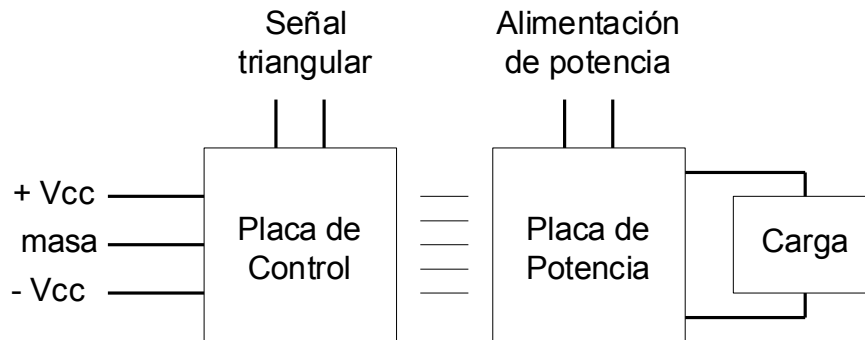
- Modulación de un solo ancho de pulso.
- Modulación de varios anchos de pulso.
- Modulación senoidal del ancho de pulso.

2 Desarrollo práctico.

Tal y como se indicaba en la introducción teórica en esta práctica se va a implementar un inversor en configuración de puente completo y carga resistiva utilizando distintas técnicas de modulación.

Las placas de circuito impreso a emplear son dos: una donde se procesa la potencia y consta de un puente inversor y otra de control donde se generarán las señales de disparo adecuadas en función de cada tipo de modulación. Los correspondientes esquemas se muestran en los anexos al final del guión de la práctica.

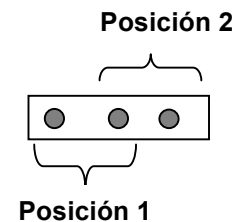
La idea básica del montaje se ilustra en la siguiente figura:



Con la finalidad de implementar en una única placa las distintas técnicas de modulación PWM vistas en el apartado anterior, se han añadido unos interruptores (jumpers) que permiten cambiar la configuración del circuito de control. En la TABLA I se especifica la posición de cada uno de estos jumpers para las distintas técnicas de modulación a implementar.

TABLA1: Posición de los interruptores para cada tipo de modulación

	INTERRUPTOR	POSICIÓN
Un pulso por semiperiodo	S1	1
	S2	1
	S3	1
	S4	2
Varios pulsos por semiperiodo	S1	1
	S2	1
	S3	2
	S4	1
Modulación senoidal del tipo bipolar	S1	2
	S2	2
	S3	1
	S4	2



NOTA: Previamente a conectar la placa de potencia, es obligatorio comprobar el correcto funcionamiento de la placa de control.

NOTA: NUNCA se deberá medir al mismo tiempo la tensión sobre la carga en un canal y cualquier otra tensión de la placa de control en el otro canal. La tensión sobre la carga se puede medir de dos formas: tomando la medida en cada extremo de la carga respecto a masa y luego hacer la resta, o aislando el osciloscopio y tomar la medida con una sola sonda.

2.1 Inversor monofásico con modulación de un solo pulso ($m_a = 0.4$, $f_{out} = 50$ Hz)

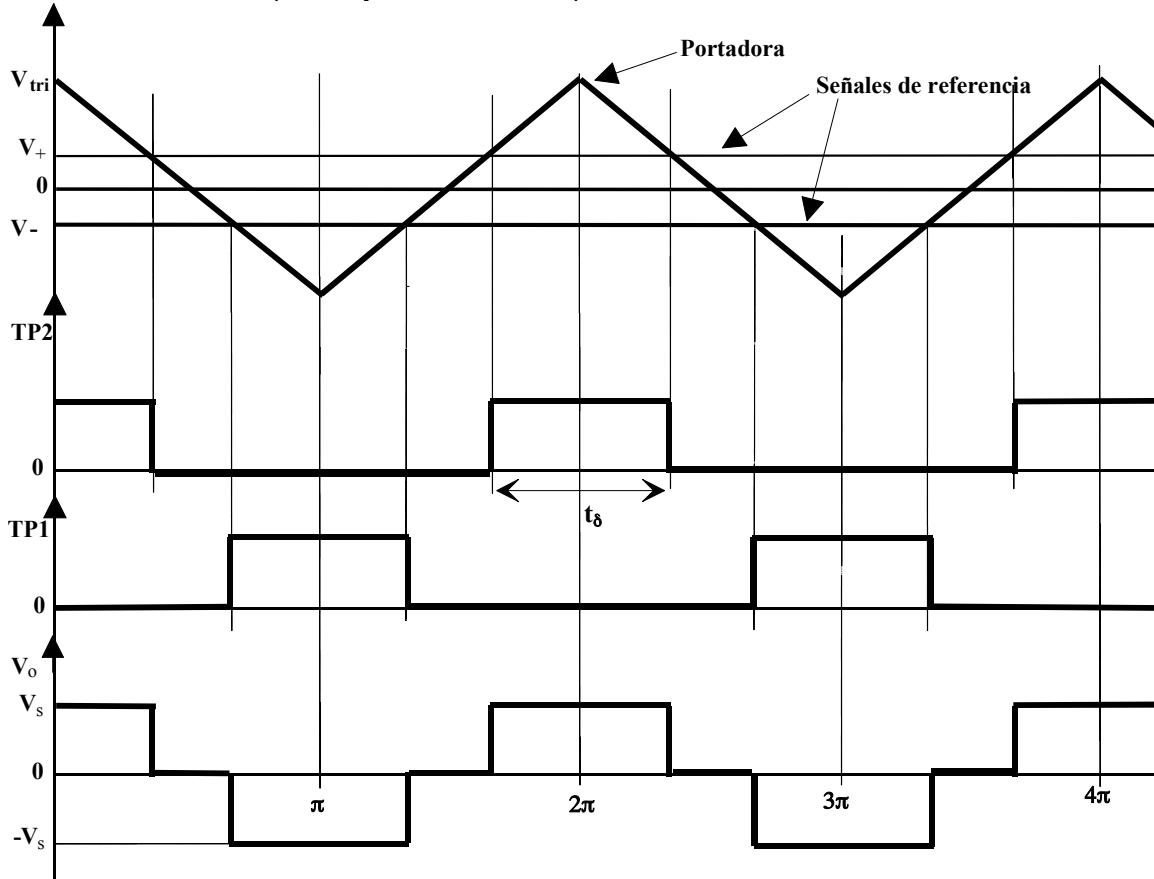
Para este tipo de control se realiza la comparación entre una señal triangular y dos señales de referencia: V_+ y $V_- = -(V_+)$.

Este control se puede implementar de forma simple mediante la comparación de una **onda triangular simétrica** (V_{tri} , señal portadora) con una tensión positiva V_+ (señal de referencia) para generar los pulsos positivos y la comparación con una tensión negativa V_- (de igual amplitud a la positiva, es decir, $V_- = -(V_+)$) que genera los pulsos negativos. V_+ y V_- son generadas a partir de la alimentación simétrica de $\pm 15V$ y su valor se varía mediante el potenciómetro P2.

La frecuencia de la señal triangular impone la frecuencia fundamental de la tensión de salida.

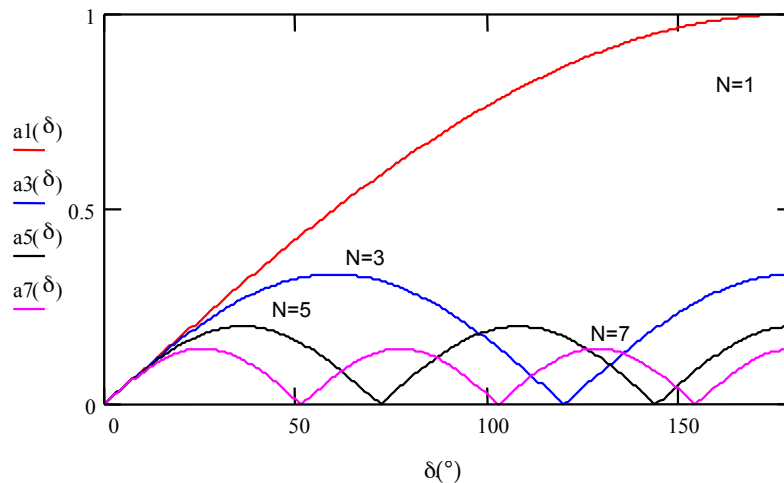
El control de la tensión de salida se realiza mediante la variación del índice de modulación en amplitud: $m_a = \frac{V_+}{V_{tri}}$, es decir, manteniendo la amplitud de la onda triangular fija, podemos variar el ancho de pulso variando la tensión de referencia positiva y negativa.

El valor eficaz de la tensión de salida viene dado por la expresión: $V_o(rms) = V_s \sqrt{\frac{\delta}{\pi}}$, siendo V_s la tensión de alimentación del puente y δ la anchura de pulso.



Técnica de modulación de un solo pulso utilizada en esta práctica.

La tensión de salida presenta armónicos de bajo orden de valor muy elevado, junto con una distribución muy irregular en función de la anchura de pulso. Así, para δ pequeños el contenido en armónicos aumenta.



- Calcular la señal de referencia y portadora para obtener un índice de modulación en amplitud de 0.4 y una frecuencia de salida de 50 Hz (onda triangular de 10 V_{peak}). Indicar los voltios aplicados en V₊ y V₋ y la frecuencia de la onda triangular.

$$f_{tri} = \dots\dots\dots \quad V_+ = -V_- = \dots\dots\dots$$

ES NECESARIO confirmar con el osciloscopio la frecuencia real de la señal triangular, así como que no disponga de offset.

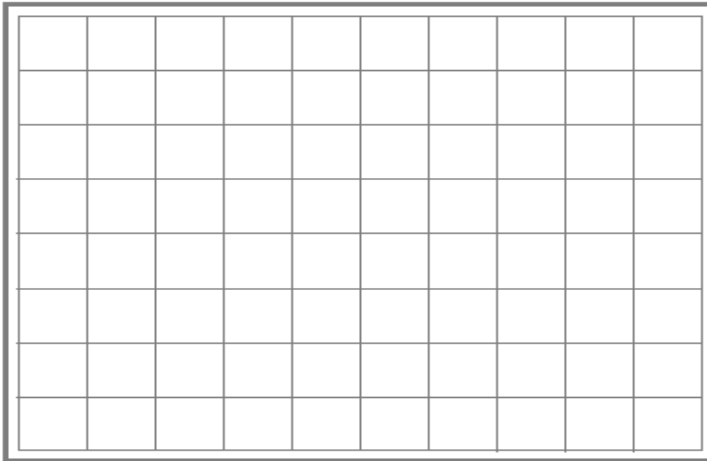
Obtener teóricamente la anchura de pulso para $m_a = 0.4$:

$$t_\delta = \frac{T_{tri}}{2} \left(1 - \frac{V_+}{V_{tri}}\right) = \dots\dots\dots$$

- **Con la placa de potencia sin conectar**, configurar los interruptores (jumpers) de la placa de control según indica la TABLA 1.

Introducir $\pm 15V$ en el conector J1 y la señal triangular en J2. Comprobar si las señales en TP1, TP2 y TP5 son las que cabe esperar viendo el esquema eléctrico de la placa de control. Variar el potenciómetro P2 para conseguir los valores de V₊ y V₋ calculados en el punto anterior medidos con el multímetro en los puentes de S1 y S2.

Dibujar en un mismo plot las señales en **TP3 y TP4**, ambas referidas a masa.

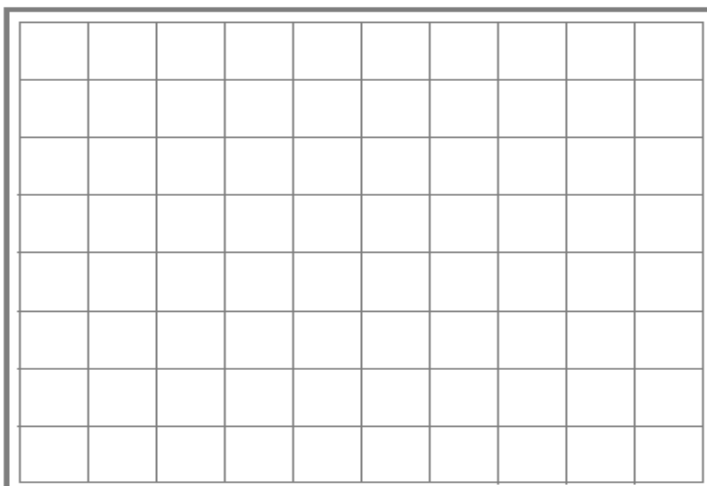


CH1 Volt/div _____

CH2 Volt/div _____

Time s/div _____

- Una vez verificado el correcto funcionamiento de la circuitería de control, añadir la placa de potencia. Seleccionar la misma alimentación de 15V empleada en la placa de control para alimentar la potencia (V_s). Obtener la **tensión en la carga** colocando una resistencia de 47.2 Ω. Para ello realizar la diferencia V_{T4} (CH1) – V_{T5} (CH2), con ambas señales referidas a tierra, o aislar el osciloscopio y medir directamente V_{T4-T5}, en cualquier caso SIN atenuar las sondas del osciloscopio.



CH1 Volt/div _____

CH2 Volt/div _____

Time s/div _____

- Medir con el multímetro el valor eficaz de la tensión en la carga y comparar con el esperado teóricamente. Para obtener la tensión eficaz en la carga, se hará uso de la siguiente expresión:

$$V_o(rms) = V_s \sqrt{\frac{\delta}{\pi}}$$

con δ = Anchura del pulso en radianes

	V_o(rms) (V)
TEÓRICA	
EXPERIMENTAL	

- Con P2 variar la señal de referencia y anotar la variación del valor eficaz de la tensión de salida con la amplitud de los pulsos, t .

t	8ms	6ms	4ms	2ms
V _o teórico (rms) (V)				
Valor experimental: V _o (rms) (V)				

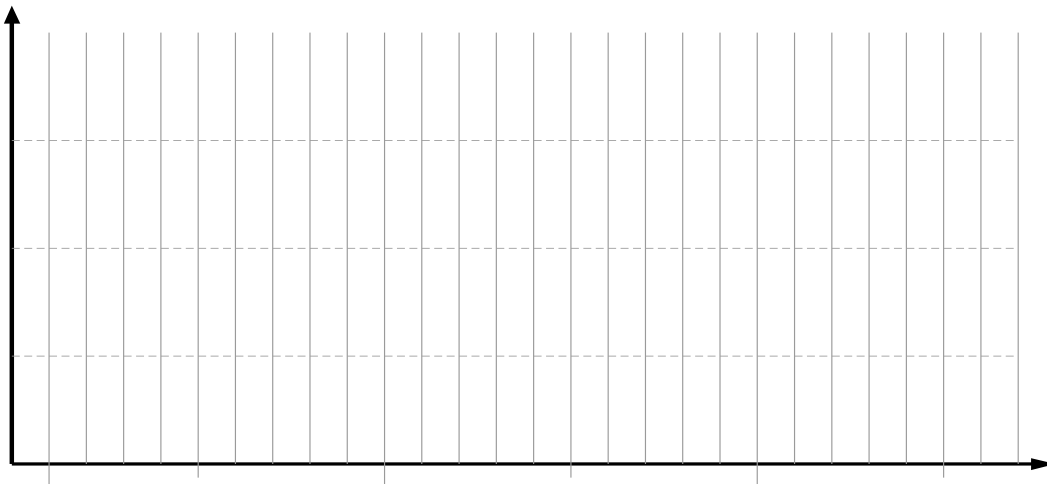
- El estudio de la calidad de la tensión a la salida** se hará haciendo uso del programa ARMONICOS. Este programa permite obtener la descomposición en armónicos de dicha señal.

Colocar la base de tiempos del osciloscopio en 50ms/div para realizar la adquisición de la forma de onda de salida y de su espectro en forma de gráfico de barras. Con esa base de tiempos, la representación del espectro tendrá una $f_{m\acute{a}x} = 1,25$ kHz. Para los valores de t de la siguiente tabla dibujar el espectro de la señal en forma de diagrama de barras y anotar tanto las amplitudes de los armónicos 3º, 5º y 7º como la distorsión armónica total (THD): La amplitud de cada armónico puede obtenerse directamente de una tabla que genera el programa "Armonicos". **Para generar esta tabla hay que introducir el valor exacto de la frecuencia de la señal triangular.**

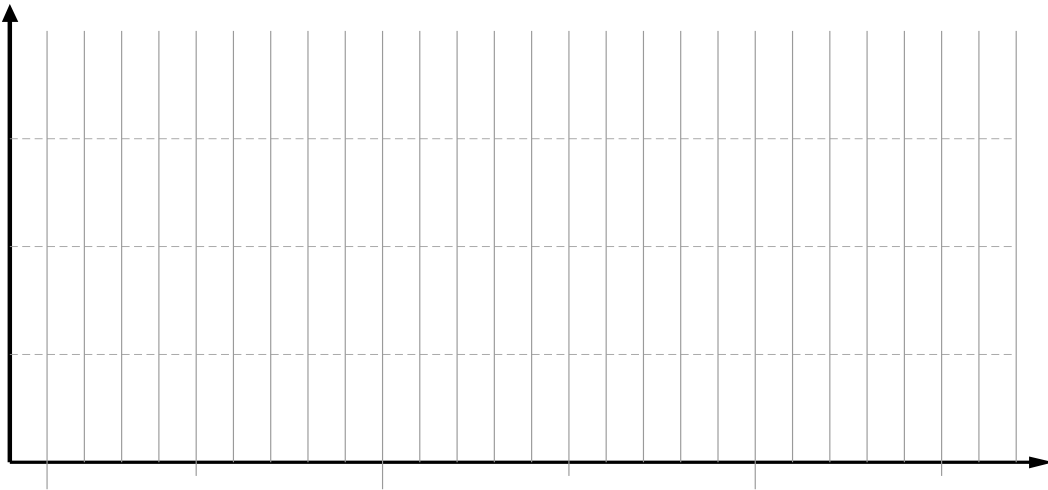
t	6.6ms	4ms	2.9ms
Armónicos	V ₃ = V ₅ = V ₇ =	V ₃ = V ₅ = V ₇ =	V ₃ = V ₅ = V ₇ =
THD			

Nota: La amplitud de cada armónico puede obtenerse directamente de una tabla que genera el programa "ARMONICOS". Para generar esta tabla hay que introducir el valor exacto de la frecuencia fundamental que en este caso será de 50Hz.

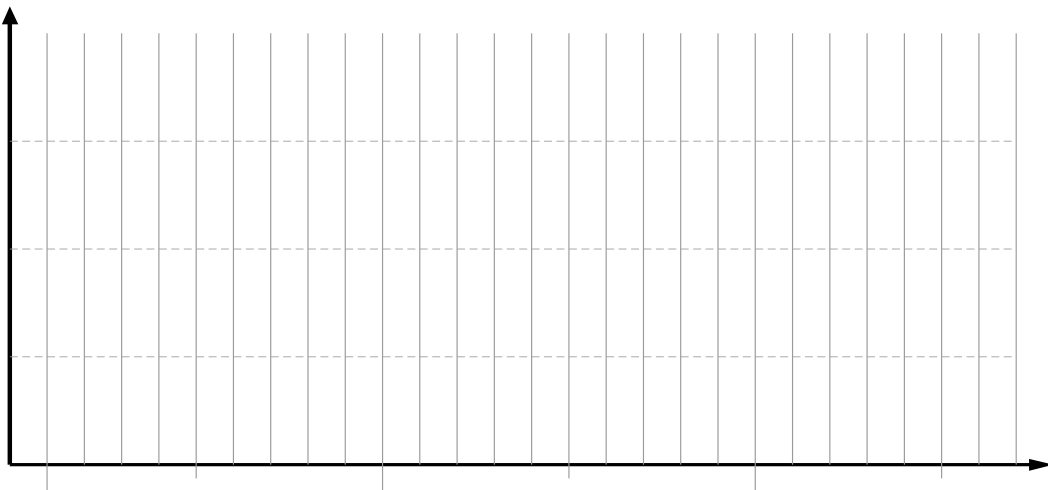
Pulso de 6.6 ms



Pulso de 4 ms



Pulso de 2.9 ms



- Como se puede observar, el contenido en armónicos de la señal de salida es altamente dependiente de la anchura de los pulsos de tal forma que cuando δ disminuye la distorsión armónica total (completar)

.....

- Con ayuda de la gráfica teórica explicar el por qué para los valores de t , de la tabla anterior alguno de los armónicos indicados se cancela:

2.2 Modulación de varios anchos de pulso. ($p=5$, $m_a=0.4$).

Con la finalidad de reducir el contenido en armónicos, se generan varios pulsos de una cierta anchura igual para todos a la frecuencia de la portadora y que cambian de positivo a negativo a la frecuencia de la señal de referencia o moduladora. Por ello, esta modulación también se conoce como modulación uniforme del ancho de pulso.

El control se implementa mediante la comparación de una onda triangular de alta frecuencia (señal portadora) con una onda cuadrada a la frecuencia que deseamos obtener a la salida. La onda cuadrada la obtenemos con un detector de cruce por cero de una onda senoidal mediante el uso de un comparador. Dicha señal senoidal es obtenida mediante el empleo de un oscilador implementado en la placa de control.

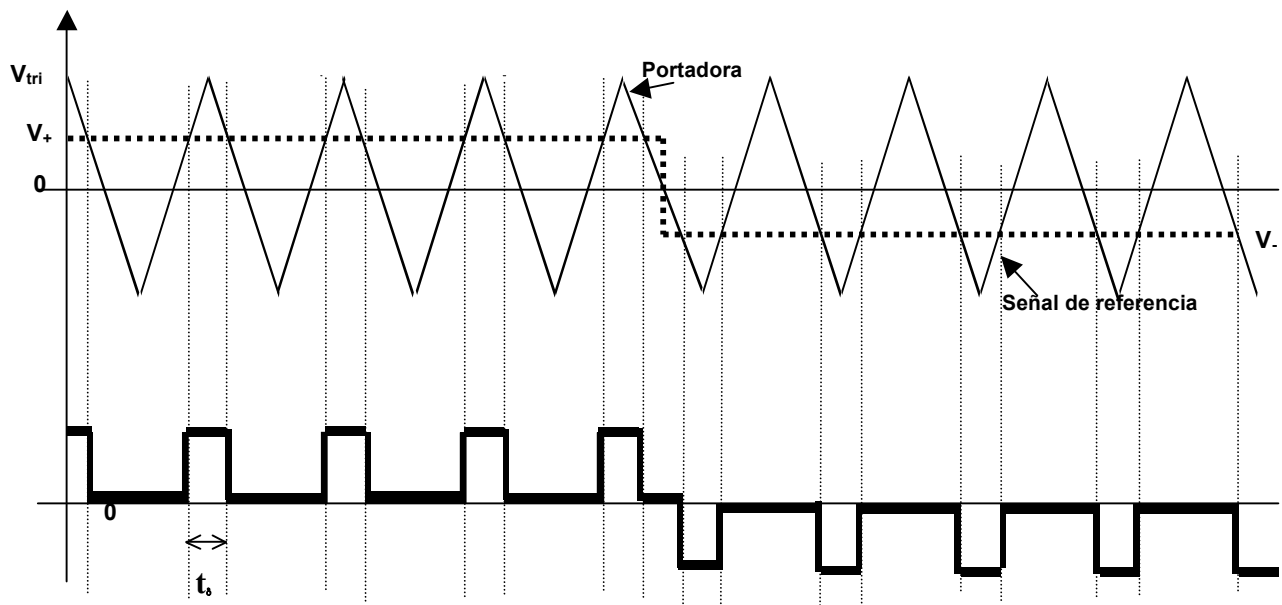
La frecuencia de la señal de referencia o moduladora determina la frecuencia de salida ($f_{\text{cuadrada}} = f_o$), y la frecuencia de la portadora ($f_c = f_{\text{triangular}}$) determina el número de pulsos por medio ciclo p :

$$p = \frac{f_c}{2f_o} = \frac{m_f}{2} \quad \text{donde } m_f = \frac{f_c}{f_o} \text{ es el índice de modulación en frecuencia.}$$

El índice de modulación en amplitud ($m_a = V_+/V_{\text{tri}}$) controla el ancho de los pulsos y, por tanto, la tensión de salida y el índice de modulación en frecuencia controla la frecuencia de salida.

Si δ es el ancho de cada pulso, el valor rms de la tensión de salida se puede calcular a partir de

$$V_o = V_s \sqrt{\frac{p\delta}{\pi}}$$



Perfil de tensión en la modulación de varios anchos de pulso.

Tal como se observa en la figura anterior, la tensión de salida está compuesta por trenes de pulsos que alternativamente pasan de positivos a negativos y viceversa a la frecuencia de la señal moduladora.

Para implementar este tipo de control en nuestra tarjeta de control se realiza la comparación entre una señal triangular de alta frecuencia (portadora) y dos señales de referencia V_+ y V_- generadas a partir de la alimentación de $\pm 15V$ y cuyo valor se varía de forma simétrica mediante el potenciómetro P2. Los pulsos pasan de positivo a negativo gracias a interruptores analógicos que tienen como entrada una señal cuadrada procedente de un detector de cruce por cero que lleva como entrada una señal senoidal, la cual fija la frecuencia fundamental de salida.

- Calcular la señal de referencia y portadora **para obtener un índice de modulación en amplitud de 0.4**, una frecuencia de salida de aproximadamente 60 Hz determinada por la señal senoidal (**medir la frecuencia real del oscilador interno**) y un índice de modulación en frecuencia de 10 (número de pulsos por medio ciclo $p=5$). Tomar onda triangular de 5 Vpk. Indicar los voltios a aplicar en V_+ y V_- y la frecuencia de la onda triangular (f_c) y senoidal.

$$f_{\sin} = f_0 = \dots\dots\dots \quad f_c = \dots\dots\dots \quad V_+ = -V_- = \dots\dots\dots$$

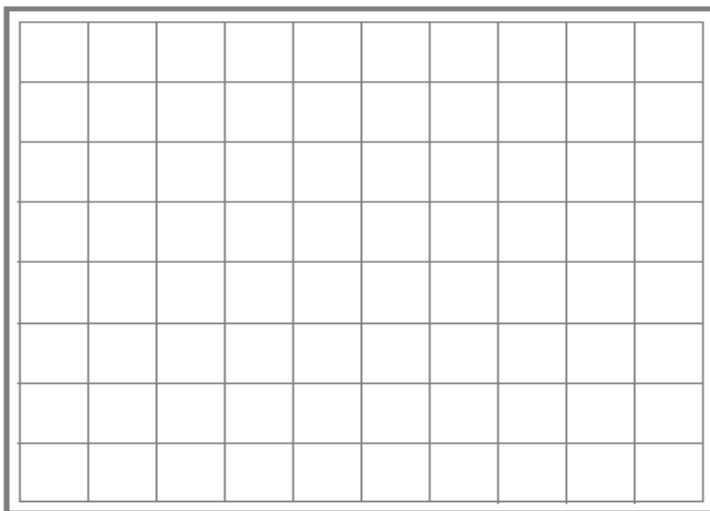
Obtener teóricamente la anchura de pulso para $m_a = 0.4$:

$$t_\delta = \frac{T_{tri}}{2} \left(1 - \frac{V_+}{V_{tri}}\right) = \dots\dots\dots$$

- Con la placa de potencia sin conectar, configurar los interruptores (jumpers) según se indica en la TABLA 1.

Introducir $\pm 15V$ en el conector J1 y la señal triangular de 5 Vpk en J2. **Ajustar con P1 la amplitud de la señal senoidal a 8 Vpk midiéndola en el puente de S3**. Comprobar si las señales en TP1, TP2 y TP5 son las que cabe esperar viendo el esquema eléctrico de la placa de control. Variar el potenciómetro P2 para conseguir los valores de V_+ y V_- calculados en el punto anterior medidos en los puentes de S1 y S2.

Dibujar en un mismo plot las señales en **TP3 y TP4**, ambas referidas a masa.

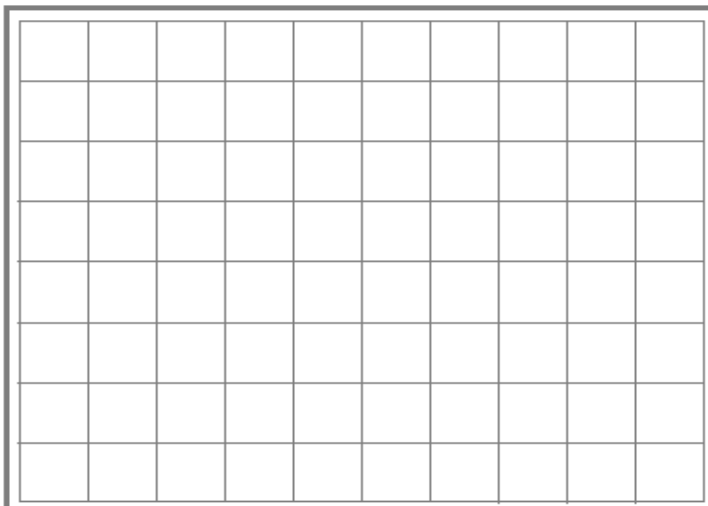


CH1 Volt/div _____

CH2 Volt/div _____

Time s/div _____

- Una vez verificado el correcto funcionamiento de la circuitería de control, añadir la placa de potencia. Seleccionar la misma alimentación de 15V empleada en la placa de control para alimentar la potencia (V_s) y obtener **la tensión en la carga** colocando una resistencia de 47.2Ω .



CH1 Volt/div _____

CH2 Volt/div _____

Time s/div _____

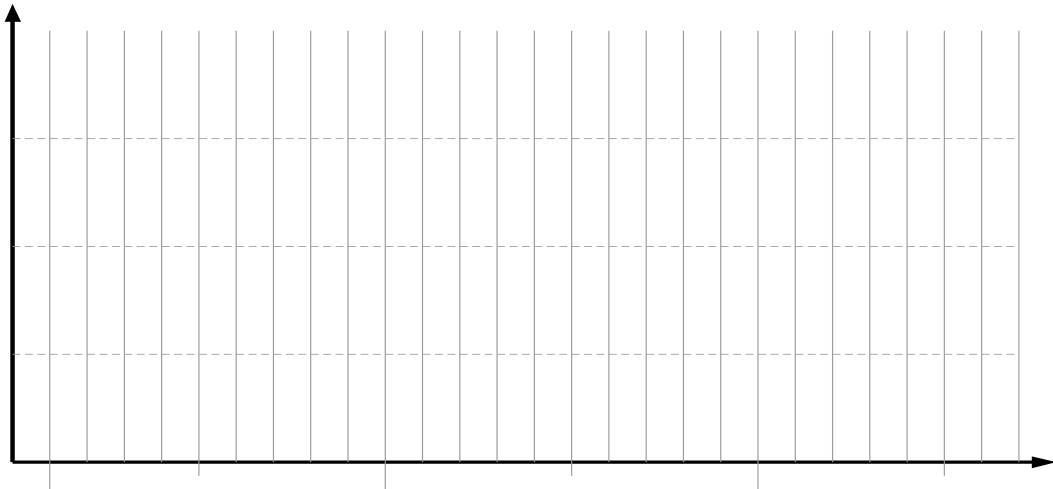
- Medir con el multímetro el valor eficaz de la tensión en la carga y comparar con el esperado teóricamente.

Para el cálculo teórico del valor eficaz de la tensión de salida se utilizará la expresión:

$$V_o(rms) = V_s \sqrt{\frac{p \cdot \delta}{\pi}}$$

	V _o (rms) (V)
TEÓRICO	
EXPERIMENTAL	

- Estudio de la calidad de la tensión a la salida: Haciendo uso del programa ARMONICOS se obtendrá la descomposición en armónicos de esta señal, **para m_a = 0.4, es decir, δ (°) = 10.8°**.
- Anotar el valor de la distorsión armónica total (THD) y dibujar el espectro de la señal en forma de gráfico de barras, para una f_{máx} = 1,25 kHz. (colocar la base de tiempos del osciloscopio a 50ms/div para realizar la adquisición e introducir el valor exacto de la frecuencia fundamental medida anteriormente).



- ¿Qué relación existe entre la frecuencia de la portadora y la frecuencia a la que aparece el armónico de más peso?

2.3 Modulación senoidal del ancho de pulso del tipo bipolar

Este tipo de moduladores viene a paliar la problemática que aparece en las técnicas de modulación anteriores sobre el hecho que la tensión en la carga es unipolar durante medio ciclo de la señal de salida, lo que complica el diseño del filtro de salida.

Para este tipo de control se realiza la comparación entre una señal triangular de alta frecuencia (portadora) y una señal senoidal a la frecuencia de salida (señal moduladora). A diferencia del caso anterior, los pulsos de salida son bipolares.

Para obtener una tensión de salida senoidal, deberemos variar la tensión $V_{control}$ de manera senoidal de forma que:

$$v_{control} = V_C \cdot \text{sen}(w_1 \cdot t)$$

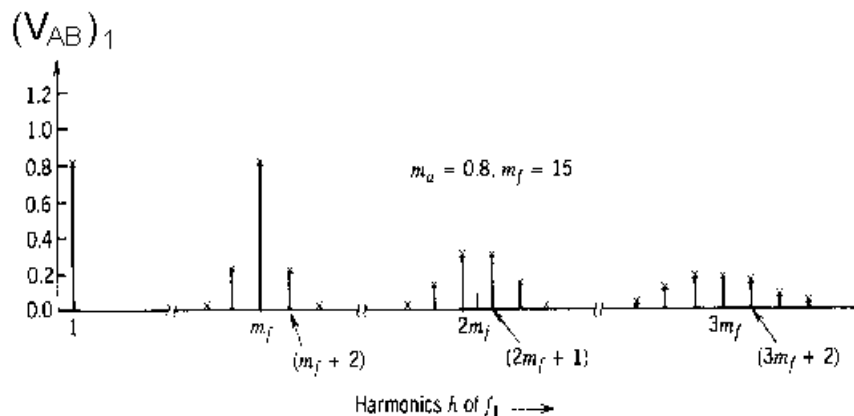
Con esta ley de control la componente fundamental de la tensión sobre la carga V_{AB} seguirá en fase a la tensión senoidal de control.

$$(V_{AB})_1 = \frac{V_C}{V_{peak-trig.}} \cdot \text{sen}(w_1 \cdot t) \cdot V_d = m_a \cdot \text{sen}(w_1 \cdot t) \cdot V_d \quad \text{para } m_a = \frac{V_C}{V_{peak-trig.}} \leq 1.0$$

La amplitud de la componente fundamental depende del índice de modulación y es proporcional a este para índices de modulación menores o iguales a la unidad. Cuando el índice de modulación es mayor que la unidad la amplitud del armónico fundamental no es proporcional al índice de modulación. En el caso límite, cuando el índice de modulación es muy elevado y la tensión de salida es una onda cuadrada con ciclo de trabajo 100% la amplitud del armónico fundamental vale $(4/\pi)V_d$. La siguiente tabla muestra en valor del armónico fundamental en función del índice de modulación.

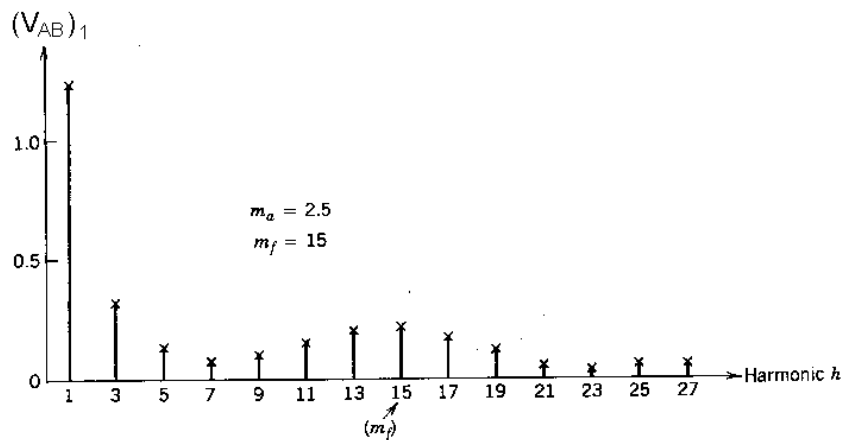
$$V_{peak-O1} = \begin{cases} m_a \cdot V_d & (m_a \leq 1.0) \\ V_d < V_{peak-O1} < \frac{4}{\pi} \cdot V_d & (m_a > 1.0) \end{cases}$$

De esta forma variando el índice de **modulación de amplitud**, m_a , para una tensión de alimentación constante se puede modificar la tensión a la salida del inversor. Sin embargo, dependiendo del índice de modulación, la distribución de los armónicos en la salida es distinta. Así para $m_a \leq 1$ los armónicos se sitúan a alta frecuencia alrededor de la frecuencia de conmutación y sus múltiplos. Esta circunstancia se muestra en la siguiente figura.

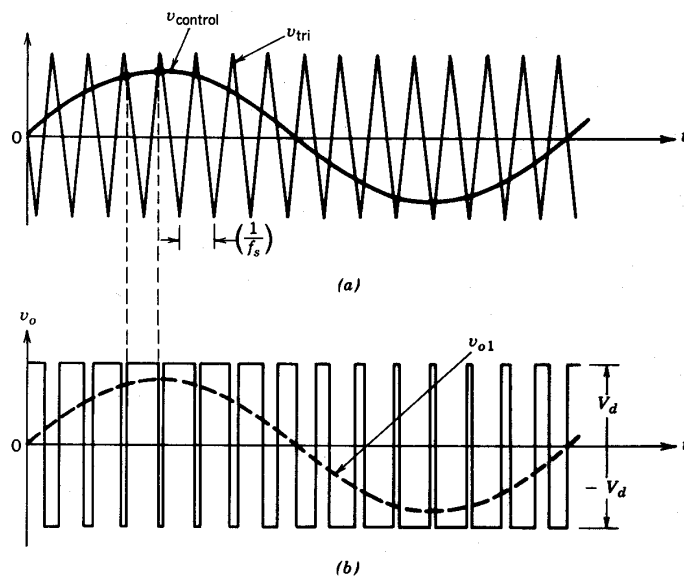


Espectro de salida para la modulación senoidal del ancho de pulso con flancos de conmutación coincidentes.

Si el índice de modulación de amplitud es mayor que la unidad, se produce un efecto conocido por el nombre de **sobremodulación**, que tiene por resultado un aumento en el contenido de armónicos de baja frecuencia que son los más difíciles de filtrar. De hecho para este caso, la amplitud de la componente de frecuencia fundamental no varía linealmente con m_a . La siguiente figura muestra el valor de las amplitudes de los armónicos para un índice de modulación $m_a = 2.5$.



Para índices de modulación menores de la unidad el índice de **modulación de frecuencia** $m_f = f_{conmutacion} / f_1$, define la frecuencia a la cual aparecen los armónicos de alta frecuencia. En cuanto a su selección, dado que es más fácil filtrar armónicos de alta frecuencia, cuanto mayor sea m_f más pequeño será el filtro necesario a la salida del inversor. Realmente el máximo valor de m_f está determinado por la máxima frecuencia de conmutación que permita unas pérdidas aceptables. La otra exigencia es diseñar un valor de m_f entero, múltiplo de f_1 , de manera que se eviten sub-armónicos, a este tipo de modulación se le denomina sincrona. Si m_f es impar, se puede demostrar como en la serie de Fourier de la tensión de salida aparecen únicamente armónicos de orden impar, apareciendo armónicos pares e impares, junto con un nivel de continua si m_f es par.



Perfil de tensión para una modulación senoidal del ancho de pulso con flancos de conmutación coincidentes

IMPORTANTE: Hay que tener en cuenta en todas las experiencias que siguen que la señal de control senoidal generada por la placa de circuito impreso con la que se está trabajando puede tener inestabilidad en el valor de la frecuencia. Así hay que comprobar su valor inmediatamente antes de realizar cualquier ajuste.

- Con la placa de potencia sin conectar, configurar los interruptores según se indica en la TABLA 1.

Introducir $\pm 15V$ en el conector J1 y tomar nota de la frecuencia de la señal senoidal de control medida en los puentes de S1 o S2.

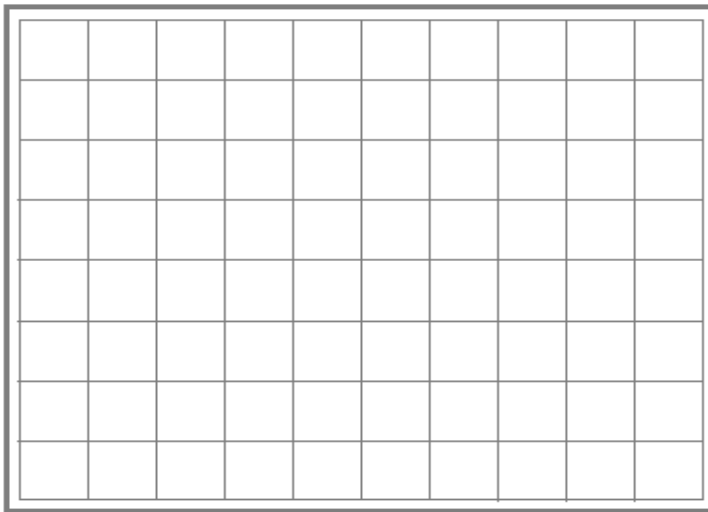
$f_{\text{sin}} = \dots\dots\dots$

- Tomando una onda triangular de 5 Vpk calcular la amplitud de la señal senoidal para obtener un índice de modulación en amplitud de 0.8 y la frecuencia de la señal triangular del generador para tener un índice de modulación en frecuencia de 15.

$f_{\text{tri}} = \dots\dots\dots$ **Amplitud de la moduladora (f_{sin}) =** $\dots\dots\dots$

Con $\pm 15\text{V}$ en el conector J1 y la señal triangular de 5 Vpk en J2, ajustar con P1 la amplitud de la señal moduladora senoidal. Comprobar si las señales en TP1, TP2 y TP5 son las que cabe esperar viendo el esquema eléctrico de la placa de control.

Dibujar en un mismo plot las señales en **TP3 y TP4**, ambas referidas a masa.

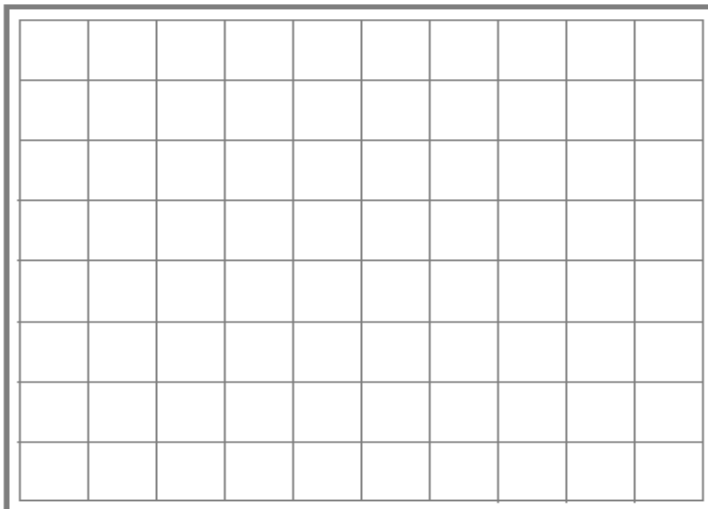


CH1 Volt/div _____

CH2 Volt/div _____

Time s/div _____

- Una vez verificado el correcto funcionamiento de la circuitería de control, añadir la placa de potencia. Seleccionar la misma alimentación de 15V empleada en la placa de control para alimentar la potencia (V_s) y obtener **la tensión en la carga** colocando una resistencia de 47.2Ω .



CH1 Volt/div _____

CH2 Volt/div _____

Time s/div _____

- Estudio de la calidad de la tensión a la salida: Haciendo uso del programa ARMONICOS se obtendrá la descomposición en armónicos de esta señal, para $m_a = 0.8$ y $m_f = 15$.

- Tomar la lectura de la amplitud de los armónicos indicados y dibujar el espectro de la señal en forma de gráfico de barras, para una $f_{\text{máx}} = 2,5 \text{ kHz}$. (colocar la base de tiempos del osciloscopio a 25ms/div para realizar la adquisición).

$$V_1 (m_a = 0.8) = \dots\dots\dots$$

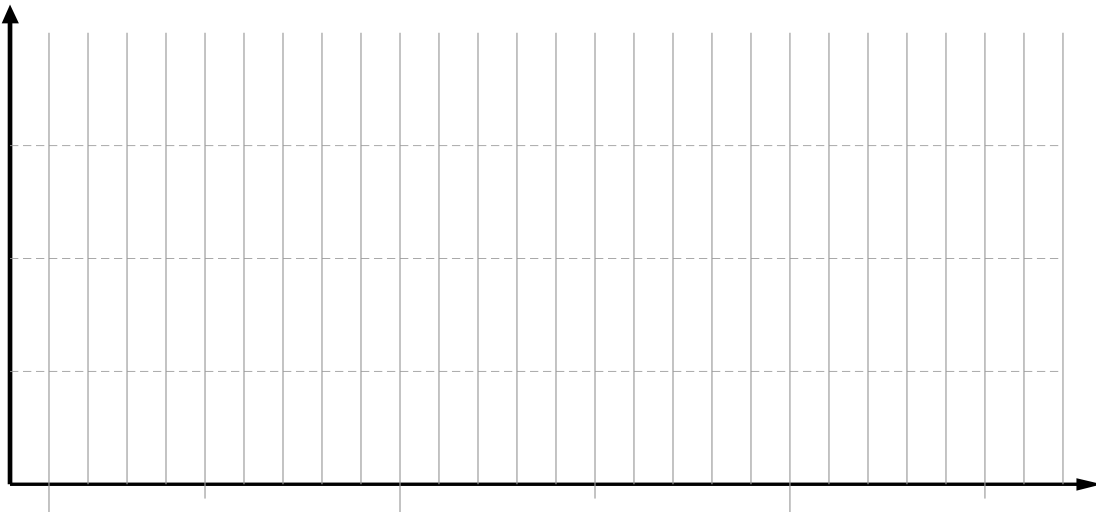
$$V_3 (m_a = 0.8) = \dots\dots\dots$$

$$V_5 (m_a = 0.8) = \dots\dots\dots$$

$$\text{THD} = \dots\dots\dots$$

La amplitud de cada armónico puede obtenerse directamente de una tabla que genera el programa "ARMONICOS". Para generar esta tabla hay que introducir el valor exacto de la frecuencia de la señal senoidal.

Dibuja sobre la gráfica siguiente las amplitudes de los distintos armónicos.



Comparar con la predicción teórica. ¿La amplitud de V_1 es la esperada? Justificarlo.

- Cambiar ahora el índice de modulación de amplitud tal que sea $m_a = 1$ y después $m_a = 2.5$. Tomar la lectura de la amplitud de los armónicos indicados.

$$V_1 (m_a = 1) = \dots\dots\dots$$

$$V_1 (m_a = 2.5) = \dots\dots\dots$$

$$V_3 (m_a = 1) = \dots\dots\dots$$

$$V_3 (m_a = 2.5) = \dots\dots\dots$$

$$V_5 (m_a = 1) = \dots\dots\dots$$

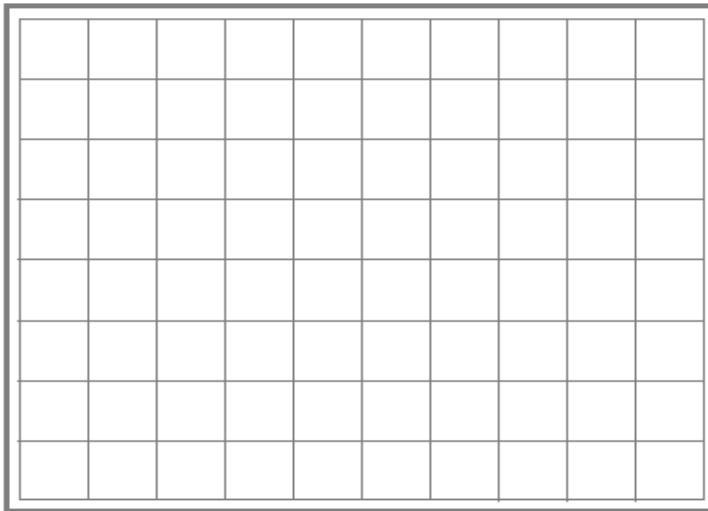
$$V_5 (m_a = 2.5) = \dots\dots\dots$$

$$\text{THD} = \dots\dots\dots$$

$$\text{THD} = \dots\dots\dots$$

¿Qué conclusión obtienes al comparar la amplitud de los armónicos de baja frecuencia para los distintos valores del índice de modulación entre los casos de $m_a < 1$ y $m_a \geq 1$?

- Para $m_a = 2.5$ observar el fenómeno de la sobremodulación. Dibujar la forma de onda:

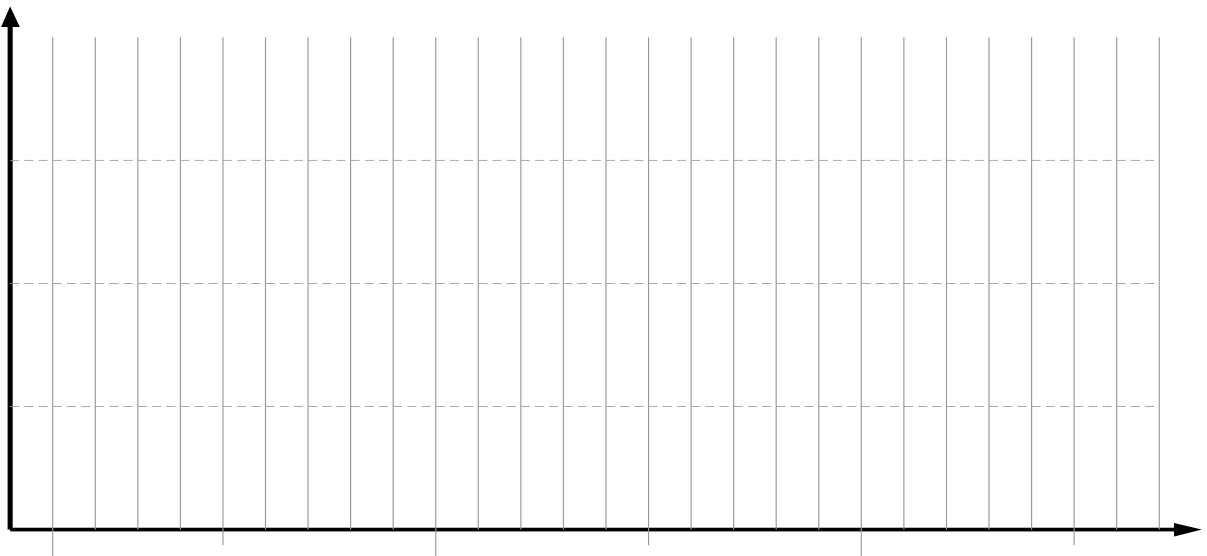


CH1 Volt/div _____

CH2 Volt/div _____

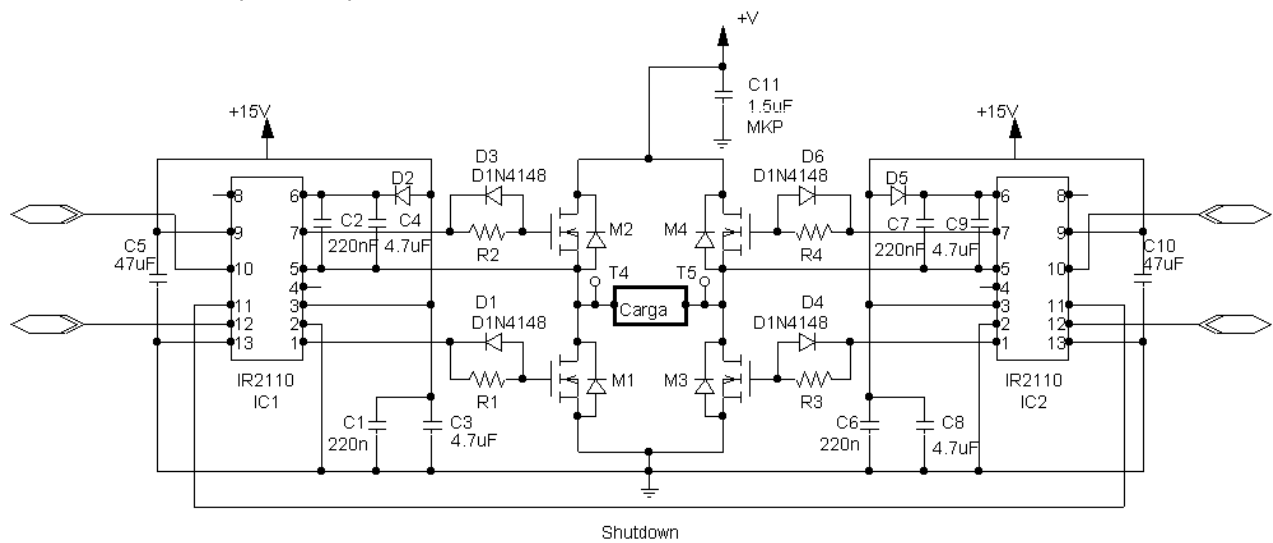
Time s/div _____

- Para el índice de modulación en amplitud del punto anterior determinar el contenido en armónicos y comparar con el obtenido para $m_a < 1$.



A la vista de los resultados obtenidos, realizar una comparación entre los 3 métodos de modulación PWM estudiados, atendiendo a su contenido en armónicos.

ANEXO I: Placa de Potencia
Plano eléctrico de la placa de potencia.



2.4 FILTRO PASIVO LC

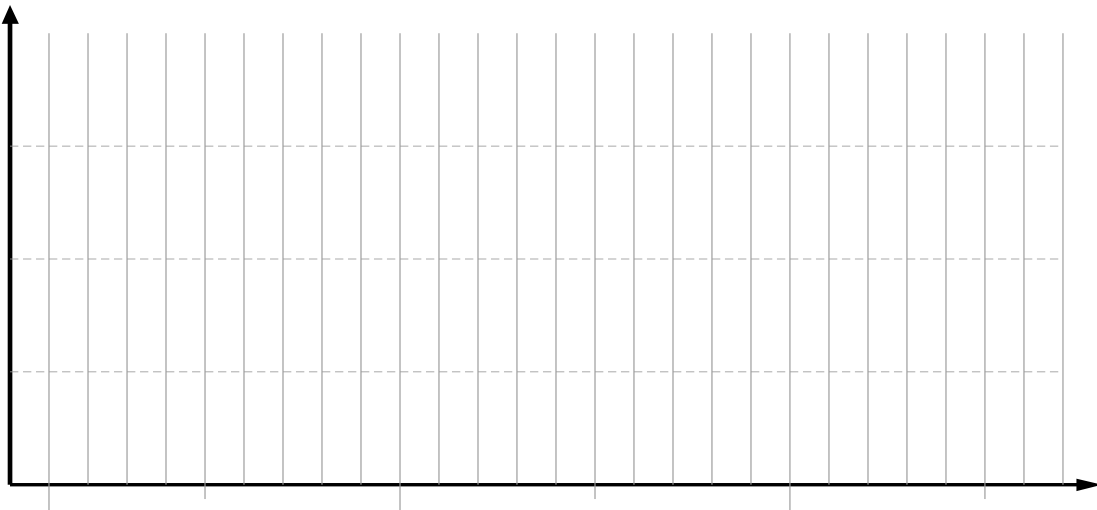
- Con los interruptores dispuestos para tener una modulación senoidal del ancho de pulso de **tipo bipolar** introducir $\pm 15V$ en el conector J1 de la placa de control y, con la placa de potencia desconectada, tomar nota de la frecuencia de la señal senoidal de control medida en los puentes de S1 o S2.

$$f_{\text{sin}} = \dots\dots\dots$$

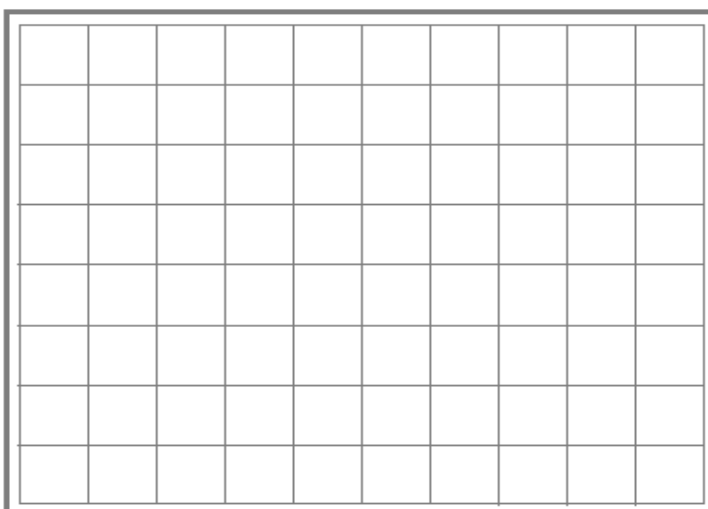
- Introducir por J2 una onda triangular de 5 Vpk y ajustar con P1 la amplitud de la señal moduladora senoidal a 4Vpk, es decir, $m_a = 0.8$. Ajustar la frecuencia de la señal triangular del generador para tener un índice de modulación en frecuencia de 34.

$$f_{\text{tri}} = 34 \cdot f_{\text{sin}} = \dots\dots\dots$$

- Una vez verificado el correcto funcionamiento de la circuitería de control, añadir la placa de potencia. Seleccionar la misma alimentación de 15V empleada en la placa de control para alimentar la potencia (V_s) y obtener **la tensión en la carga** colocando una resistencia de 47.2Ω .
- Estudio de la calidad de la tensión a la salida. La amplitud de cada armónico puede obtenerse directamente de una tabla que genera el programa "ARMONICOS". Para generar esta tabla hay que introducir el valor exacto de la frecuencia de la señal senoidal. Dibujar el espectro de la señal en forma de gráfico de barras, para una $f_{\text{máx}} = 2,5 \text{ kHz}$. (colocar la base de tiempos del osciloscopio a 25ms/div para realizar la adquisición)..

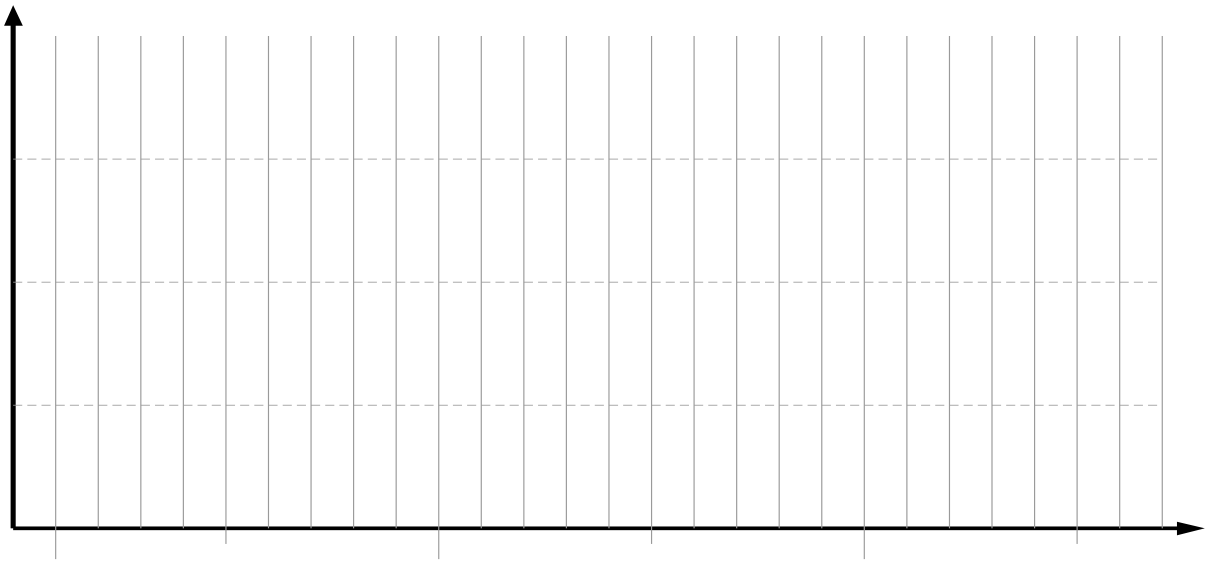


- Introducir un filtro de salida de salida con los siguientes valores $L = 3.3 \text{ mH}$ y $C = 4.7 \mu\text{F}$. Dibujar la forma de onda resultante entre extremos de la carga:



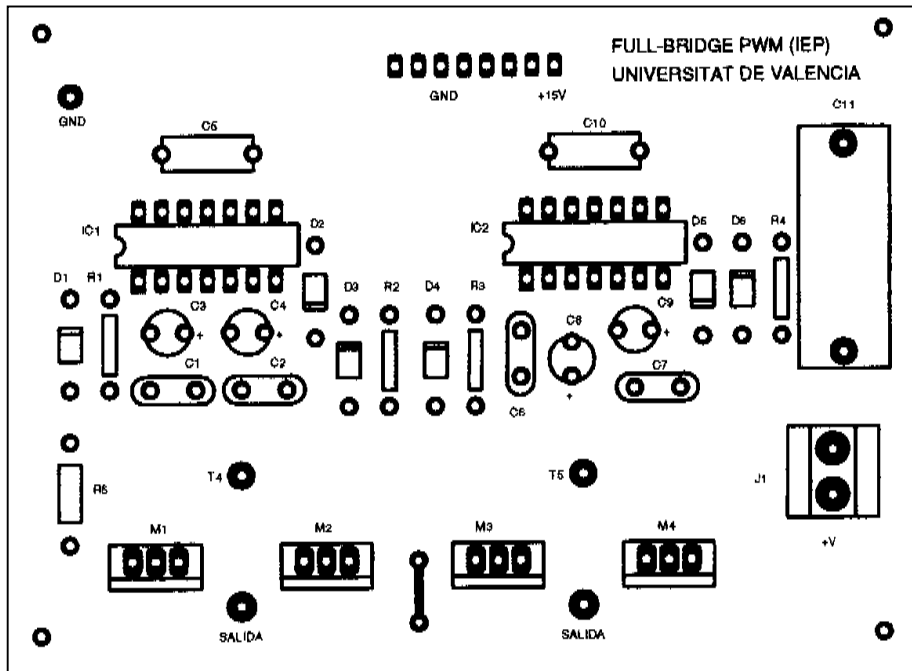
CH1 Volt/div _____
Time s/div _____

- Haciendo uso del programa ARMONICOS obtener ahora la descomposición en armónicos de esta señal.

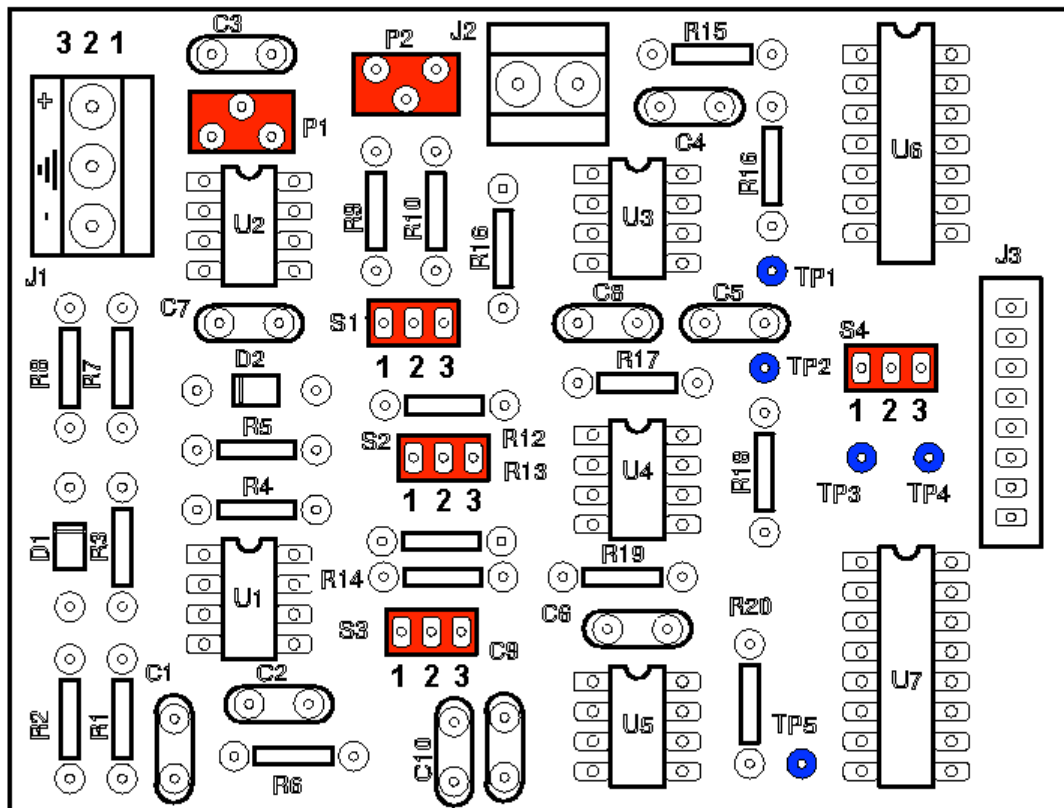


¿Qué conclusión obtienes al comparar las amplitudes del armónico fundamental y del de la frecuencia portadora con y sin filtro de salida?

Plano de implantación de la Placa de Potencia



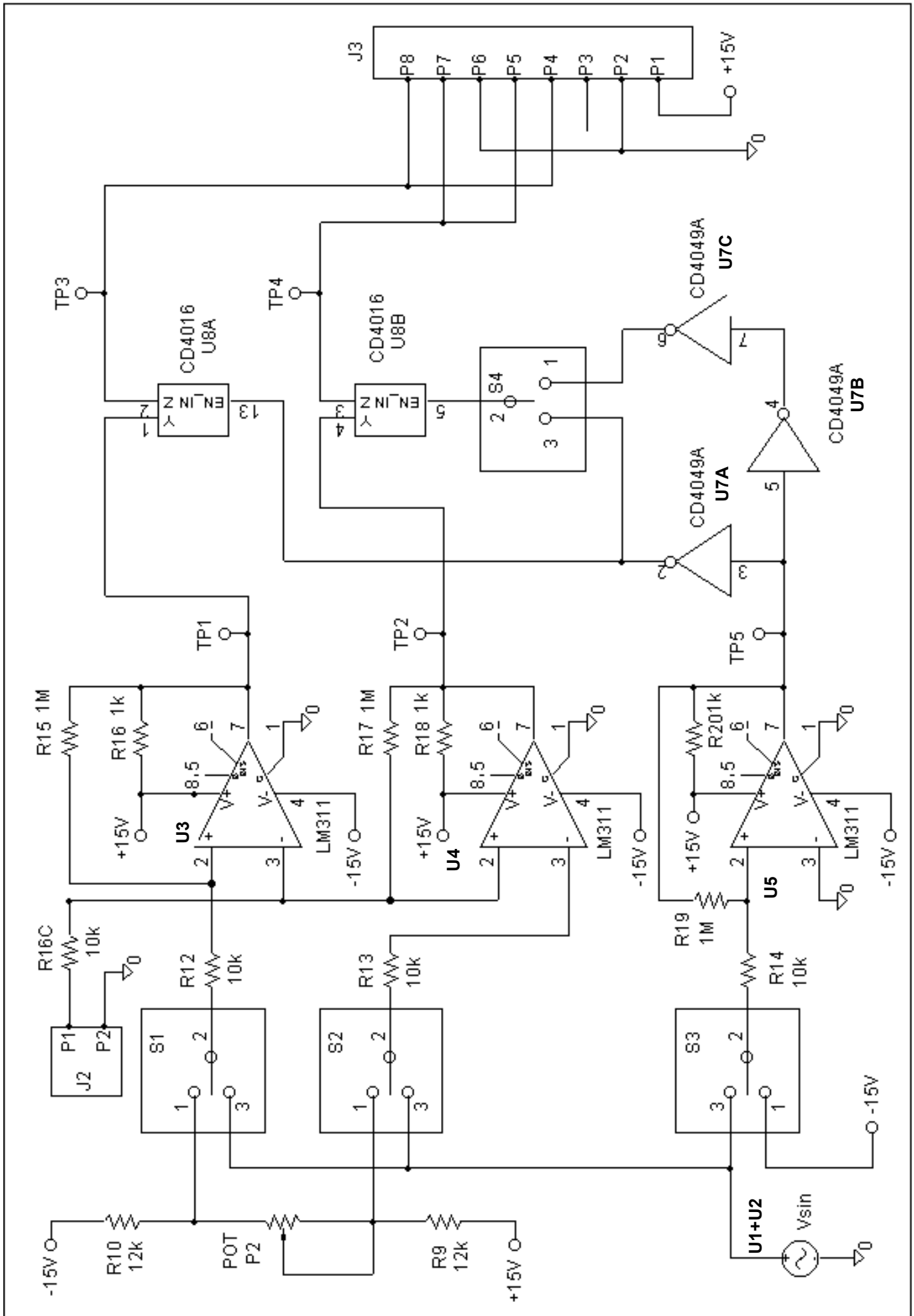
Plano de implantación de la Placa de Control

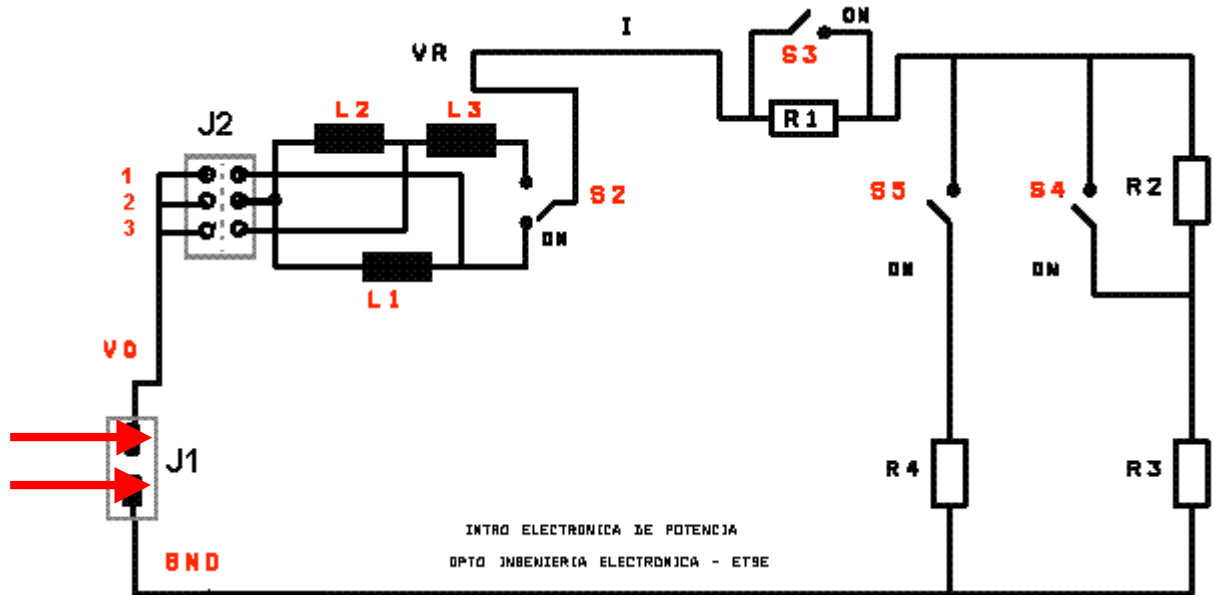


Para los interruptores S1, S2, S2, S4, se tomara el siguiente convenio:

- Posición 1 significa unir 1 con 2 mediante el puente.
- Posición 2 significa unir 2 con 3 mediante el puente.

Esquema funcional de la Placa de Control





CONECTOR J2:

Posición 1: carga R

S2	S3	S4	S5	CARGA
OFF				Circuito abierto
ON	ON	ON	ON	$R = 23.6 \Omega$
ON	ON	OFF	ON	$R = 31.3 \Omega$
ON	ON	ON	OFF	$R = 47.2 \Omega$
ON	ON	OFF	OFF	$R = 94 \Omega$
ON	OFF	ON	ON	$R = 1k\Omega$