



## Proyecto Fin de Carrera

Aplicación didáctica para el estudio de topologías y técnicas de control clásicas dedicadas a la conversión DC-AC en electrónica de potencia

Autor

Diego Salas Forns

Director

D. Francisco José Pérez Cebolla

MEMORIA  
(1/2)

Escuela de Ingeniería y Arquitectura  
Septiembre 2014



# RESUMEN

Con este proyecto se pretende dotar a los estudiantes noveles en electrónica de potencia de una herramienta didáctica, la cual les ayude a comprender el comportamiento de las topologías y de las técnicas de control clásicas empleadas en la conversión de continua a alterna (DC-AC).

Inicialmente se realiza un estudio y análisis de las topologías y las técnicas de control más comúnmente estudiadas en los primeros cursos de ingeniería. Una vez hecho este estudio se procede a la selección de los circuitos inversores y las técnicas de control que se van a estudiar a lo largo del proyecto.

A continuación se simulan estos sistemas (topología inversora y etapa de control) mediante dos programas informáticos ampliamente empleados por los estudiantes de grados de ingeniería relacionados directa o indirectamente con el control de sistemas y la electrónica de potencia. Estos programas son *MATLAB*, junto con el entorno gráfico para la simulación de sistemas *Simulink*, y *PSpice*.

Posteriormente se diseña una interfaz gráfica de usuario para gestionar esas simulaciones. Esta interfaz debe: a) ser creada en *MATLAB* usando el código de programación *GUI*; b) resultar para el usuario sencilla e intuitiva de utilizar; c) permitir actuar sobre los parámetros de control y entrada del convertidor; d) incluir un osciloscopio virtual donde se representen las tensiones y corrientes más significativas de la topología bajo estudio; e) disponer de documentos de ayuda donde se describa el comportamiento teórico de cada topología en función de la técnica de control aplicada.

También se crea un archivo con formato Excel donde se incluyen algunos cálculos adicionales complementarios de cada tipo de etapa inversora.

Por último, y como objeto final del proyecto, se genera un archivo con formato PDF donde se agrupan todos los archivos de simulación y de documentación del proyecto a los que se accede mediante enlaces directos que se encuentran en dicho archivo.



# AGRADECIMIENTOS

*En primer lugar deseo expresar mi gratitud a los directores de este proyecto, D. Francisco José Pérez Cebolla y D. Badacsonyi Ferenc, tanto por su interés y recomendaciones como por el trato recibido y el tiempo dedicado.*

*Igualmente quiero agradecer a la EINA por estos años de formación y a la Obuda University de Budapest (Hungria) por poder realizar gran parte de este proyecto aprovechando mi estancia ERASMUS en dicha universidad.*

*A mis padres, Fabián y María José, por mostrarme en todo momento y de manera incondicional su apoyo y confianza.*

*A mis amigos y compañeros, especialmente a los que he conocido a lo largo de estos años de estudiante universitario. También me gustaría mencionar y agradecer a los profesores y personal de diferentes áreas de la universidad.*

*En general, a todos los que han puesto su granito de arena.*

*A todos ellos, gracias.*



# ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	OBJETO .....	1
1.2	ALCANCE.....	1
1.3	ANTECEDENTES Y CONTEXTO.....	2
1.4	CONTENIDO.....	3
1.5	ESTADO DE LA CIENCIA .....	3
2	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS CIRCUITOS INVERSORES: CONCEPTOS GENERALES .....	4
2.1	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN CIRCUITO INVERSOR SIMPLE.....	4
2.2	CONCEPTOS TEÓRICOS IMPORTANTES.....	6
2.3	ANÁLISIS DE LAS SERIES DE FOURIER .....	7
2.4	DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL.....	8
3	TOPOLOGÍAS Y TÉCNICAS DE CONTROL.....	8
3.1	TOPOLOGÍAS: CIRCUITOS INVERSORES.....	8
3.1.1	CIRCUITOS INVERSORES DE MEDIA ONDA.....	9
3.1.2	CIRCUITOS INVERSORES DE ONDA COMPLETA .....	10
3.1.3	CIRCUITOS INVERSORES TRIFÁSICOS.....	10
3.1.4	CIRCUITOS INVERSORES PUSH-PULL .....	11
3.1.5	CIRCUITOS INVERSORES EN CASCADA .....	11
3.1.6	CIRCUITOS INVERSORES NEUTRAL-POINT-CLAMPED (NPC) .....	13
3.1.7	CIRCUITOS INVERSORES FLYING-CAPACITOR (FC).....	15
3.2	TÉCNICAS DE CONTROL: CONCEPTOS GENERALES .....	16
3.2.1	CONTROL DE ONDA CUADRADA .....	16
3.2.2	CONTROL PWM .....	17
3.2.2.1	CONTROL PWM BIPOLAR .....	19
3.2.2.2	CONTROL PWM UNIPOLAR .....	20

3.2.3	CONTROL CON CANCELACIÓN PROGRAMADA DE ARMÓNICOS .....	21
3.2.4	CONTROL POR HISTERESIS .....	22
3.2.5	CONTROLES PARTICULARES .....	22
3.3	ELECCIÓN DE LOS CIRCUITOS INVERSORES A ESTUDIAR EN ESTE PROYECTO .....	25
4	HERRAMIENTA DIDÁCTICA: APLICACIÓN GRAFICA PARA EL ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE LOS INVERSORES .....	26
4.1	SIMULACIÓN DE LOS CIRCUITOS INVERSORES.....	26
4.1.1	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA HERRAMIENTA SIMULINK DE MATLAB..	27
4.1.2	SIMULACIÓN MEDIANTE LA HERRAMIENTA SIMULINK MATLAB .....	27
4.1.3	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA PSpice.....	29
4.1.4	SIMULACIÓN MEDIANTE PSpice.....	30
4.2	INTERFAZ GRAFICA CREADA CON LA HERRAMIENTA GUIDE DEL PROGRAMA DE SIMULACION MATLAB.....	32
4.3	ARCHIVO “IS_Tables.xls” .....	39
4.4	ARCHIVO “INVERTER SIMULATIONS APPLICATION.pdf” .....	40
4.5	RESUMEN DEL FUNCIONAMIENTO GENERAL DE LA HERRAMIENTA DIDÁCTICA .....	44
5	CONCLUSIONES .....	45
5.1	LINEAS FUTURAS .....	45
6	BIBLIOGRAFÍA.....	47

## ANEXOS

**ANEXO I:** WORKING PRINCIPLE OF INVERTER CIRCUITS. STUDY OF CLASSICAL TOPOLOGIES AND CONTROL TECHNIQUES DEDICATED TO DC-AC TRANSFORMATION IN POWER ELECTRONIC.

**ANEXO II:** DESCRIPTION OF THE COMPUTER PROGRAM *MATLAB* AND SIMULATION OF INVERTER CIRCUITS WITH *SIMULINK MATLAB*.

**ANEXO III:** DESCRIPTION OF THE *PSpice* COMPUTER PROGRAM AND SIMULATION OF INVERTERS WITH *PSpice*.

**ANEXO IV:** DESCRIPTION OF THE *GUIDE MATLAB* COMPUTER PROGRAM.

**ANEXO V:** PROGRAMMING CODE *GUIDE MATLAB* TO CREATE THE INTERFACE.

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Control Cascade Full-Bridge (2 niveles) .....	23
Tabla 2 Control Cascade Full-Bridge (4 niveles) .....	23
Tabla 3 Control NPC .....	23
Tabla 4 Control NPC (5 niveles) .....	23
Tabla 5 Control NPC trifásico .....	24
Tabla 6 Control FC (5 niveles) .....	24
Tabla 7 Control FC trifásico (3 niveles) .....	25
Tabla 8 Selección de circuitos inversores.....	26



# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Circuito inversor monofásico de media onda .....	5
Figura 2 Técnica de control de onda cuadrada .....	5
Figura 3 Circuito inversor monofásico de media onda .....	9
Figura 4 Circuito inversor monofásico asimétrico de media onda .....	9
Figura 5 Circuito inversor monofásico de onda completa .....	10
Figura 6 Circuito inversor trifásico con carga en estrella .....	10
Figura 7 Circuito inversor trifásico con carga en triangulo .....	11
Figura 8 Circuito inversor monofásico Push-Pull .....	11
Figura 9 Circuito inversor monofásico Cascade Full-Bridge (2 niveles) .....	12
Figura 10 Circuito inversor monofásico Cascade Full-Bridge (4 niveles) .....	12
Figura 11 Circuito inversor trifásico Cascade Full-Bridge (3 niveles) .....	13
Figura 12 Circuito inversor monofásico NPC.....	13
Figura 13 Circuito inversor monofásico NPC (5 niveles) .....	14
Figura 14 Circuito inversor trifásico NPC.....	14
Figura 15 Circuito inversor monofásico FC (5 niveles) .....	15
Figura 16 Circuito inversor trifásico FC .....	16
Figura 17 Control de onda cuadrada.....	17
Figura 18 Control PWM Bipolar .....	19
Figura 19 Circuito inversor monofásico de onda completa .....	20
Figura 20 Control PWM Unipolar .....	20
Figura 21 Control con cancelación programada de armónicos.....	21
Figura 22 Control por histéresis .....	22
Figura 23 Señal de tensión y activación de interruptores en circuito NPC (5 niveles).....	24
Figura 24 Señal de tensión y activación de interruptores en circuito NPC trifásico .....	24
Figura 25 Esquema <i>Simulink</i> del circuito inversor monofásico de media onda.....	28

Figura 26 Subsistema del esquema <i>Simulink</i> del circuito inversor monofásico de media onda	29
Figura 27 Formas de onda a la salida del inversor monofásico de media onda en <i>Simulink</i> .....	29
Figura 28 Esquema <i>PSpice</i> del circuito inversor monofásico de media onda .....	31
Figura 29 Formas de onda a la salida del inversor monofásico de media onda en <i>PSpice</i> .....	32
Figura 30 Interfaz gráfica <i>GUIDE MATLAB</i> 1.....	33
Figura 31 Interfaz gráfica <i>GUIDE MATLAB</i> 2.....	34
Figura 32 Interfaz gráfica <i>GUIDE MATLAB</i> 3.....	35
Figura 33 Interfaz gráfica <i>GUIDE MATLAB</i> 4.....	35
Figura 34 Interfaz gráfica <i>GUIDE MATLAB</i> 5.....	36
Figura 35 Interfaz gráfica <i>GUIDE MATLAB</i> 6.....	36
Figura 36 Interfaz gráfica <i>GUIDE MATLAB</i> 7.....	37
Figura 37 Interfaz gráfica <i>GUIDE MATLAB</i> 8.....	38
Figura 38 Interfaz gráfica <i>GUIDE MATLAB</i> 9.....	38
Figura 39 Interfaz gráfica <i>GUIDE MATLAB</i> 10.....	39
Figura 40 Interfaz gráfica <i>GUIDE MATLAB</i> 11.....	39
Figura 42 Archivo “ <i>INVERTER SIMULATIONS APPLICATION</i> ” Página 1.....	41
Figura 43 Archivo “ <i>INVERTER SIMULATIONS APPLICATION</i> ” Página 2.....	42
Figura 44 Archivo “ <i>INVERTER SIMULATIONS APPLICATION</i> ” Página 3.....	43
Figura 45 Botones de “ <i>INVERTER SIMULATIONS APPLICATION</i> ” .....	43

## 1 INTRODUCCIÓN

*“Aplicación didáctica para el estudio de topologías y técnicas de control clásicas dedicadas a la conversión DC-AC en electrónica de potencia”* es un proyecto realizado por D. Diego Salas Forns con la tutorización de D. Francisco José Pérez Cebolla por parte de la Universidad de Zaragoza, y por D. Badacsonyi Ferenc por parte de la Universidad de Obuda (Obuda University) de Budapest, Hungría.

Con el cumplimiento de la normativa para la realización del Proyecto Final de Carrera de Ingeniería Industrial, se ha redactado la memoria en lengua castellana, mientras que los anexos han sido redactados en lengua inglesa.

Este proyecto pertenece a la mención “Sistemas Eléctricos” de Ingeniería Industrial (Plan Antiguo).

### 1.1 OBJETO

El objeto del proyecto consiste en la realización de una herramienta didáctica, dirigida principalmente a los estudiantes de ingeniería, donde se puedan simular los circuitos inversores y las técnicas de control más comunes con dos de los programas generalmente más usados en las escuelas de ingeniería.

Este proyecto surge como una herramienta de ayuda complementaria para los estudiantes donde puedan estudiar estos tipos de circuitos inversores y las diferentes técnicas de control de una forma fácil, visual e intuitiva.

### 1.2 ALCANCE

Para la realización de esta aplicación didáctica, primero se van a realizar la simulación de 23 circuitos inversores tanto en el programa de simulación *PSpice* como con la herramienta *Simulink* del programa *MATLAB*. Más adelante se desarrolla el procedimiento de selección de los circuitos inversores así como de las técnicas de control.

También se va a crear una interfaz gráfica donde se puedan simular todos los circuitos y cambiar parámetros de simulación que uno deseé.

Primero se realiza análisis de los dos programas utilizados desarrollando las características más destacables de cada uno.

Una vez se tiene la lista de los circuitos con las técnicas de control se procede a la creación de las simulaciones con los programas citados anteriormente. Estos circuitos se han simulado esquemáticamente de acuerdo a lo que se estudia en las primeras asignaturas de ingeniería relacionadas con esta temática, y son simuladas suponiendo condiciones ideales de

los circuitos básicos. Partiendo de una entrada de tensión continua y proporcionando una señal alterna en tensión y corriente en la salida.

Después se realiza la interfaz gráfica de usuario para los estudiantes. Se realiza con el lenguaje de programación de *MATLAB*, usando la herramienta *GUIDE* para la escritura del código. Con esta herramienta, se puede llamar a las simulaciones realizadas con *Simulink* para obtener las gráficas y parámetros necesarios pudiendo modificar desde la propia interfaz los valores de entrada, control y carga del circuito. En la propia interfaz se facilitan botones de ayuda donde aparece el desarrollo teórico de cada inversor, así como una breve explicación de las gráficas de la salida en la carga y el control del circuito explicando a qué pertenece cada forma de onda.

Como complemento se realiza una tabla Excel con algunos cálculos adicionales, los cuales no todos aparecen en los datos obtenidos por la interfaz gráfica, de los análisis de Fourier de las señales de corriente y tensión con sus valores eficaces, así como el cálculo de la potencia activa en función de los armónicos.

Por último, a modo de resumen y para finalizar la herramienta didáctica, se ha generado un documento en formato PDF con una extensión corta (3 carillas) donde, de una manera visual e intuitiva, hay enlaces directos tanto para poder abrir cualquiera de las simulaciones en ambos programas, así como para poder abrir la tabla Excel con los cálculos adicionales, y los pasos a seguir para poder ejecutar la interfaz gráfica que se encuentra dentro del programa *MATLAB*. También hay enlaces para acceder a las ayudas teóricas específicas para cada tipo de circuito inversor y su control.

Aunque inicialmente se planteó la implementación física de un circuito inversor en un laboratorio como un objetivo del proyecto se ha decidido no acometerlo, dado que la extensión de la parte de simulación por medio de un computador es lo suficientemente amplia como para abarcar un proyecto de estas características. Para ello se desarrollaría una plataforma que incluyera una tarjeta con un procesador digital de señal (DSP) de bajo coste que se comunique con el ordenador. Así, las señales de control que se han generado en *PSpice* o en *Simulink* se trasladarían al DSP que actuaría directamente sobre los circuitos de excitación de los transistores de potencia.

### 1.3 ANTECEDENTES Y CONTEXTO

En búsqueda de realizar el proyecto de una manera más enriquecedora, principalmente refiriéndose al tema de idioma y a la forma de realizar el Proyecto Final de Carrera en otras ciudades de Europa, se pudo hacer durante la estancia ERASMUS en Budapest (Hungría).

El proyecto se ha realizado con la supervisión de dos tutores, uno por parte de la Universidad de Zaragoza y el otro por parte de la Universidad de Budapest (Obuda University). Primero me puse en contacto con el tutor de mi estancia ERASMUS, D. Francisco José Pérez Cebolla, del departamento de Ingeniería electrónica y Comunicaciones de la Universidad de

Zaragoza. Se acordó que también él sería mi tutor del Proyecto Final de Carrera por parte de la Universidad de Zaragoza.

Por parte de la Universidad de Obuda (Obuda University) de Budapest, me puse en contacto con el jefe de departamento de Ingeniería Eléctrica, D. Peter Kadar, el cual me asignó a un profesor para que se convirtiera en el tutor del proyecto desde la Universidad de Obuda, D. Badacsonyi Ferenc.

En cuanto a la decisión de realizar este proyecto se fraguó en las reuniones mantenidas con D. Francisco José Pérez Cebolla. Surgió la idea de realizar una herramienta didáctica, en la que se aunaran los conocimientos y experiencias, por parte de D. Francisco José Pérez Cebolla como profesor, y de D. Diego Salas Forns como alumno reciente de dichas asignaturas. La herramienta didáctica está dirigida principalmente a los alumnos para poder facilitarles, de algún modo, el estudio y la comprensión de estos tipos circuitos inversores de electrónica de potencia. Las principales características de esta aplicación se fijaron para proporcionar un factor diferenciador en relación al análisis de otras aplicaciones similares ya existentes.

#### 1.4 CONTENIDO

En las siguientes secciones, primero se va a proceder a la explicación, en forma de conceptos generales, del principio de funcionamiento de los circuitos inversores. Se analizan brevemente los aspectos teóricos más importantes que rodean a un circuito inversor.

Posteriormente se hace un desarrollo y análisis teórico tanto de las topologías como de las técnicas de control clásicas de los circuitos inversores, que son los que se van a usar a lo largo de este proyecto.

Seguidamente se procede a la elección detallada de todos los circuitos analizados y simulados en este proyecto con sus respectivas técnicas de control.

Más adelante se explica y desarrolla el objeto de este proyecto, que es la herramienta didáctica para la simulación de circuitos inversores. Este punto abarca el desarrollo de las simulaciones en *PSpice* y *Simulink*, pasando por la interfaz gráfica creada con *GUIDE MATLAB*, como la creación de un archivo con formato Excel donde se encuentran cálculos complementarios para el estudio teórico completo, acabando por último con la creación de un archivo PDF de corta extensión donde se resume todo de forma visual e intuitiva.

Por último se expondrán las conclusiones a las que este proyecto lleva, proponiendo nuevos proyectos como ampliación o complemento a este.

#### 1.5 ESTADO DE LA CIENCIA

Como se ha comentado anteriormente, algunas de las características principales de la herramienta didáctica desarrollada en este proyecto han surgido como factor diferenciador y complementario a otras herramientas didácticas similares creadas con anterioridad, como por

ejemplo el “Seminario interactivo de electrónica de potencia (iPES)” del profesor Kolar del ETH de Zurich [1].

Esta aplicación citada se centra principalmente en convertidores AC-DC (rectificadores) y convertidores DC-DC. Esta aplicación citada, parte con la ventaja de poder usarse mediante una página web, y se puede proporcionar mediante un solo link, sin necesidad de tener instalado en la computadora ningún software para su uso.

Pero como factor diferenciador de las ventajas que posee la herramienta creada en este proyecto se tiene:

- Se apoya detrás de unos potentes programas informáticos con las herramientas y opciones necesarias para un completo análisis teórico del circuito, como *PSpice* o *MATLAB*.
- Se pueden modificar todos los parámetros de entrada y de control y observar tanto gráficamente como en forma de parámetros numéricos todos los datos de salidas posibles así como opciones de ayudas teóricas complementarias para el usuario.
- Al tratarse de una aplicación didáctica creada con dos de los programas más comúnmente usados en ingeniería para analizar este tipo de circuitos convertidores, se proporciona al usuario una fácil familiarización con estos.

## 2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE LOS CIRCUITOS INVERSORES: CONCEPTOS GENERALES

Para empezar con el estudio de los diferentes tipos de circuitos convertidores alimentados mediante fuentes de corriente continua (DC) se va a realizar el estudio del circuito inversor más sencillo: Puente inversor monofásico de media onda con control de onda cuadrada. Este ejemplo nos va a servir de base para una comprensión adecuada de todos los métodos de control que se estudiarán después.

### 2.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE UN CIRCUITO INVERSOR SIMPLE

En la figura 1 se puede observar este circuito inversor. Se debe saber que en este tipo de inversor hay dos interruptores semiconductores de potencia ideales, y la dirección del flujo de corriente se señala mediante la flecha dibujada. La existencia de dos condensadores provoca que la tensión se divida en la entrada en 2 partes iguales [2].

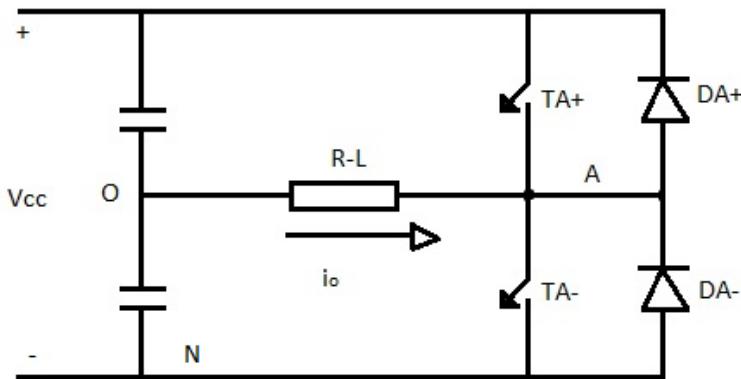


Figura 1 Circuito inversor monofásico de media onda

Si:  $T_{A+}$  está ON, durante  $T/2$  ( $180^\circ$ )  $\rightarrow V_{A0} = \frac{Vcc}{2}$

$T_{A-}$  está ON, durante el otro  $T/2$  ( $180^\circ$ )  $\rightarrow V_{A0} = -\frac{Vcc}{2}$

En la figura 2 se muestra las formas de onda de las tensiones en los transistores ideales, así como también la tensión de salida en la carga:

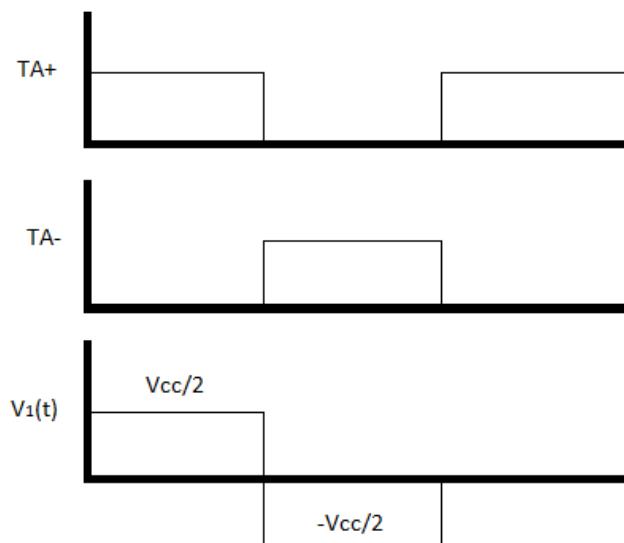


Figura 2 Técnica de control de onda cuadrada

$T_{A+}$  y  $T_{A-}$  no tienen que trabajar al mismo tiempo, con el fin de no provocar ningún cortocircuito. Por esta razón, es necesario aplicar un “tiempo muerto” o también llamado “blanking-time” entre la conexión del primer interruptor ideal y la conexión del segundo.

Dependiendo del tipo de carga que se encuentre a la salida:

- Si la carga es solo resistiva, por los diodos posicionados en anti-paralelo con los interruptores nunca circulan corriente, ya que cuando la tensión aplicada a la carga es positiva, la corriente es positiva y cuando la tensión es negativa, la corriente es negativa. Por lo tanto siempre se encuentran en fase.

- Si la carga es óhmico-inductiva, los diodos posicionados en anti-paralelo con los interruptores conducen porque la tensión y la intensidad están en fuera de fase la una con la otra.
- El semiconductor (interruptor) tiene que resistir una tensión inversa igual a la tensión de entrada  $V_{CC}$ .

## 2.2 CONCEPTOS TEORICOS IMPORTANTES

Los siguientes conceptos son suficientemente conocidos pero se van a recordar las ecuaciones correspondientes a cada uno de ellos [3-4]:

- Tensión eficaz (RMS) entre A y O:

$$V_{AO} = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \frac{V_{CC}^2}{4} dt} = \frac{V_{CC}}{2} \quad (2.1)$$

Siendo  $V_{CC}$  la tensión de entrada y  $T$  el periodo.

- Amplitud de la componente fundamental:

$$(\hat{V}_{AO})_1 = \frac{4}{\pi} \frac{V_{CC}}{2} = 1,273 \left( \frac{V_{CC}}{2} \right) \quad (2.2)$$

- Amplitud de los armónicos:

$$(\hat{V}_{AO})_h = \frac{(\hat{V}_{AO})_1}{h} \quad (2.3)$$

Siendo  $h$  el número de armónico, con  $h=1, 3, 5...$

- $V_{AO}$  se puede expresar como series de Fourier:

$$V_{AO} = \sum_{h=1,3,5,...}^{\infty} \frac{4}{h \cdot \pi} \frac{V_{CC}}{2} \sin(h \cdot \omega \cdot t) \quad (2.4)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia  $\omega = 2\pi f$ .

Cuando la carga está formada por una resistencia y una inductancia en serie, el tiempo de conducción de los interruptores varía desde  $90^\circ$  hasta  $180^\circ$ , siendo fijado este valor por los ángulos de fase de la carga.

La circulación de la intensidad a través de la carga, formada por una resistencia y una inductancia, puede ser obtenida desde la siguiente expresión:

$$i_o = \sum_{h=1,3,5,...}^{\infty} \frac{4}{h \cdot \pi} \frac{V_{CC}}{2} \frac{1}{\sqrt{R^2 + (f \cdot \omega \cdot L)^2}} \sin(h \cdot \omega \cdot L - \vartheta_h) \quad (2.5)$$

Donde  $L$  es la inductancia,  $R$  es la resistencia y:

$$\vartheta_h = \arctg \left( \frac{(h \cdot \omega \cdot L)}{R} \right) \quad (2.6)$$

Si se denota  $I_{01}$  al valor eficaz de la componente fundamental de la corriente que circula por la carga, la potencia consumida, debido a que esa componente ( $h=1$ ), puede ser calculada como:

$$P_{01} = V_{01} \cdot I_{01} \cdot \cos(\vartheta_1) = I_{01}^2 \cdot R = \left[ \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{4}{h \cdot \pi} \frac{V_{CC}}{2} \frac{1}{\sqrt{R^2 \cdot (h \cdot \omega \cdot L)^2}} \right]^2 \cdot R \quad (2.7)$$

### 2.3 ANÁLISIS DE LAS SERIES DE FOURIER

Para analizar la corriente que circula por la carga y calcular la potencia absorbida por ella, se usa la descomposición frecuencial de las series de Fourier [2-4].

Es conveniente expresar la tensión y la corriente que atraviesa la carga en términos de series de Fourier. Si no hay componente continua (DC) en la salida, entonces se tiene:

$$V_O(t) = \sum_{h=1}^{\infty} V_h \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot t + \phi_h) \quad (2.8)$$

Y

$$I_O(t) = \sum_{h=1}^{\infty} I_h \cdot \sin(h \cdot \omega \cdot t + \phi_h) \quad (2.9)$$

La potencia absorbida por la carga con una resistencia en serie se calcula como  $I_{rms}^2 \cdot R$ , donde la corriente eficaz (RMS) puede ser determinada desde la correspondiente corriente eficaz (RMS) dada por cada componente de las series de Fourier:

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2, rms} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} \left( \frac{I_h}{\sqrt{2}} \right)^2} \quad (2.10)$$

Con:

$$I_h = \frac{V_h}{Z_h} \quad (2.11)$$

Y  $Z_h$  es la impedancia de la carga para el armónico  $n$ .

De manera parecida, puede ser determinada la potencia absorbida en la resistencia de carga para cada frecuencia en las series de Fourier. La potencia total se determina mediante:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_n = R \cdot \sum_{n=1}^{\infty} I_{h,rms}^2 \quad (2.12)$$

Y:  $I_{h,rms}$  es  $I_h / \sqrt{2}$ .

En caso de una onda cuadrada, las series de Fourier contienen los armónicos impares, y pueden ser calculados como:

$$V_0(t) = \sum_{h, \text{impares}}^{\infty} \frac{4V_{CC}}{h\pi} (\sin(h\omega t)) \quad (2.13)$$

## 2.4 DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL

Generalmente, para todos los circuitos inversores es muy importante conocer y controlar la calidad de señales de salidas alternas de la tensión y de la corriente [3-4].

La calidad de una onda no sinusoidal puede ser expresada en términos del factor DAT o THD (Tasa de Distorsión Armónica). Asumiendo que no hay componente continua (DC) en la salida, se tiene:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (V_{h,rms})^2}}{V_{1,rms}} = \frac{\sqrt{V_{rms}^2 - V_{1,rms}^2}}{V_{1,rms}} \quad (2.14)$$

El THD de la corriente se calcula de la misma manera que el de la tensión sustituyendo las tensiones por las intensidades en la formula (2.14).

El THD de la corriente en la carga es de mayor interés que el de la tensión a la salida. Como se puede observar, es necesario utilizar el análisis de las series de Fourier para el cálculo del factor THD.

## 3 TOPOLOGÍAS Y TÉCNICAS DE CONTROL

Atendiendo al fin didáctico que se ha marcado en la introducción de este proyecto, y siendo consciente de que los alumnos de los primeros cursos de ingeniería serían los principales usuarios de esta herramienta, se han seleccionado las topologías y técnicas de control más comúnmente estudiadas, empezando por las más sencillas e incrementando cada vez más su dificultad, tanto de montaje como de técnicas de control. [2-4].

### 3.1 TOPOLOGÍAS: CIRCUITOS INVERSORES

Primero se va a estructurar los diferentes tipos de topologías de los circuitos inversores. Principalmente se diferencian por la disposición de los interruptores en los esquemas.

Esta disposición de los interruptores es una característica determinante ya que según como estén dispuestos, junto a las técnicas de control y la tensión aplicadas en la entrada, son lo que caracterizan la salida resultante en la carga.

A continuación se van a citar y explicar brevemente los circuitos inversores utilizados en el desarrollo de este proyecto, mostrando un esquema de cada uno de ellos. En el ANEXO I se encuentra un estudio más extenso, donde además del esquema, se hace un desarrollo matemático de las características más importantes, de las técnicas de control usadas y se muestran gráficas en las salidas (suponiendo una carga R-L).

### 3.1.1 CIRCUITOS INVERSORES DE MEDIA ONDA

Como caso de circuito inversor monofásico más sencillo, se encuentran los circuitos inversores de media onda. En la figura 3 se puede observar el esquema del circuito. Solo se dispone de dos interruptores que son activados respectivamente uno cada medio ciclo.  $V_{CC}$  es la tensión continua de entrada y se supone una carga R-L.

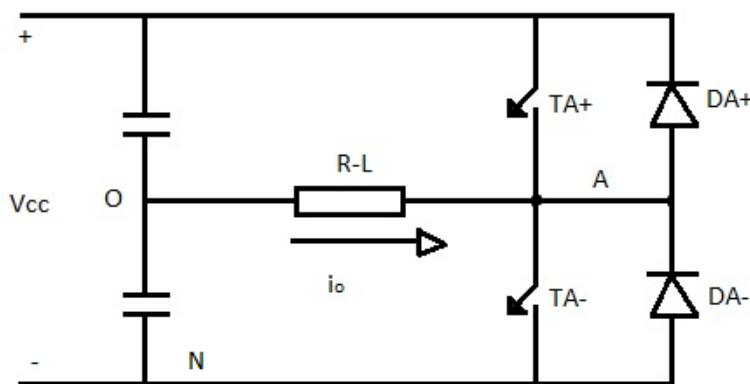


Figura 3 Circuito inversor monofásico de media onda

También se encuentran los circuitos inversores asimétricos de media onda que, como se puede observar en la figura 4, la única diferencia radica en la disposición de la carga, que en lugar de colocarse entre el punto medio de los interruptores y el punto medio de los condensadores de entrada, se dispone entre los bornes de uno de los interruptores.

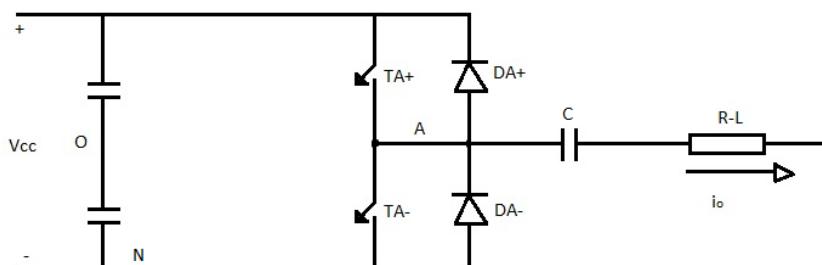


Figura 4 Circuito inversor monofásico asimétrico de media onda

### 3.1.2 CIRCUITOS INVERSORES DE ONDA COMPLETA

En la figura 5 se dibuja el esquema de los circuitos inversores monofásicos de onda completa. El circuito consta de 4 interruptores dispuestos en dos ramas paralelas, dos en cada uno de ellas. El principio de funcionamiento consiste en activar los interruptores dos a dos cada medio ciclo, siendo activados, por ejemplo, la primera mitad del ciclo los interruptores A+ y B- y en la segunda mitad del ciclo A- y B+. La carga está situada entre medio de los dos puntos intermedios de cada una de las dos ramas de interruptores.

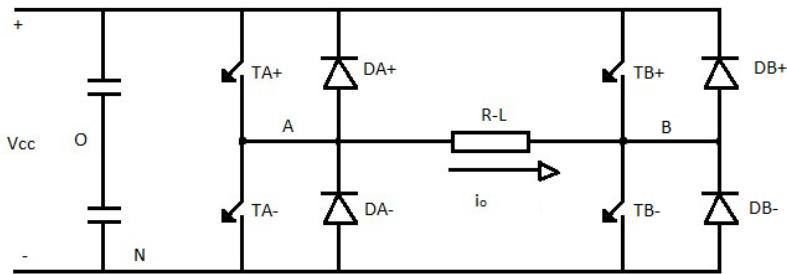


Figura 5 Circuito inversor monofásico de onda completa

Esta alternancia de activación de los interruptores es la misma para todas las técnicas de control excepto para los casos de cancelación de armónicos y PWM unipolar (donde las ramas se controlan de manera independiente), los cuales se explican en puntos posteriores de este proyecto: Tanto en el ANEXO I de una manera más detallada como en el punto 3.2 de la memoria.

### 3.1.3 CIRCUITOS INVERSORES TRIFÁSICOS

Siguiendo el principio de funcionamiento del circuito inversor anterior se encuentran los inversores trifásicos, que consisten en extraer el circuito monofásico en otro con tres fases, las cuales están desfasadas  $120^\circ$  cada una de ellas respectivamente [5].

En la figura 6 se puede observar el esquema de los interruptores. Hay tres ramas de 2 interruptores en cada una. Cada uno de los dos interruptores de una rama se activa cada medio ciclo, como en el caso de los circuitos inversores monofásicos de media onda. Y las otras dos ramas tienen el mismo sistema de activación pero desfasadas  $120^\circ$  cada una de ellas respectivamente. En la figura 6 la carga del inversor se encuentra conectada en estrella, mientras que en la figura 7 se encuentra en triángulo [5].

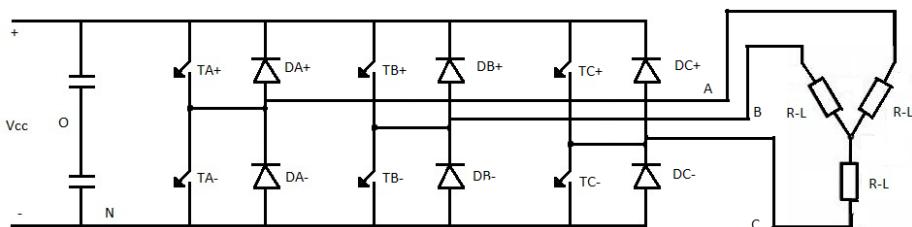


Figura 6 Circuito inversor trifásico con carga en estrella

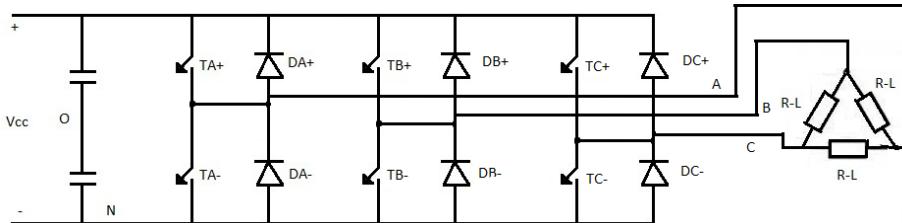


Figura 7 Circuito inversor trifásico con carga en triángulo

### 3.1.4 CIRCUITOS INVERSORES PUSH-PULL

Los inversores Push-Pull están formados por dos interruptores y una bobina monofásica formada por dos devanados del mismo número de espiras en el primario y un devanado en el secundario. En la figura 8 se observa el esquema del circuito [4]. La ventaja de este inversor radica en que solo se utilizan dos interruptores y ambos están conectados directamente a tierra, por lo que facilita su control. Aunque este tipo de inversores se usan para aplicaciones de baja potencia.

La función principal de la bobina consiste en proporcionar aislamiento entre la tensión de entrada y la tensión de salida. Además posee una inductancia magnetizante propia del transformador que como tal no es un parámetro de diseño.

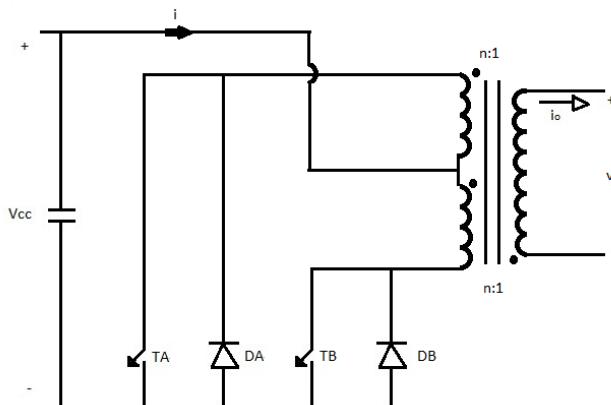


Figura 8 Circuito inversor monofásico Push-Pull

### 3.1.5 CIRCUITOS INVERSORES EN CASCADA

Los circuitos inversores en cascada consisten en la unión de circuitos monofásicos con fuentes de continua separadas de 4 interruptores, dos por rama. Se unen por los puntos medios de una de las ramas. El número de circuitos monofásicos que se unen depende de los niveles de tensión que se quieran obtener a la salida. A mayor número de niveles, mayor precisión sinusoidal tendrá la forma de onda de la corriente en la salida pero también mayor complejidad del circuito y mayor coste [3].

También se puede disponer los circuitos de tal forma que se forme un circuito inversor trifásico, como se expone a continuación.

Para obtener el circuito inversor monofásico *Cascade Full-Bridge* de 2 niveles se unen dos circuitos monofásicos tal y como se muestra en la figura 9.

Con esta disposición, a la salida en la carga se obtienen dos niveles en la onda de tensión.

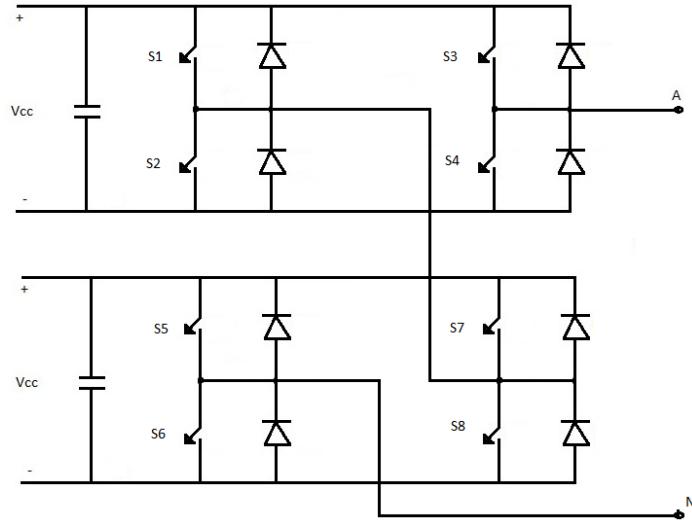


Figura 9 Circuito inversor monofásico *Cascade Full-Bridge* (2 niveles)

Mientras que para obtener el circuito inversor monofásico *Cascade Full-Bridge* de 4 niveles se tienen que unir 4 circuitos monofásicos, como se puede observar en la figura 10.

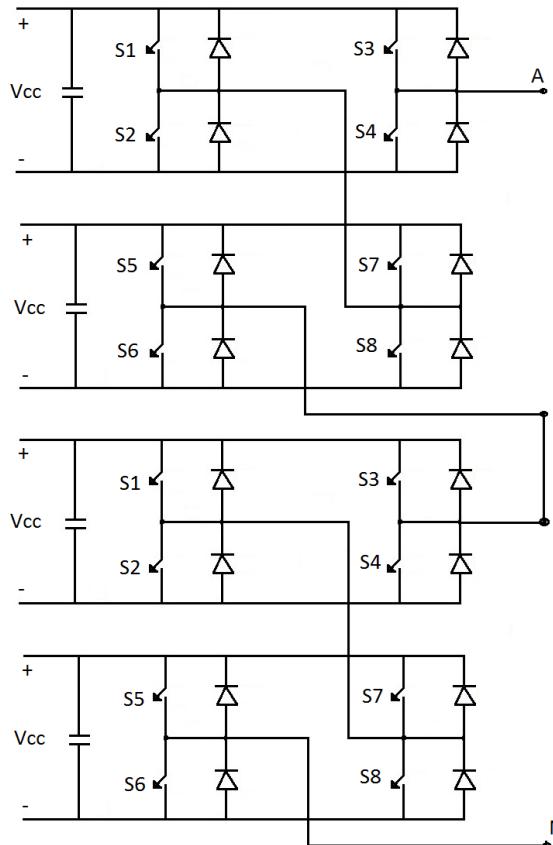


Figura 10 Circuito inversor monofásico *Cascade Full-Bridge* (4 niveles)

Por último, para el circuito inversor trifásico *Cascade Full-Bridge* de 3 niveles, solo hace falta la implementación de tres circuitos, pero se consigue obtener una carga trifásica a la salida, tal y como se observa en la figura 11.

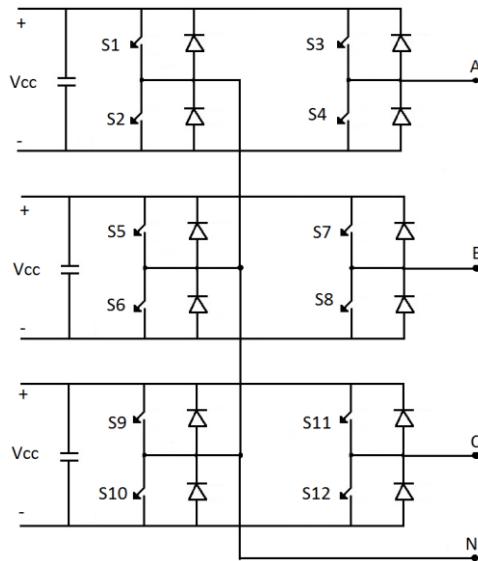


Figura 11 Circuito inversor trifásico *Cascade Full-Bridge* (3 niveles)

### 3.1.6 CIRCUITOS INVERSORES NEUTRAL-POINT-CLAMPED (NPC)

El factor diferenciador de los circuitos inversores NPC a nivel esquemático radica en los diodos que se implementan en ellos. Estos diodos fijan las tensiones de bloqueo de los interruptores a una fracción de la tensión de bus de continua de entrada [3].

A continuación se van a comentar los 3 circuitos inversores NPC que se han estudiado en este proyecto.

Para montar el circuito inversor monofásico NPC se disponen de los interruptores y de las fuentes de tensión tal y como se ve en la figura 12 y en el punto *O* se unen dos diodos para fijar las tensiones de bloqueo de los interruptores, en este caso en  $V_{CC}/2$ .

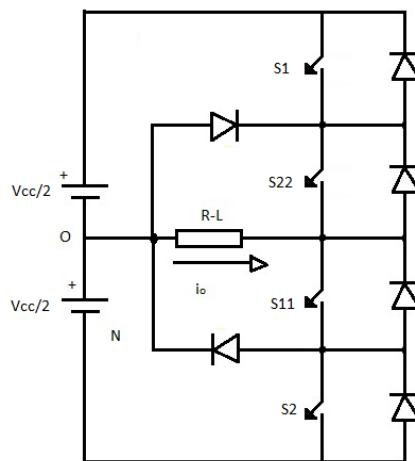
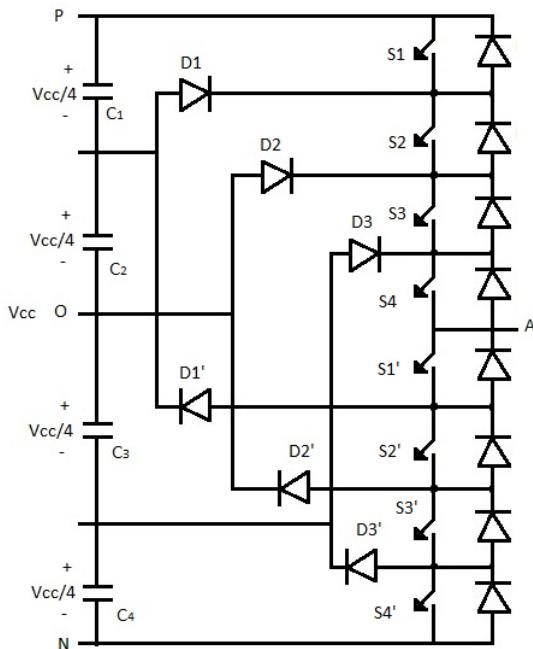


Figura 12 Circuito inversor monofásico NPC

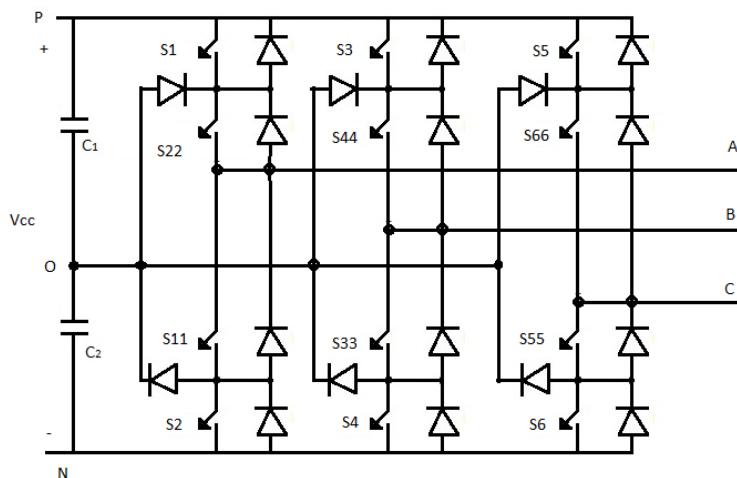
Mientras que para formar el mismo circuito inversor pero de 5 niveles de tensión a la salida en la carga, se amplia la complejidad del circuito, teniendo que añadir más diodos a diferentes puntos del circuito.

Con la disposición de los diodos, interruptores y fuentes de tensión que se detallan en la figura 13, se fijan la tensión de bloqueo de los interruptores a  $V_{CC}/4$  en este caso.



**Figura 13 Circuito inversor monofásico NPC (5 niveles)**

Y el ultimo de los circuitos inversores NPC se trata del trifasico, donde a la salida o entrada de cada interruptor se instala un diodo. El esquema de este circuito se encuentra en la figura 14, y se fija una tensión de bloqueo de cada interruptor en  $V_{cc}/2$ .



**Figura 14 Circuito inversor trifásico NPC**

### 3.1.7 CIRCUITOS INVERSORES FLYING-CAPACITOR (FC)

Así como en factor diferenciador de los circuitos inversores NPC eran los diodos, el factor diferenciador de los circuitos de capacidades flotantes (FC) son los condensadores [3].

La función de estos condensadores consiste en fijar la tensión de bloqueo de los interruptores a la tensión de los condensadores. Para cada circuito que se comenta a continuación, la tensión de bloqueo será diferente y dependerá de la disposición de los mismos y de las fuentes de tensión continua de entrada.

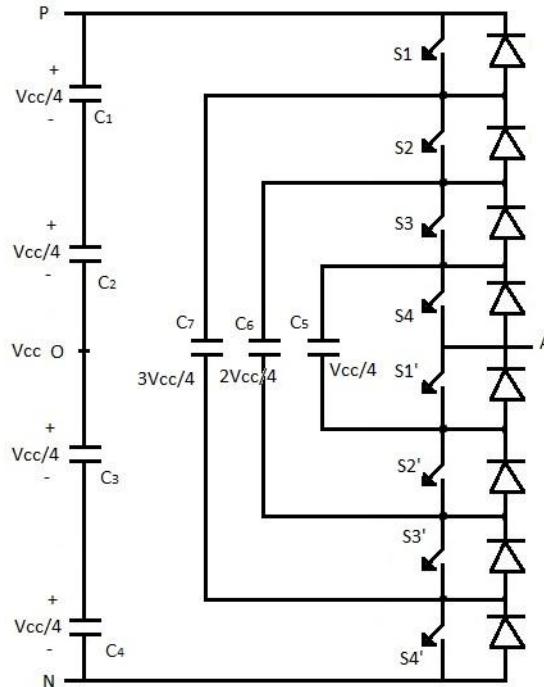
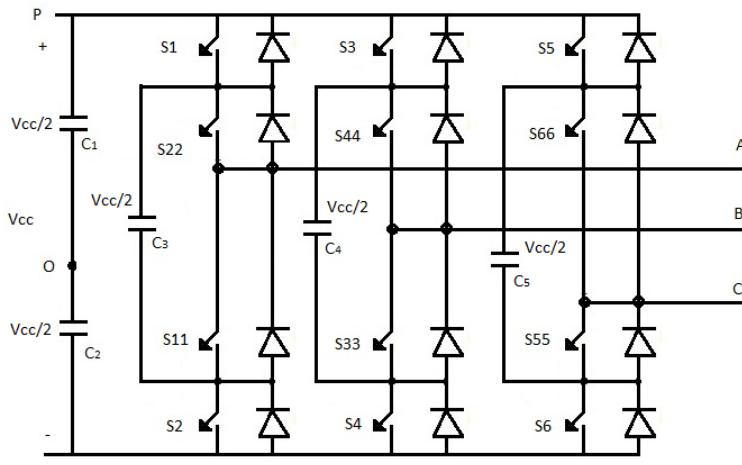


Figura 15 Circuito inversor monofásico FC (5 niveles)

En la figura 15 se muestra el circuito inversor monofásico FC de 5 niveles. La función de los condensadores es como la del circuito de anclaje, prever de forma natural el voltaje de los interruptores, por tanto las señales de control se pueden intercambiar de fase para evitar problemas.

Cuando los capacitores están cargados a una tensión  $V_{cc}/4$  se consigue un funcionamiento normal del convertidor, teniendo en cuenta que el condensador  $C_7$  esta compuesto por 3 condensadores iguales y el capacitor  $C_6$  esta compuesto por 2.

Y para obtener el esquema del circuito inversor trifásico NPC se puede observar en la figura 16 como se unen todos los elementos para obtener un esquema trifásico. En este caso la tensión de bloqueo de cada interruptor es también  $V_{cc}/2$ .



**Figura 16 Circuito inversor trifásico FC**

### 3.2 TÉCNICAS DE CONTROL: CONCEPTOS GENERALES

Una vez ya definidos las topologías de los convertidores DC-AC más comunes, se va a desarrollar brevemente las diferentes técnicas de control aplicadas a lo largo de este proyecto, y se especificará qué técnica de control se aplica a cada tipo de topología.

Principalmente se van a usar dos técnicas de control:

- Control de onda cuadrada
  - Control PWM

Pero hay que destacar varios casos particulares, ya que en algunos circuitos se aplican diferentes tipos de control PWM (bipolar y unipolar). Hay otros dos tipos de controles particulares, como son el control por histéresis y la cancelación programada de armónicos [2], [6].

Por último, todos los circuitos inversores *Cascade Full-Bridge*, circuitos inversores *NPC* y circuitos inversores *FC* tienen controles específicos independientes.

### 3.2.1 CONTROL DE ONDA CUADRADA

A este tipo de control ya se ha hecho una referencia en el punto 2.1 de esta memoria cuando se explicaba el principio de funcionamiento de un circuito inversor simple.

Se va a tomar ese mismo ejemplo para una explicación más detallada. Al ser un convertidor que solo posee dos interruptores, se pretende conseguir que en la mitad de un periodo, marcado por una frecuencia  $f$ , este activado por ejemplo el interruptor 1, y el interruptor 2 este desactivado, mientras que en la segunda mitad del periodo ocurra el caso inverso. Hay varios métodos para conseguir este fenómeno, algunos de las cuales se han aplicado en las posteriores simulaciones por *Simulink MATLAB* y en *PSpice*.

Por lo tanto, siendo  $V_{CC}$  la tensión de entrada, se consigue que a la salida en la carga, en la primera mitad del periodo se obtenga una tensión de  $+V_{CC}/2$  y en la segunda mitad  $-V_{CC}/2$ , como se observa en la figura 2. Suponiendo una carga  $R-L$ , la forma de onda de la corriente será como aparece en la figura 17, aunque dependerá del peso que tenga tanto la resistencia como la parte inductiva.

Los módulos semiconductores de potencia suelen incluir diodos de realimentación junto a los interruptores. En la figura 17 se muestran las corrientes de transistor (interruptor) y diodo para una tensión con forma de onda cuadrada y una carga  $R-L$  [2].

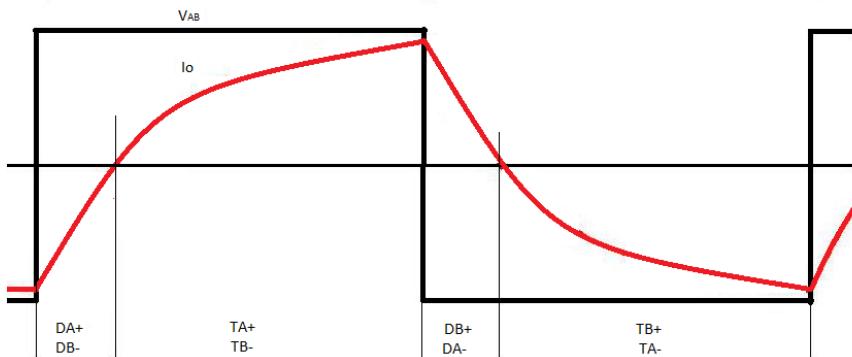


Figura 17 Control de onda cuadrada

Cuando los transistores  $T_{A+}$  y  $T_{B-}$  son apagados, la corriente de la carga debe ser mantenida y se transferirá a los diodos  $D_{A-}$  y  $D_{B+}$ , haciendo que la tensión de salida sea  $-V_{CC}$ , mientras que la corriente no esté a punto de anularse no conducirán los transistores  $T_{A-}$  y  $T_{B+}$ .

Con este control se puede modificar la frecuencia del circuito pero no la amplitud de los armónicos, lo que se consigue con el control PWM (sección 3.2.2).

En el ANEXO I de este proyecto se explica el funcionamiento de este tipo de control en los circuitos inversores en los que existen más de dos interruptores, aunque el principio de funcionamiento es el mismo.

### 3.2.2 CONTROL PWM

La modulación por PWM (anchura de impulsos, *Pulse Width Modulation*) posibilita disminuir el factor THD (tasa de distorsión armónica) de la corriente en la carga. Una salida de un inversor con control PWM, con algo de filtrado, en general cumple las especificaciones de THD con más facilidad que el esquema de comutación de onda cuadrada.

La salida PWM sin filtrar tendrá un factor THD relativamente elevado, pero los armónicos tendrán unas frecuencias mucho más altas que las de la onda cuadrada, haciendo más sencillo el filtrado [2].

En la modulación PWM, la amplitud de la tensión de salida se puede controlar por medio de las formas de onda moduladoras.

Algunas ventajas de la modulación PWM son:

- La reducción de los requerimientos de filtro para reducir los armónicos.
- El control de la amplitud de salida.

Y como desventajas se puede citar que:

- Los circuitos de control de los interruptores son más complejos.
- Hay unas mayores pérdidas debidas a una conmutación más frecuente.

Para el control de los interruptores para la salida sinusoidal PWM se requiere:

- Una señal de referencia, llamada a veces señal de control o moduladora, que en este caso es una sinusoide.
- Una señal portadora, que es una onda triangular que controla la frecuencia de conmutación.

Dentro de la conmutación PWM, existen dos tipos de conmutación (se explicaran posteriormente):

- Conmutación bipolar.
- Conmutación unipolar.

En el ANEXO I se desarrolla extensamente algunas consideraciones y definiciones que hay que conocer y tener en cuenta. Ahora simplemente se van a citar dos términos que son necesarios conocer para poder aplicar este tipo de control:

- Índice de modulación de la frecuencia  $m_f$ :

Se define  $m_f$  como la relación entre las frecuencias de las señales portadora y de referencia:

$$m_f = \frac{f_{portadora}}{f_{referencia}} = \frac{f_{tri}}{f_{seno}} \quad (3.1)$$

Si se aumenta la frecuencia de la portadora, se aumenta  $m_f$  y por lo tanto se aumentan las frecuencias a las que se producen los armónicos.

- Índice de modulación de la amplitud  $m_a$ :

Se define  $m_a$  como la relación entre las amplitudes de las señales de referencia y portadora [2], [6]:

$$m_a = \frac{V_{m, referencia}}{V_{m, portadora}} = \frac{V_{m, seno}}{V_{m, tri}} \quad (3.2)$$

La amplitud de la frecuencia fundamental de la tensión de salida  $V_1$  es linealmente proporcional a  $m_a$  si  $m_a \leq 1$ . Es decir,

$$V_1 = m_a \cdot V_{CC} \quad (3.3)$$

De esta manera,  $m_a$  controla la amplitud de la frecuencia fundamental de la salida PWM. En el caso de una fuente de tensión continua sin regular, con el valor de  $m_a$  se puede ajustar de tal forma que compense las variaciones en la tensión continua de la fuente, produciendo una salida de amplitud constante. También,  $m_a$  se puede variar para cambiar la amplitud de la salida. Si  $m_a$  es mayor que uno, la amplitud de la salida aumenta al incrementarse el valor de  $m_a$ , aunque no lo hace de forma lineal.

### 3.2.2.1 CONTROL PWM BIPOLAR

Refiriéndonos al mismo ejemplo del circuito inversor monofásico de media onda para explicar el funcionamiento de la modulación PWM bipolar, tenemos:

- Una señal portadora, que tiene una forma de onda triangular, y que suele tener una frecuencia de un orden superior a la señal de referencia.
- Una señal de referencia, la cual tiene una forma de onda sinusoidal.

Estas dos señales se pueden observar en la figura 18.

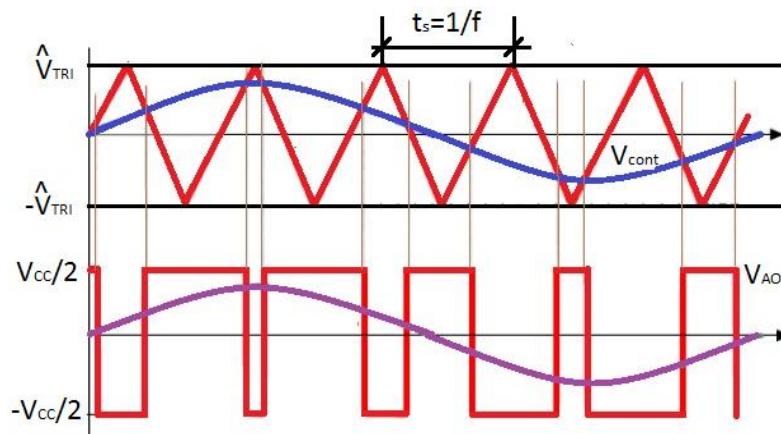


Figura 18 Control PWM Bipolar

La señal triangular roja es la señal portadora mientras que la azul es la señal de referencia.

El funcionamiento consiste en:

$$T_{A+} \text{ se activa cuando } V_{\sin} > V_{tri} \quad (V_0 = \frac{+V_{CC}}{2})$$

$$T_{A-} \text{ se activa cuando } V_{\sin} < V_{tri} \quad (V_0 = \frac{-V_{CC}}{2})$$

Por lo tanto, la señal en la carga a la salida queda tal y como aparece en la parte de abajo de la figura 18.

### 3.2.2.2 CONTROL PWM UNIPOLAR

Para una mejor explicación de la modulación PWM unipolar se va a realizar con un circuito inversor monofásico de onda completa, como el que aparece en la figura 19.

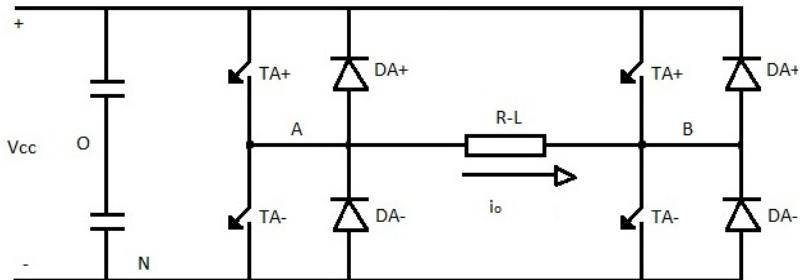


Figura 19 Circuito inversor monofásico de onda completa

En este caso habrá dos señales de referencia, inversas una respecto de la otra, como se observa en la figura 20.

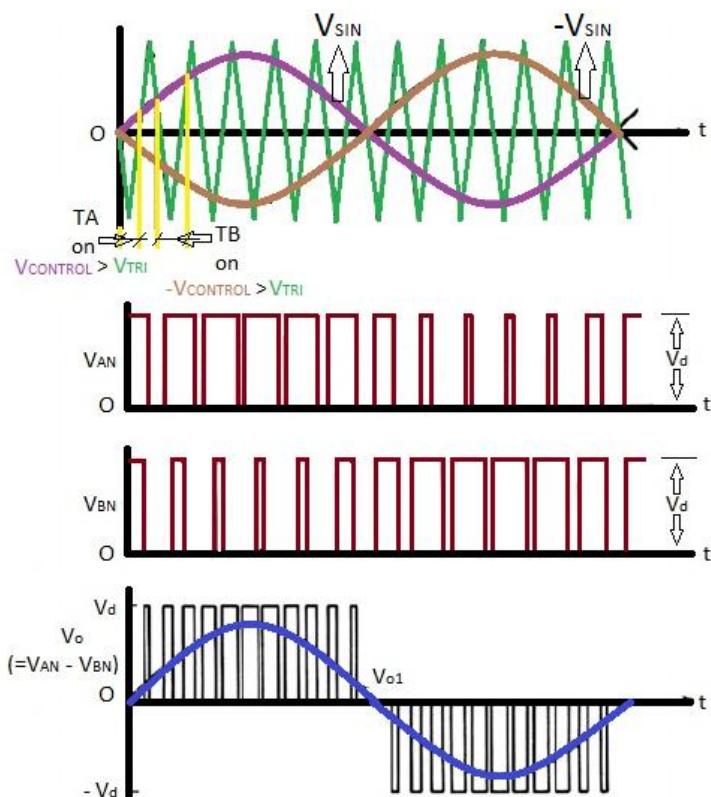


Figura 20 Control PWM Unipolar

El funcionamiento consiste en el siguiente procedimiento:

$T_{A+}$	se activa cuando	$V_{SIN} > V_{TRI}$
$T_{B-}$	se activa cuando	$-V_{SIN} < V_{TRI}$
$T_{B+}$	se activa cuando	$-V_{SIN} > V_{TRI}$
$T_{A-}$	se activa cuando	$V_{SIN} < V_{TRI}$

Por lo tanto, teniendo en cuenta que  $V_o = V_{AB} = V_A - V_B$ , la forma de onda de la tensión en la salida queda como se observa en la última grafica de la figura 20, así como la forma de onda de la intensidad.

### 3.2.3 CONTROL CON CANCELACIÓN PROGRAMADA DE ARMÓNICOS

Este control se ha aplicado al circuito inversor monofásico de onda completa, que se puede observar en la figura 19.

Este control consiste en el control de cada una de las dos ramas del circuito de manera independiente [2], [6]. En el control de onda cuadrada para un circuito inversor de onda completa (que se encuentra explicado en el ANEXO I) el desfase entre las dos ramas es de  $180^\circ$ , pero en este caso el desfase es de  $(180^\circ - \alpha)$ , como se observa en la figura 21.

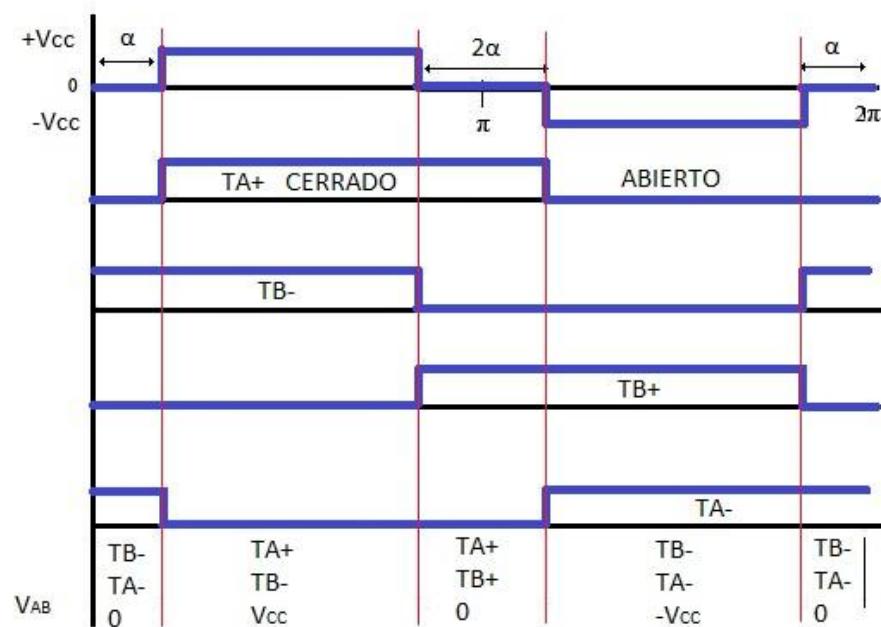


Figura 21 Control con cancelación programada de armónicos

Si  $\alpha=0$  nos encontramos con el caso de modulación de onda cuadrada.

El desfase marcado por el valor de  $\alpha$  provoca que la señal de tensión en la salida tenga pasos por 0 continuados de valor 2 veces  $\alpha$ . Dependiendo de ese valor, se puede conseguir anular los armónicos que se desee atendiendo a la igualdad:

$$\alpha = \frac{90^\circ}{n} \quad (3.4)$$

Siendo  $n$  el número de armónico que se desee cancelar.  $n$  toma valores impares ( $n=1,3,5,\dots$ ).

### 3.2.4 CONTROL POR HISTERESIS

Este tipo de control se ha aplicado al circuito inversor trifásico de onda completa (VSI 6-Step), pero para explicar el principio de funcionamiento de este control se va a desarrollar a partir de la figura 22 [3].

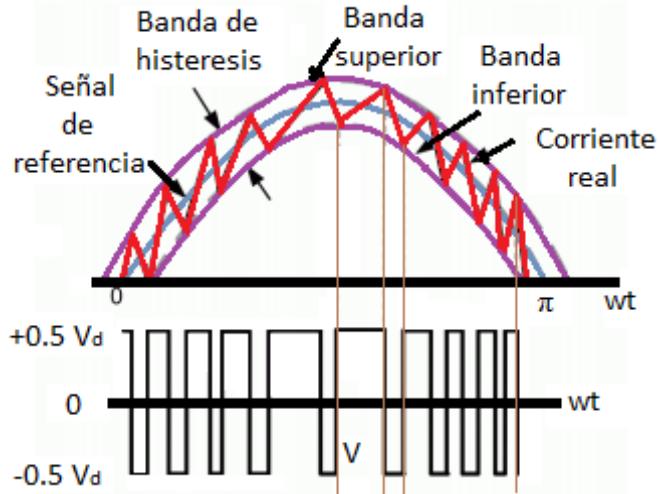


Figura 22 Control por histéresis

Primero se establece como referencia una señal sinusoidal, para que la salida de la corriente sea lo más parecida posible a esta. Una vez que se tenga esta señal, se establecen otras dos señales, una con un ligero aumento de la amplitud respecto a la de referencia (banda superior) y la otra con una ligera acortación (banda inferior). A la diferencia entre estas dos últimas se le llama *banda histeresis*.

Cuando la corriente real es igual a alguno de los límites de la banda, la tensión se invierte y por lo tanto la corriente real también lo hace. Cumpliendo con esto se obtiene una señal de corriente en la carga parecida a la señal de referencia, como se observa en la figura 22.

### 3.2.5 CONTROLES PARTICULARES

Los convertidores DC-AC *Cascade Full-Bridge*, *NPC* y *FC* poseen cada uno de ellos un control específico de activación de los interruptores.

A continuación se van a enumerar los diferentes tipos de circuitos con sus respectivas tablas de control donde aparecen los períodos de activación de cada interruptor [3].

- Circuito inversor monofásico *Cascade Full-Bridge* (2 niveles)

INTERRUPTORES CERRADOS	VOLTAJE V <sub>AO</sub>
S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>8</sub>	{V <sub>cc</sub> }
S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub>	{2 V <sub>cc</sub> }
Todos abiertos	0
S <sub>1</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>8</sub>	{-V <sub>cc</sub> }
S <sub>1</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>8</sub>	{-2 V <sub>cc</sub> }

Tabla 1 Control *Cascade Full-Bridge* (2 niveles)

- Circuito inversor monofásico *Cascade Full-Bridge* (4 niveles)

INTERRUPTORES CERRADOS	VOLTAJE V <sub>AO</sub>
S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>8</sub>	{V <sub>cc</sub> }
S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>7</sub>	{2 V <sub>cc</sub> }
Todos abiertos	0
S <sub>1</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>6</sub> , S <sub>8</sub>	{-V <sub>cc</sub> }
S <sub>1</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>5</sub> , S <sub>8</sub>	{-2 V <sub>cc</sub> }

Tabla 2 Control *Cascade Full-Bridge* (4 niveles)

- Circuito trifásico monofásico *Cascade Full-Bridge* (3 niveles)

Como este circuito está formado por 3 circuitos inversores monofásicos de onda completa, el control se realiza aplicando a cada uno de ellos el mismo control de manera independiente, pero con un desfase entre ellos de 120º respectivamente.

- Circuito inversor monofásico *NPC*

INTERRUPTORES CERRADOS	VOLTAJE V <sub>AO</sub>
S <sub>1</sub> , S <sub>22</sub>	{V <sub>cc</sub> /2}
S <sub>22</sub> , S <sub>11</sub>	0
S <sub>11</sub> , S <sub>2</sub>	{-V <sub>cc</sub> /2}

Tabla 3 Control *NPC*

- Circuito inversor monofásico *NPC* (5 niveles)

INTERRUPTORES CERRADOS	VOLTAJE V <sub>AO</sub>
S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>	{V <sub>cc</sub> /2}
S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>1'</sub>	{V <sub>cc</sub> /4}
S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>1'</sub> , S <sub>2'</sub>	0
S <sub>4</sub> , S <sub>1'</sub> , S <sub>2'</sub> , S <sub>3'</sub>	{-V <sub>cc</sub> /4}
S <sub>1'</sub> , S <sub>2'</sub> , S <sub>3'</sub> , S <sub>4'</sub>	{-V <sub>cc</sub> /2}

Tabla 4 Control *NPC* (5 niveles)

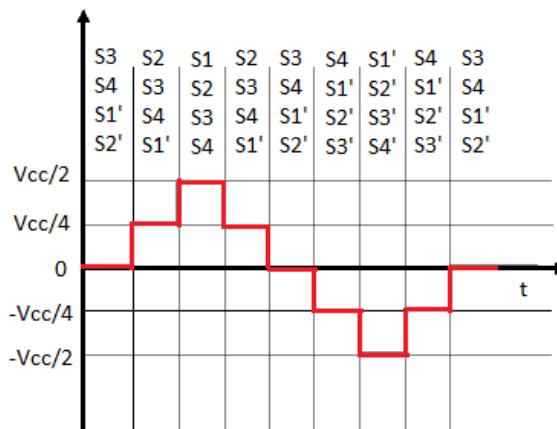


Figura 23 Señal de tensión y activación de interruptores en circuito NPC (5 niveles)

Circuito inversor trifásico *NPC*

INTERRUPTORES CERRADOS	VOLTAJE V <sub>AO</sub>
S <sub>1</sub> , S <sub>22</sub>	{V <sub>cc</sub> /2}
S <sub>22</sub> , S <sub>11</sub>	0
S <sub>11</sub> , S <sub>2</sub>	{-V <sub>cc</sub> /2}

Tabla 5 Control NPC trifásico

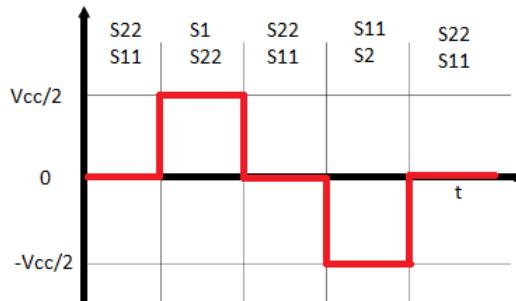


Figura 24 Señal de tensión y activación de interruptores en circuito NPC trifásico

Circuito inversor monofásico *FC* (5 niveles)

INTERRUPTORES CERRADOS	VOLTAJE V <sub>AO</sub>
S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub>	{V <sub>cc</sub> /2}
S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>1'</sub> o S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>4'</sub> o S <sub>1</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>3'</sub>	{V <sub>cc</sub> /4}
S <sub>1</sub> , S <sub>2</sub> , S <sub>1'</sub> , S <sub>2'</sub> o S <sub>3</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>3'</sub> , S <sub>4'</sub> o S <sub>1</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>1'</sub> , S <sub>3'</sub> o S <sub>1</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>2'</sub> , S <sub>3'</sub> o S <sub>2</sub> , S <sub>4</sub> , S <sub>2'</sub> , S <sub>4'</sub> o S <sub>2</sub> , S <sub>3</sub> , S <sub>1'</sub> , S <sub>4'</sub>	0
S <sub>4</sub> , S <sub>1'</sub> , S <sub>2'</sub> , S <sub>3'</sub>	{-V <sub>cc</sub> /4}
S <sub>1'</sub> , S <sub>2'</sub> , S <sub>3'</sub> , S <sub>4'</sub>	{-V <sub>cc</sub> /2}

Tabla 6 Control FC (5 niveles)

- Circuito inversor trifásico *FC* (3 niveles)

INTERRUPTORES CERRADOS	VOLTAJE V <sub>AO</sub>
S1, S22	{V <sub>cc</sub> /2}
S1, S11 o S22, S2	0
S11, S2	{-V <sub>cc</sub> /2}

Tabla 7 Control FC trifásico (3 niveles)

### 3.3 ELECCIÓN DE LOS CIRCUITOS INVERSORES A ESTUDIAR EN ESTE PROYECTO

Una vez realizado un breve recorrido por los diferentes tipos de topologías y técnicas de control, atendiendo a los convertidores DC-AC más comúnmente estudiados en los primeros cursos de ingeniería, se ha realizado una selección de los circuitos inversores que se van a estudiar y simular a continuación.

En la tabla 8 se encuentran, enumerados y diferenciados por categorías, todos los circuitos inversores seleccionados.

Nº	Nº DE FASES	TIPO DE CIRCUITO INVERSOR	TIPO DE CONTROL	CARGA
1	MONOFÁSICO	Media Onda	Onda Cuadrada	
2	MONOFÁSICO	Media Onda	PWM	
3	MONOFÁSICO	Asimétrico	Onda Cuadrada	
4	MONOFÁSICO	Asimétrico	PWM	
5	MONOFÁSICO	Onda Completa H-Bridge	Onda Cuadrada	
6	MONOFÁSICO	Onda Completa H-Bridge	Cancelación de armónicos	
7	MONOFÁSICO	Onda Completa H-Bridge	PWM Bipolar	
8	MONOFÁSICO	Onda Completa H-Bridge	PWM Unipolar	
9	TRIFÁSICO	VSI 6-Step	Onda Cuadrada	
10	TRIFÁSICO	VSI 6-Step	Onda Cuadrada	
11	TRIFÁSICO	VSI 6-Step	PWM	
12	TRIFÁSICO	VSI 6-Step	PWM	
13	TRIFÁSICO	VSI 6-Step	Histéresis	
14	MONOFÁSICO	Push-Pull	Onda Cuadrada	
15	MONOFÁSICO	Push-Pull	PWM	
16	MONOFÁSICO	Cascade Full Bridge (2 Niveles)	Específico	
17	MONOFÁSICO	Cascade Full Bridge (4 Niveles)	Específico	

<b>18</b>	TRIFÁSICO	Cascade Full Bridge (3 Niveles)	Especifico	
<b>19</b>	MONOFÁSICO	NPC	Especifico	
<b>20</b>	MONOFÁSICO	NPC (5 Niveles)	Especifico	
<b>21</b>	TRIFÁSICO	NPC	Especifico	
<b>22</b>	MONOFÁSICO	FC (5 Niveles)	Especifico	
<b>23</b>	TRIFÁSICO	FC (3 Niveles)	Especifico	

Tabla 8 Selección de circuitos inversores

#### 4 HERRAMIENTA DIDÁCTICA: APLICACIÓN GRAFICA PARA EL ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DE LOS INVERSORES

Una vez hecha una introducción al mundo de los circuitos convertidores DC-AC y la selección de los circuitos que se van a desarrollar y simular, se procede al desarrollo de la herramienta didáctica que se ha marcado como objetivo de este proyecto.

Primero se desarrolla el procedimiento del montaje de las simulaciones de los 23 circuitos inversores seleccionados mediante la herramienta *Simulink* del programa *MATLAB* y con el programa de simulación de circuitos eléctricos *PSpice*.

Posteriormente se comenta la creación y el funcionamiento de la interfaz gráfica creada con la herramienta *GUIDE* de *MATLAB*, donde se puede simular, modificar y obtener parámetros de cualquiera de los 23 circuitos inversores simulados mediante *Simulink*.

Como complemento al estudio de los convertidores seleccionados, se crea un archivo con formato Microsoft Excel, llamado “*IS\_Table.xls*”, donde se realizan algunos cálculos adicionales que la interfaz gráfica no proporciona.

Y como producto final, la creación de un archivo con formato *PDF*, llamado “*INVERTER SIMULATIONS APPLICATION.pdf*” donde se resume, en tres carillas, la herramienta didáctica con todas su diferentes partes, para que el alumno pueda usarlo con la ayuda de unas breves instrucciones de uso.

Por último se crean unas instrucciones generales de uso que engloba a toda la herramienta didáctica.

##### 4.1 SIMULACIÓN DE LOS CIRCUITOS INVERSORES

Una vez seleccionados los 23 circuitos convertidores, se procede a la simulación mediante los 2 programas informáticos citados anteriormente.

#### 4.1.1 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LA HERRAMIENTA SIMULINK DE MATLAB

*Simulink* es una herramienta de simulación de modelos o sistemas, que ofrece un entorno gráfico de ventanas, que mediante diagrama de bloques se consigue realizar una simulación teórica de diferentes tipos de sistemas. Se puede obtener y observar la salida, tanto numérica como gráficamente, reduciendo así considerablemente el tiempo empleado en la construcción y prueba de un modelo del sistema. *Simulink (Toolbox)* es un entorno visual que se ejecuta en el entorno de programación *MATLAB* con un alto nivel de abstracción [7-8].

Se utiliza principalmente en temas relacionados con ingeniería eléctrica, especialmente con el procesamiento de señales digitales (DSP), involucrando temas específicos de ingeniería biomédica y telecomunicaciones, entre otros. También es ampliamente utilizado en Ingeniería y Sistemas de Control Automático. Está especialmente pensado para el análisis y diseño de sistemas de control, aunque es útil para todo tipo de sistema dinámico: lineal, no lineal, continuo, discreto o híbrido.

*MATLAB* es un producto propiedad de "The Mathworks" y por lo tanto los usuarios están limitados y bloqueados por el vendedor.

Aunque existe una herramienta adicional llamada *MATLAB Builder* para utilizar las funciones de *MATLAB* como archivos de biblioteca que se pueden utilizar para .NET o Java, la desventaja radica en que la aplicación requiere la instalación de *MCR (Runtime Componente MATLAB)* para que los archivos de *MATLAB* funcionen correctamente. *MCR* se puede distribuir libremente con los archivos de biblioteca generados por *MATLAB Compiler*.

En este proyecto se intentó realizar un archivo con formato ".exe" de estas características para poder usar la aplicación creada sin tener la necesidad de instalar el programa, pero resulta incompatible al tener que llamar a simulaciones creadas con la herramienta *Simulink MATLAB*.

En el ANEXO II se proporciona una lista de algunos programas que se presentan como alternativa a *MATLAB*, la mayoría de software libre.

#### 4.1.2 SIMULACIÓN MEDIANTE LA HERRAMIENTA SIMULINK MATLAB

A continuación se va a explicar brevemente como se ha realizado la simulación de un circuito simple, en este caso del circuito inversor monofásico de media onda que aparece en la figura 1, pero en el ANEXO II se encuentra un desarrollo más detallado de los 23 circuitos inversores con el programa *Simulink* de *MATLAB*, así como una breve descripción del programa y algunas instrucciones básicas para su uso y funcionamiento [7-9].

En las figuras 25 y 26 se observa el esquema definitivo del circuito en *Simulink*.

En este esquema las entradas son:

- La tensión continua de entrada en *DC Voltage Source* y *DC Voltage Source1*.
- La señal de control es introducida en *Signal Generator*, donde se introduce la forma de onda (en este caso onda cuadrada), su amplitud (5) y la frecuencia (50 Hz). Esta señal se manipula con el bloque *Relay*, el cual convierte esa señal en 1 o 0 dependiendo si es mayor o menor que el límite (4 o -4).

Los interruptores se encuentran representados en la figura 26, dentro del *subsystem* que aparece en la figura 25, y la salida se trata de una carga R-L. Hay varios *Displays* instalados que muestran valores como el valor RMS de la tensión e intensidad de salida en la carga, sus valores de la tasa de distorsión armónica (THD) y el valor de la tensión de entrada. Para obtener las formas de onda tanto de las señales de control como los valores de la tensión e intensidad en la carga se disponen de unos *Scopes* instalados, que haciendo *doble click* sobre ellos, una vez ejecutada la simulación, se puede ver dichas formas de onda.

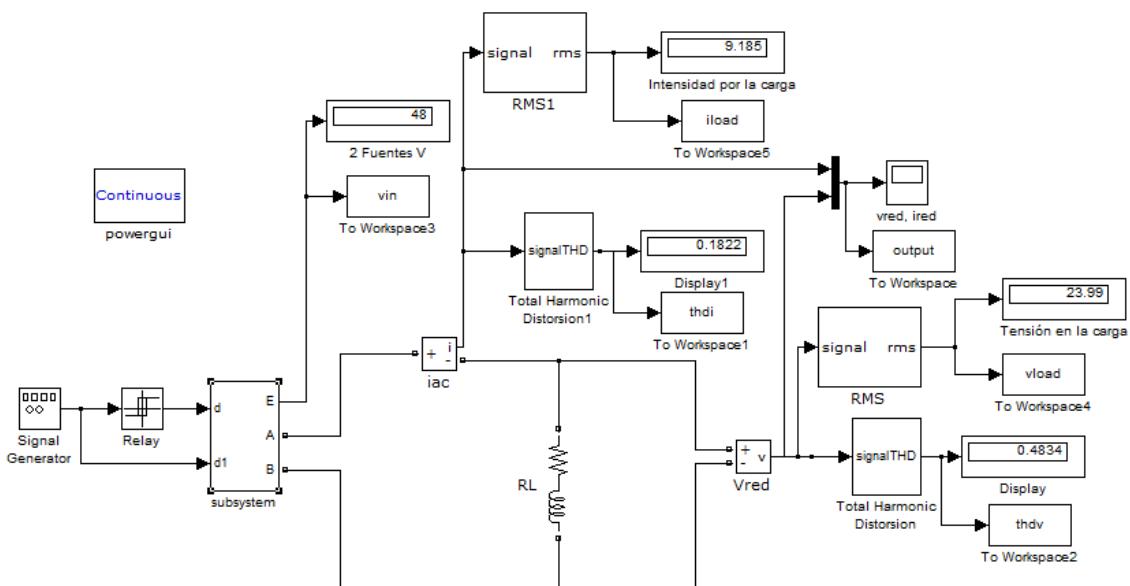


Figura 25 Esquema Simulink del circuito inversor monofásico de media onda

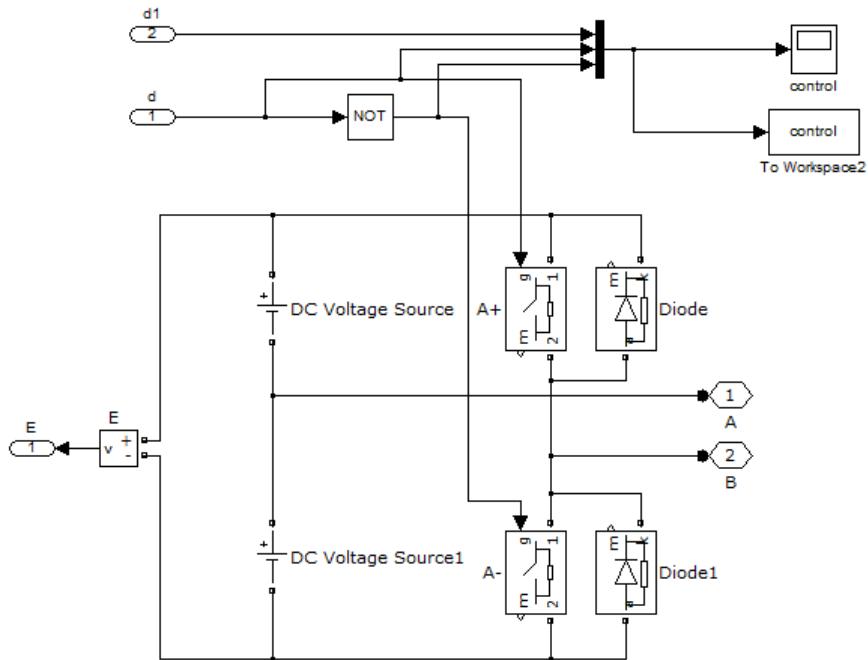


Figura 26 Subsistema del esquema *Simulink* del circuito inversor monofásico de media onda

Haciendo doble clic en el *Scope* de salida (*vred*, *ired*), se obtienen las formas de onda de la corriente (línea amarilla) y de la tensión (línea morada) en la carga, como se muestra en la figura 27.

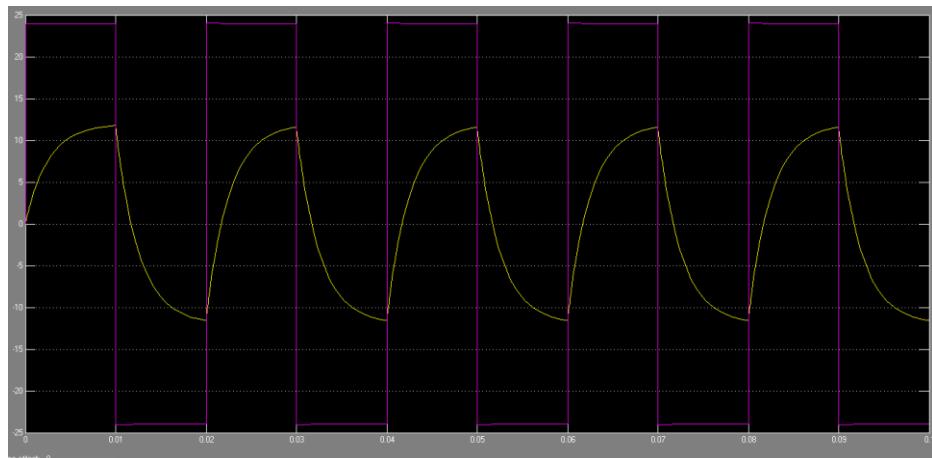


Figura 27 Formas de onda a la salida del inversor monofásico de media onda en *Simulink*

Para cada uno de los 23 circuitos inversores seleccionados se ha realizado un esquema en la herramienta *Simulink MATLAB* similar a la mostrada.

#### 4.1.3 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL PROGRAMA *PSpice*

*SPICE* es un estándar internacional que tiene como objetivo simular circuitos electrónicos analógicos. Posee varios tipos de análisis, principalmente [10-11]:

- DC – Función de transferencia.
- AC – Respuesta en frecuencia de circuito.

- Transitorio – Evolución del circuito en el tiempo.

*PSpice* posee varios programas, entre ellos *Schematics* y *Probe*. El primero es un programa de captura con una interfase directa a otros programas y opciones de *PSpice*. Con este programa se puede realizar el diseño y dibujo de circuitos, la simulación de los mismos y el análisis de los resultados simulados usando el visualizador de formas de onda de *PSpice*, llamado *Probe*.

*Schematics* tiene bibliotecas y posee un editor de símbolos para circuitos integrados con el propósito de crear los propios símbolos o modificar los ya existentes.

Una vez realizada la simulación, *PSpice* grafica las formas de onda de los resultados, de manera que pueden ser visualizados los resultados del comportamiento del circuito y poder así determinar la validez del diseño. También pueden ser manipulados de manera interactiva los datos de las señales producidos por la simulación. A este análisis se le llama *Probe*.

A través de la simulación con *PSpice* se consiguen formas de onda de manera similar a la de un osciloscopio, por lo que se lleva a cabo un proceso iterativo hasta lograr el diseño más óptimo.

El análisis de las formas de onda permite:

- Ver los resultados de la simulación en múltiples ventanas de *Probe*.
- Comparar los resultados.
- Graficar voltaje, corrientes y ruidos de datos.
- Realizar operaciones matemáticas complejas requeridas en las mediciones.
- Graficar las transformadas de Fourier de formas de onda.
- Graficar formas de ondas analógicas y digitales simultáneamente con una base de tiempo común.
- Añade etiquetas de texto y otros símbolos para una mejor claridad.

Las gráficas en *Probe* dependen del tipo de análisis que se corra (diagramas de Bode, margen de fase, familias de formas de señales e histogramas, etc.).

#### 4.1.4 SIMULACIÓN MEDIANTE *PSpice*

A continuación se va a explicar brevemente como se ha realizado la simulación de un circuito simple, en este caso del circuito inversor monofásico de media onda que aparece en la figura 1, pero en el ANEXO III se encuentra un desarrollo más detallado de los 23 circuitos inversores con el programa *PSpice*, así como una breve descripción del programa y algunas instrucciones básicas para su uso y funcionamiento [10-11].

En la figura 28 se observa el esquema definitivo del circuito en *PSpice*.

En este esquema las entradas son:

- La tensión continua de entrada en la fuente de tensión  $V1$  y  $V2$ .
- Las señales de control son introducidas por el generador de señales  $V1c$  y por la constante de valor 0. Y estas señales son manipuladas por los bloques  $E1$  y  $E2$ , en los cuales se obtiene un 1 o un 0 a su salida.

Los dos interruptores se encuentran representados por el transistor  $M1$  y el diodo  $D1$  y por el transistor  $M2$  y por el diodo  $D2$ . La salida se trata de una carga  $R-L$  ( $R2-L1$ ). Debido a que el funcionamiento del programa *PSpice* es distinto al de *Simulink* de *MATLAB*, en el ANEXO III se encuentra más desarrollado como obtener los valores y las gráficas necesarias para cada circuito inversor.

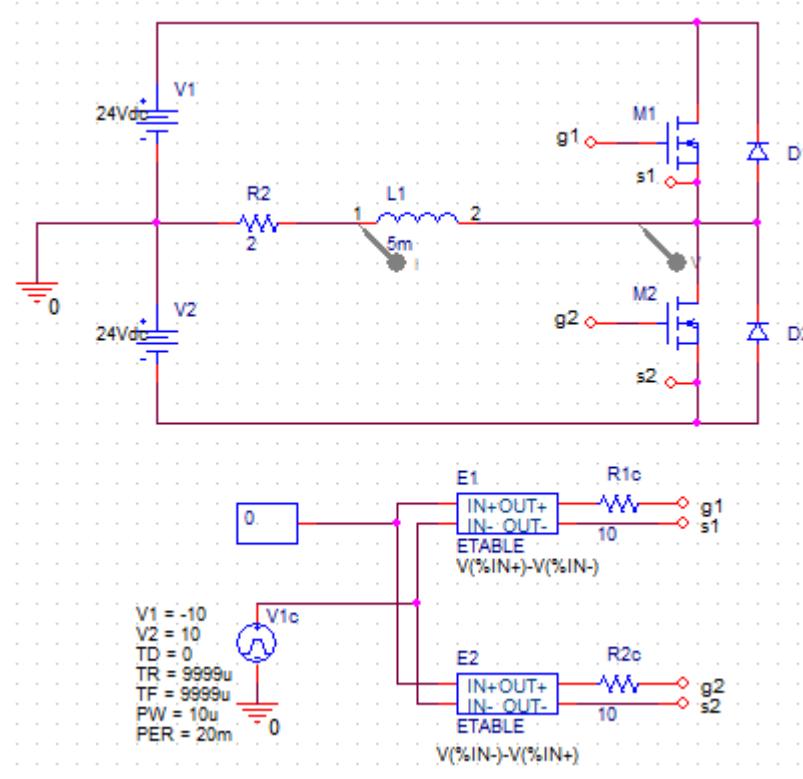
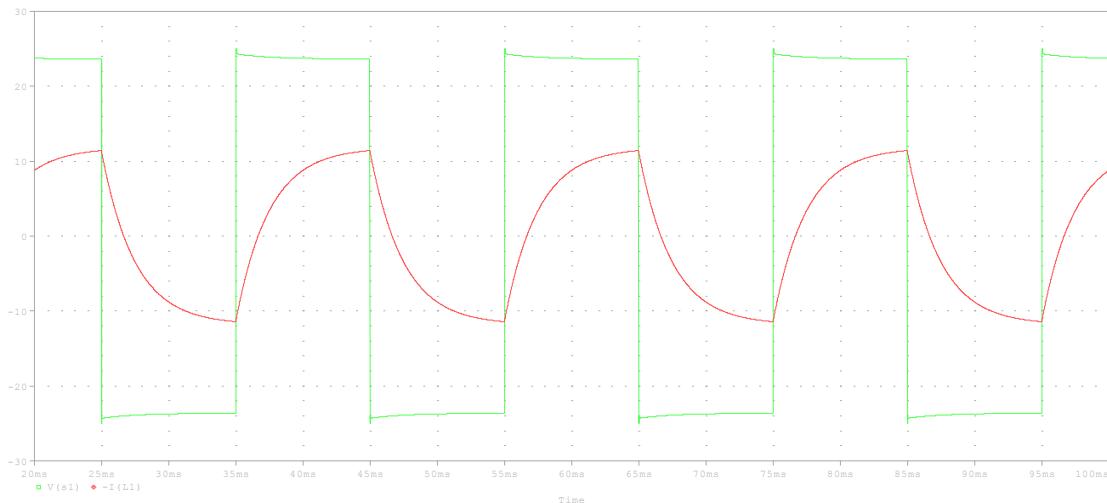


Figura 28 Esquema *PSpice* del circuito inversor monofásico de media onda

Ejecutando la simulación se observan, en la figura 29, las formas de onda de la tensión e intensidad en la carga.



**Figura 29 Formas de onda a la salida del inversor monofásico de media onda en PSpice**

Para cada uno de los 23 circuitos inversores seleccionados se ha realizado un esquema en programa *PSpice*.

#### 4.2 INTERFAZ GRAFICA CREADA CON LA HERRAMIENTA GUIDE DEL PROGRAMA DE SIMULACION MATLAB

Centrándose en las simulaciones realizadas por *Simulink* de *MATLAB*, el alumno puede abrir cualquiera de las 23 simulaciones y modificar parámetros de entrada y obtener las gráficas tanto de las formas de onda a la salida en la carga como de la técnica de control aplicada.

Los parámetros de entrada que el usuario puede modificar generalmente son:

- La tensión continua de entrada.
- Los valores de la resistencia e inductancia en la carga.
- El tiempo total de simulación.
- Los parámetros de control, que dependen del tipo que sea (la amplitud y frecuencia de la fuente de tensión de onda cuadrada, sinusoidal y/o triangular). Y como caso particular del circuito inversor con modulación por cancelación programada de armónicos, se puede introducir el ángulo de desfase entre las 2 ramas de interruptores del circuito.

Y los parámetros y gráficas de salida que el usuario puede observar y estudiar son los siguientes:

- El valor de la fuente de tensión de entrada, que obviamente debe de coincidir con el introducido manualmente en los parámetros de entrada.
- El valor eficaz de la tensión en la carga (valor de fase y valor de línea en caso de tratarse de circuitos trifásicos).

- El valor eficaz de la intensidad en la carga (si se trata de circuitos trifásicos aparece el valor de línea y el de fase).
- Los valores de las tasas de distorsión armónica de cada uno de los valores de intensidad y tensión citados anteriormente.
- La gráfica de las formas de onda de la tensión y de la intensidad en la carga.
- La gráfica de la técnica de control utilizada en cada convertidor.

Teniendo en mente todos estos parámetros y gráficas de entrada y de salida, se realiza una interfaz gráfica de usuario donde, sin necesidad de ir abriendo uno a uno cada archivo de simulación y cada bloque, se puedan modificar y observar dichos parámetros o gráficas. Esta interfaz gráfica se llama “*GUI Inverter Simulations*”.

La interfaz gráfica se realiza con la herramienta *GUIDE* del programa *MATLAB*. La herramienta permite, mediante un código de programación propio de *MATLAB*, la creación de dicha interfaz donde se pueda hacer una llamada a cada uno de los 23 archivos de simulación, y poder introducir y observar directamente todos los parámetros y gráficas enumeradas anteriormente.

En el ANEXO IV aparece un breve desarrollo que explica más detenidamente en que consiste la herramienta *GUIDE* de *MATLAB*, así como unas breves instrucciones de cómo se crear un *GUIDE* y como se accede al código de programación [12].

Mientras que en el ANEXO V, aparece el código de programación utilizado para la realización de esta interfaz gráfica, detallando a rasgos generales cual es la función de cada comando escrito en él [13].

Después de analizar detenidamente cuales serían las características que proporcionaría dicha herramienta, nos queda la interfaz gráfica representada en la siguiente figura (figura 30):

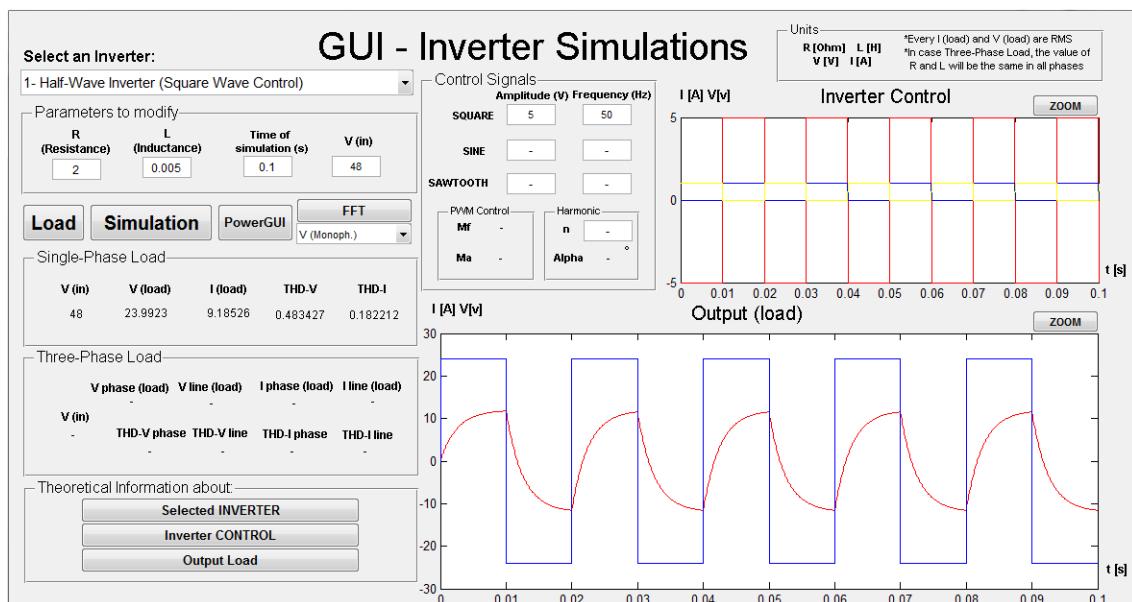


Figura 30 Interfaz gráfica *GUIDE MATLAB 1*

En la parte superior izquierda se encuentra una barra donde se elige el circuito inversor que se desea estudiar (figura 31).

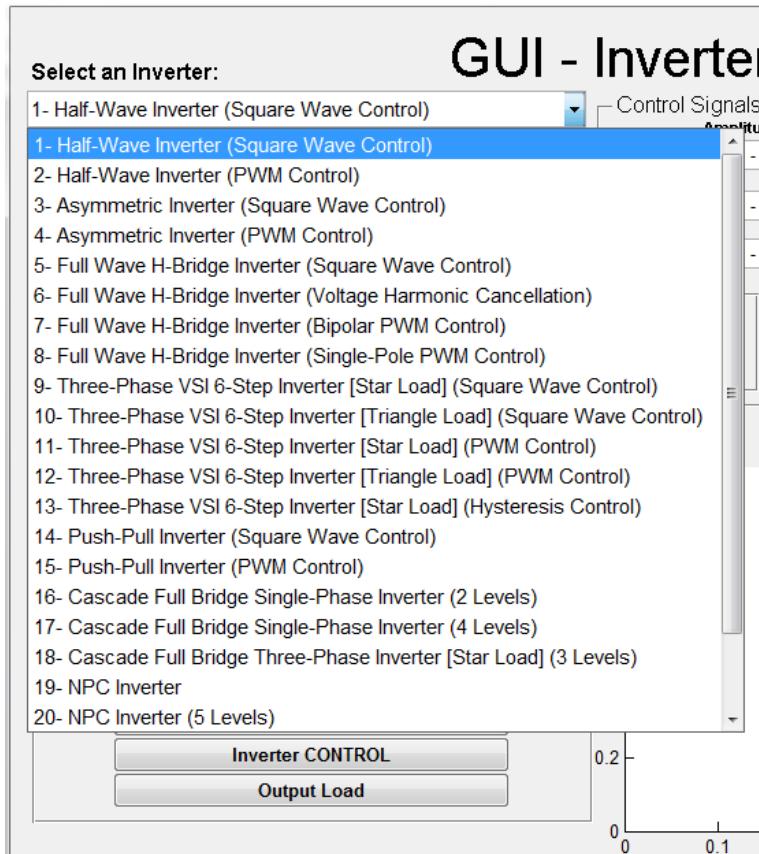


Figura 31 Interfaz gráfica **GUIDE MATLAB 2**

Más abajo, aparecen los parámetros de entrada para modificar (los valores de la resistencia e inductancia de la carga, la tensión de entrada y el tiempo de simulación).

Si se continúa bajando se observan unos botones que servirán para ejecutar las funciones que proporciona la interfaz. La función de estos botones se explicará más delante.

A continuación aparecen los parámetros de salida en forma de valores numéricos, separando los casos en los que se trate de una carga monofásica con los casos de carga trifásica.

Y en el margen inferior izquierdo de la interfaz aparecen unos botones de ayuda teórica, que al ser pulsados se abren ventanas en formato HTML con información, tanto del circuito inversor seleccionado como de las gráficas de control y salida.

Todos estos elementos se pueden observar en la figura 32.

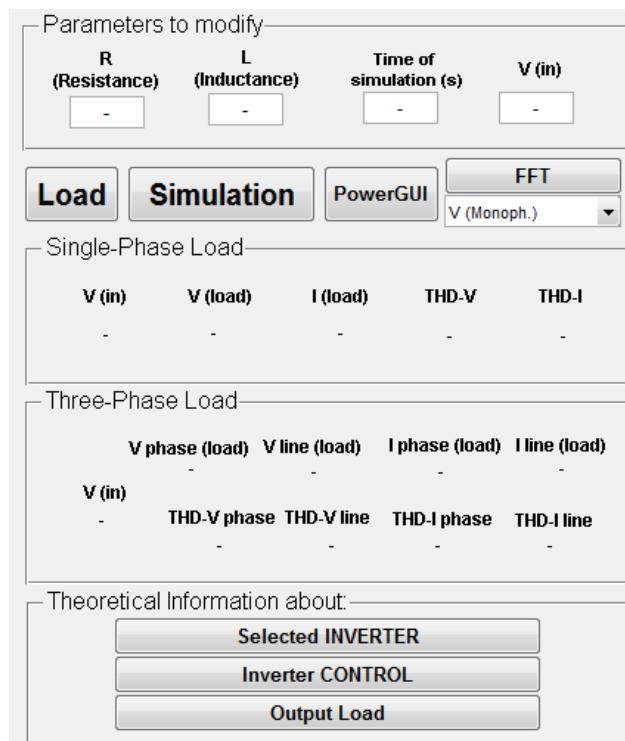


Figura 32 Interfaz gráfica GUIDE MATLAB 3

En la parte central superior, se encuentra la sección donde se puede manipular el control de cada circuito. Se puede modificar tanto la amplitud como la frecuencia de cada tipo de fuente de tensión. En el caso de ser control PWM se facilita como dato de salida el valor de la relación de frecuencias  $m_f$  y la relación de amplitudes  $m_a$ . Y en el caso particular de la modulación por cancelación programada de armónicos, se puede introducir el número de armónico que se desee cancelar y aparece como dato el valor del ángulo  $\alpha$  al que equivale (figura 33).

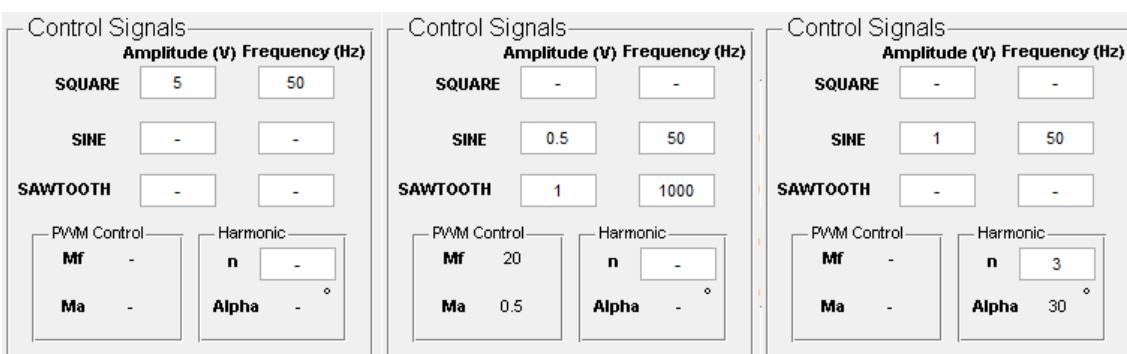


Figura 33 Interfaz gráfica GUIDE MATLAB 4

Por último están las dos graficas. La gráfica situada en el margen superior derecho (figura 34) se trata de la gráfica donde aparecen las señales de control, donde la línea roja pertenece a una fuente de tensión que se usa como comparativa respecto a 0 para conseguir que cada una de las 2 ramas se active cada medio periodo de manera inversa (la línea amarilla pertenece a una rama y línea azul a la otra). Para una mejor comprensión de cual es cada forma de onda que ahí aparece, se puede pulsar al botón de ayuda comentado anteriormente

o bien abrir manualmente el archivo de simulación de *Simulink* al que corresponde el circuito que se está estudiando y observar que señales son las que están representadas.

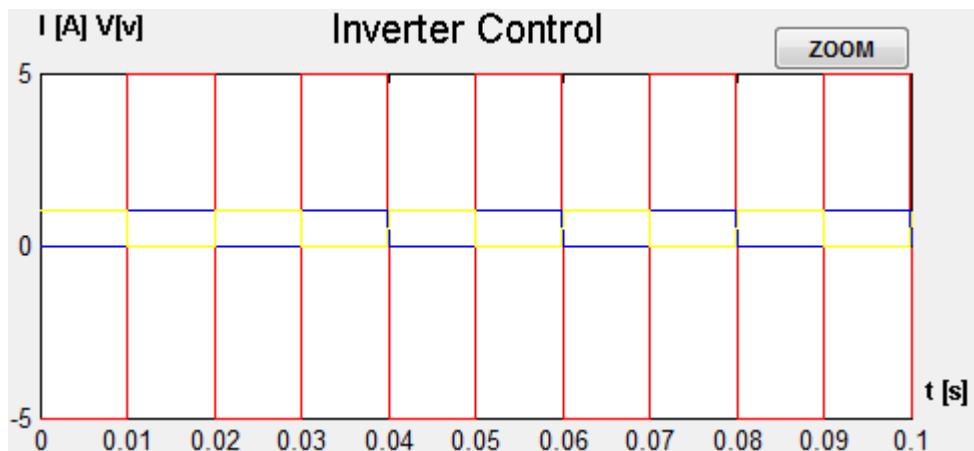


Figura 34 Interfaz gráfica *GUIDE MATLAB 5*

Y la gráfica situada en el margen inferior derecho (figura 35) se trata de la gráfica de salida en la carga, donde aparecen las formas de onda de la tensión y de la intensidad. Esta gráfica es de un tamaño mayor que la que representa el control del circuito ya que se considera más relevante.

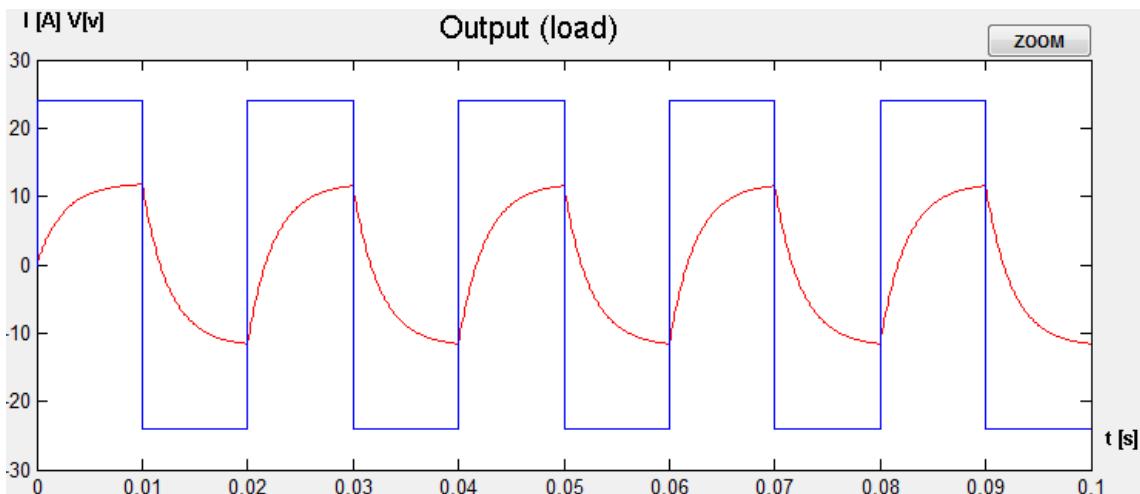


Figura 35 Interfaz gráfica *GUIDE MATLAB 6*

En la parte superior derecha de ambas gráficas se observa un botón llamado “ZOOM”, que al ser pulsados aparecen dichas gráficas en una ventana independiente, para poder ampliarlo de la forma de que el usuario desee.

Los pasos a seguir para el manejo de esta herramienta son los siguientes:

- 1- Primero se elige el circuito inversor que se desea estudiar y manipular, por ejemplo el “1- Half-Wave Inverter (Square Wave Control)”.
- 2- Una vez seleccionado se pulsa el botón “LOAD” para cargar unos parámetros iniciales. El usuario puede modificar los parámetros que han sido establecidos

mediante números enteros y positivos, pero si se introduce un parámetro en cualquiera de las casillas donde no hay ningún numero el programa no se ejecutará y aparecerá una ventana de dialogo avisando que los valores introducidos son incorrectos.

- 3- El siguiente paso es pulsar el botón “SIMULATION”, y tras esperar un periodo de tiempo acorde al tiempo de simulación establecido aparecerán en la interfaz todos los parámetros y gráficas comentados anteriormente.
- 4- Y como pasos opcionales se pueden pulsar los botones restantes:
  - a. Si se quiere observar las gráficas en ventanas independientes se pulsara al correspondiente botón de “ZOOM”.
  - b. Si se quiere obtener algún tipo de ayuda (ya sea la teórica del circuito seleccionado como del control o de la salida en la carga) en una ventana independiente se pulsara a los botones que se han comentado anteriormente.
  - c. El botón “PowerGUI” es una herramienta adicional que posee *Simulink*, donde el principal motivo por el que se ha implementado en la interfaz es obtener el análisis frecuencial de Fourier de cada una de las formas de onda de la salida en la carga. Una vez pulsado el botón “PowerGUI”, aparece una ventana emergente, después hay que pulsar el botón “FFT Analysis”, y seleccionando la forma de onda que se quiera estudiar, y pulsando el botón “Display”, aparece dicha gráfica, tal y como aparece en las figuras 36 y 37.

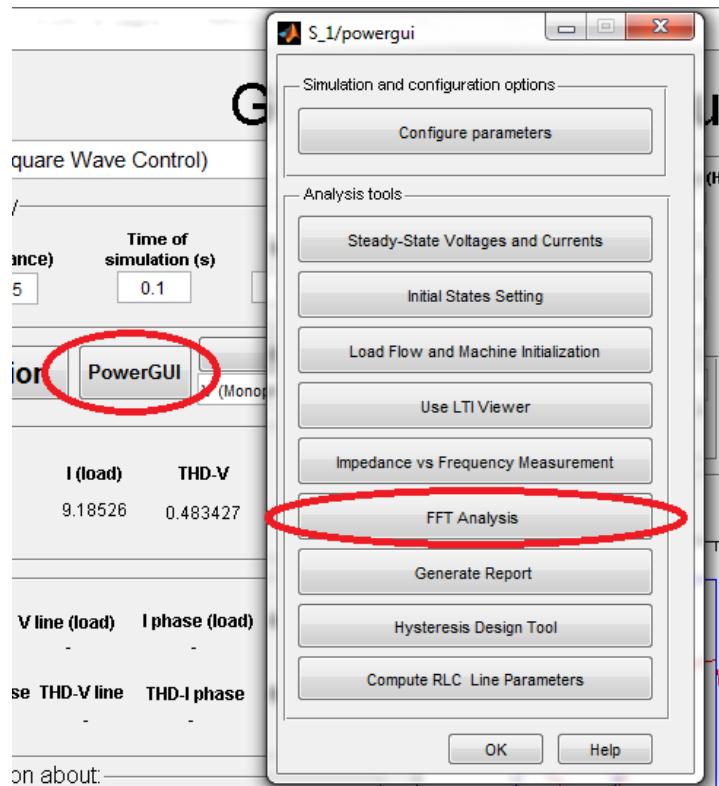


Figura 36 Interfaz gráfica **GUIDE MATLAB 7**

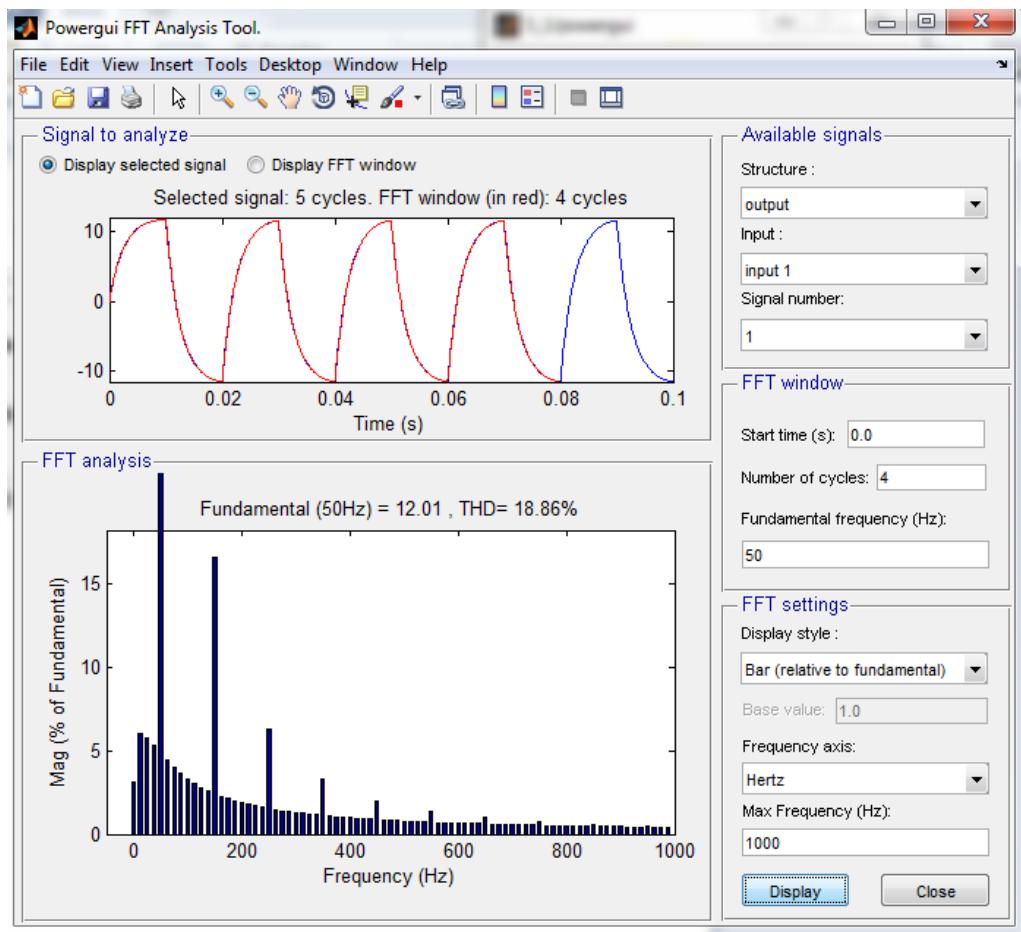


Figura 37 Interfaz gráfica GUIDE MATLAB 8

- d. Y por último, ya que no en todos los computadores donde está instalado el programa *MATLAB* se dispone de la herramienta *PowerGUI*, se ha decidido añadir a la interfaz gráfica un botón llamado “FFT” y una barra de selección, donde se puede seleccionar la señal de la que se quiere obtener el análisis frecuencial de Fourier. Por lo tanto, al pulsar dicho botón aparece en una ventana independiente el análisis frecuencial de la señal seleccionada sin necesidad de tener instalada la herramienta *PowerGUI*. Esto se puede observar en las figuras 38 y 39.

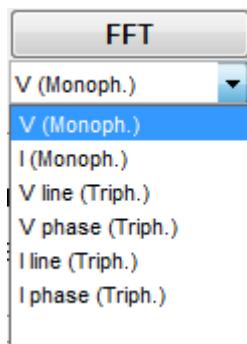


Figura 38 Interfaz gráfica GUIDE MATLAB 9

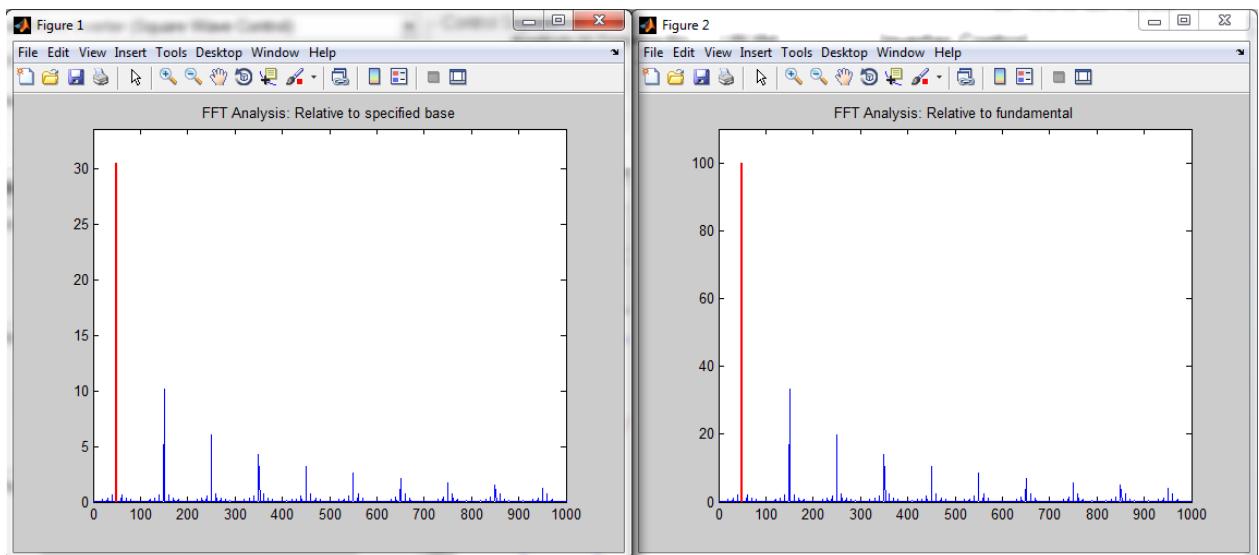


Figura 39 Interfaz gráfica GUIDE MATLAB 10

Por último, en el margen superior derecho de la interfaz, aparece una leyenda donde describe cuales son las unidades de todos los parámetros disponibles, como se observa en la figura 40.

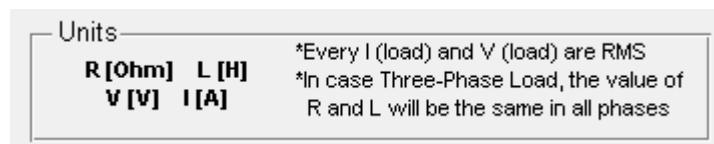


Figura 40 Interfaz gráfica GUIDE MATLAB 11

#### 4.3 ARCHIVO “IS\_Tables.xls”

Como complemento adicional para el estudio y el cálculo de los parámetros más relevantes de un circuito convertidor DC-AC, se ha creado un archivo *Excel* llamado “IS\_Tables.xls” donde aparecen los siguientes cálculos para cada uno de los 23 circuitos inversores seleccionados:

- Los primeros términos del desarrollo de Fourier tanto de la impedancia de la carga, como de la tensión e intensidad que circula por ella.
- Los valores de la tasa de distorsión armónica de la tensión e intensidad a la salida.
- Los valores eficaces de la tensión  $V_{RMS}$  y  $V_{I,RMS}$ .
- Dependiendo del tipo de control, los parámetros  $m_o$ ,  $m_f$  y el ángulo  $\alpha$ .

En la figura 41 se observa la ventana del dicho archivo para el circuito inversor número 1 (circuito inversor monofásico de media onda con control de onda cuadrada).

A	B	C	D	E	F	G	H
1	<b>1- HALF-WAVE INVERTER (SQUARE WAVE CONTROL)</b>						
2							
3							
4							
5	Vcc (V)	R (Ω)	L (H)	f (Hz)			
6	48	2	0,005	50			
7							
8	n	fn (hz)	Vn (V)	Zn (Ω)	In (A)	Pn (W)	
9	1	50	30,55	2,54	12,01	144,28	
10	3	150	10,18	5,12	1,99	3,96	
11	5	250	6,11	8,10	0,75	0,57	
12	7	350	4,36	11,18	0,39	0,15	
13	9	450	3,39	14,28	0,24	0,06	
14							
15	Vrms (V)	V1,rms (V)	THD-v		THD-i		
16	48	43,2151832	0,42879477		0,1811281		
17							
18							
19							
20							
21							
22							
23							
24							
25							
	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7
	S_8	S_9	S_10	S_11	S_12	S_13	S_14
Listo							

Figura 42 Archivo “IS\_Tables.xls”

#### 4.4 ARCHIVO “INVERTER SIMULATIONS APPLICATION.pdf”

Una vez explicadas y redactadas cada una de las partes de las que se compone este proyecto por separado se tiene:

- Las simulaciones de los circuitos inversores realizadas con *Simulink (MATLAB)*.
- Las simulaciones de los circuitos inversores realizadas con *PSpice*.
- La creación de una interfaz gráfica con la herramienta *GUIDE* de *MATLAB* la cual llama a las simulaciones realizadas con *Simulink*.
- Un archivo adicional con formato EXCEL, llamado “IS\_Tables.xls” donde aparecen algunos cálculos complementarios de cada uno de los 23 circuitos inversores.

Con el objetivo de unificar todas estas partes en una sola se ha creado un archivo con formato PDF con el fin de proporcionar una mayor comodidad de manejo para el usuario y una rápida accesibilidad a todas las partes del proyecto por el mismo.

El archivo se llama “INVERTER SIMULATIONS APPLICATION.pdf”, y posee una extensión de tres carillas. En ellas aparecen:

- Una tabla donde se encuentran citados y enumerados cada uno de los 23 tipos de circuitos estudiados en este proyecto, así como un enlace directo para cada inversor que abre:
  - i. La simulación realizada con *Simulink (MATLAB)*.
  - ii. La simulación realizada con *PSpice*.
  - iii. La ayuda teórica complementaria.

- Un enlace directo al archivo “IS\_Tables.xls”
- Los pasos a seguir para poder ejecutar la interfaz gráfica realizada con la herramienta *GUIDE* de *MATLAB* llamada “*GUI Inverter Simulations*”.
- Enlaces directos a los ANEXOS de este proyecto con el fin de proporcionar una ayuda complementaria a los usuarios de la herramienta didáctica en caso de necesitarlo.

El archivo llamado “*INVERTER SIMULATIONS APPLICATION.pdf*” queda de la siguiente forma (Figuras 42, 43 y 44):

#### INVERTER SIMULATIONS APPLICATION

Nº	Nº OF PHASES	TYPE OF INVERTER	TYPE OF CONTROL	LOAD	PSpice	Simulink MATLAB	INFO
1	MONOPHASIC	Half-Wave	Square Wave		<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">RUN</span>	<span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">RUN</span>	
2	MONOPHASIC	Half-Wave	PWM		<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">RUN</span>	<span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">RUN</span>	
3	MONOPHASIC	Asymmetric	Square Wave		<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">RUN</span>	<span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">RUN</span>	
4	MONOPHASIC	Asymmetric	PWM		<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">RUN</span>	<span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">RUN</span>	
5	MONOPHASIC	Full Wave H-Bridge	Square Wave		<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">RUN</span>	<span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">RUN</span>	
6	MONOPHASIC	Full Wave H-Bridge	Voltage Harmonic Cancellation		<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">RUN</span>	<span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">RUN</span>	
7	MONOPHASIC	Full Wave H-Bridge	PWM Bipolar		<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">RUN</span>	<span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">RUN</span>	
8	MONOPHASIC	Full Wave H-Bridge	PWM Single-Pole		<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">RUN</span>	<span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">RUN</span>	
9	TRIPHASIC	Three-Phase VSI 6-Step	Square Wave	△	<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">RUN</span>	<span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">RUN</span>	
10	TRIPHASIC	Three-Phase VSI 6-Step	Square Wave	△	<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">RUN</span>	<span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">RUN</span>	
11	TRIPHASIC	Three-Phase VSI 6-Step	PWM	△	<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">RUN</span>	<span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">RUN</span>	
12	TRIPHASIC	Three-Phase VSI 6-Step	PWM	△	<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">RUN</span>	<span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">RUN</span>	
13	TRIPHASIC	Three-Phase VSI 6-Step	Hysteresis	△	<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">RUN</span>	<span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">RUN</span>	
14	MONOPHASIC	Push-Pull	Square Wave		<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">RUN</span>	<span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">RUN</span>	
15	MONOPHASIC	Push-Pull	PWM		<span style="border: 1px solid red; padding: 2px;">RUN</span>	<span style="border: 1px solid blue; padding: 2px;">RUN</span>	

Figura 41 Archivo “*INVERTER SIMULATIONS APPLICATION*” Página 1

16	MONOPHASIC	Cascade Full Bridge (2 Levels)	Specific		<a href="#">RUN</a>	<a href="#">RUN</a>	
17	MONOPHASIC	Cascade Full Bridge (4 Levels)	Specific		<a href="#">RUN</a>	<a href="#">RUN</a>	
18	TRIPHASIC	Cascade Full Bridge (3 Levels)	Specific		<a href="#">RUN</a>	<a href="#">RUN</a>	
19	MONOPHASIC	NPC	Specific		<a href="#">RUN</a>	<a href="#">RUN</a>	
20	MONOPHASIC	NPC (5 Levels)	Specific		<a href="#">RUN</a>	<a href="#">RUN</a>	
21	TRIPHASIC	NPC	Specific		<a href="#">RUN</a>	<a href="#">RUN</a>	
22	MONOPHASIC	FC (5 Levels)	Specific		<a href="#">RUN</a>	<a href="#">RUN</a>	
23	TRIPHASIC	FC (3 Levels)	Specific		<a href="#">RUN</a>	<a href="#">RUN</a>	

\* If Simulink files don't open, you have to select the following *Current Folder* in MATLAB, and then select the circuit you want:



[EXCEL File \(IS\\_Tables.xls\)](#)

In this file you can find the most important calculations about each inverter circuit:

[OPEN](#)

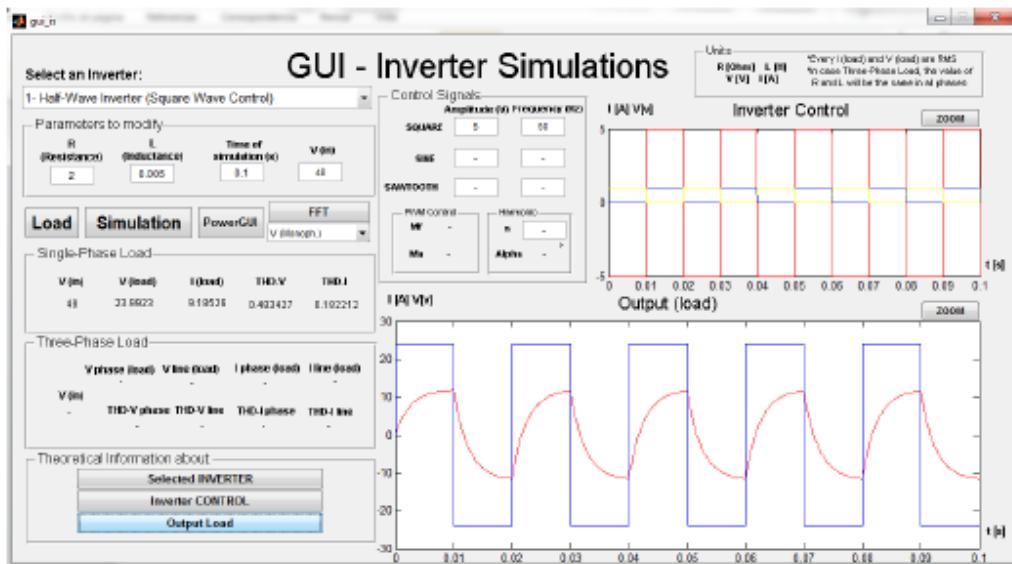
ANNEX 1	WORKING PRINCIPLE OF INVERTER CIRCUITS AND SELECTION AND THEORETICAL STUDY OF EACH INVERTER CIRCUIT	<a href="#">OPEN</a>
ANNEX 2	DESCRIPTION OF THE COMPUTER PROGRAM MATLAB AND SIMULATION OF INVERTER CIRCUITS WITH SIMULINK – MATLAB	<a href="#">OPEN</a>
ANNEX 3	DESCRIPTION OF THE COMPUTER PROGRAM PSPICE AND SIMULATION OF INVERTERS WITH PSPICE	<a href="#">OPEN</a>

**Figura 42 Archivo “INVERTER SIMULATIONS APPLICATION” Página 2**

## INVERTER SIMULATIONS INTERFACE

To open the interface with MATLAB you have to follow the next steps:

- 1- Open the program: MATLAB.
- 2- In the "Current Folder", select the folder where SIMULINK simulations are saved. In this case: **C:\Inverter Simulations\Matlab Simulations\**
- 3- Write on the Command Window: **gui\_is**, and push "Enter", and the following window is opened:



ANNEX 4	DESCRIPTION OF THE COMPUTER PROGRAM GUI - MATLAB	<b>OPEN</b>
---------	--	-------------

**Figura 43 Archivo "INVERTER SIMULATIONS APPLICATION" Página 3**

Si se hace *click* a alguno de los 4 botones que aparecen en la figura 45, se abre la correspondiente simulación, ayuda teórica, archivo "IS\_Tables.xls" o ANEXO seleccionado.



**Figura 44 Botones de "INVERTER SIMULATIONS APPLICATION"**

#### 4.5 RESUMEN DEL FUNCIONAMIENTO GENERAL DE LA HERRAMIENTA DIDÁCTICA

Para que la herramienta didáctica al completo pueda ser ejecutada sin problemas en cualquier computador se tienen que cumplir los siguientes requisitos:

- Tener instalado el programa *MATLAB* en el sistema operativo una versión igual o posterior a *MATLAB 7.8 R2009b*.
- Tener instalado el programa *PSpice* en el sistema operativo una versión igual o posterior a *OrCAD PSpice Full Version 9.2*, también es válida la versión de estudiante.
- Tener instalado el *Microsoft Office*, el *Open Office* o algún programa que sea capaz de ejecutar archivos con extensión “.xls” que sea capaz de abrir la versión 97-2003.

Para la instalación de todos los archivos en el computador se tienen que seguir los siguientes pasos:

- Introducir el CD, que viene con este proyecto, en el computador.
- Seleccionar la carpeta llamada “*Inverter Simulations Application*” con el botón derecho >> *Copiar*.
- Acceder a la unidad de disco C:\ del computador y hacer *click derecho >> Pegar*.
- Acceder a dicha carpeta y ejecutar el archivo PDF llamado “*INVERTER SIMULATIONS APPLICATION.pdf*”.
- Y así el usuario puede acceder a lo que deseé dentro de la herramienta didáctica creada.

## 5 CONCLUSIONES

Este proyecto ha permitido la realización de una herramienta didáctica dirigida principalmente para los estudiantes de ingeniería, donde se puede realizar un completo análisis teórico de las diferentes topologías y técnicas de control de los convertidores DC-AC más comúnmente estudiados en las carreras de ingeniería.

Una vez finalizada la memoria, se considera que se han cumplido los objetivos marcados al inicio de este proyecto, exceptuando algún tema que se comentará a continuación como líneas futuras para otros hipotéticos proyectos.

Para ello, se ha llevado a cabo el estudio de todos los campos teóricos de los circuitos inversores clásicos. Empezando por un estudio teórico de cada inversor y técnica de control desarrollado en el ANEXO I, pasando por la simulación de cada uno de ellos en *Simulink* *MATLAB* y *PSpice*, así como la creación de una interfaz gráfica mediante *GUIDE* de *MATLAB*, y de un archivo Excel para realizar algunos cálculos complementarios necesarios. Todo esto resumido en un archivo PDF donde se pueden acceder a todos los archivos creados así como unas breves instrucciones para acceder a la interfaz gráfica.

Como valoración personal, he de destacar que para la realización del proyecto he podido consolidar y aplicar los conocimientos que he ido adquiriendo durante la carrera de Ingeniería Industrial, especialmente con la mención de Sistemas Eléctricos. En particular con los programas informáticos utilizados en este proyecto, como son *PSpice* y *MATLAB*, en este último utilizando las herramientas de *Simulink* para las simulaciones y el lenguaje de programación para la creación de la interfaz con *GUIDE*.

Finalmente, agradecer a la universidad de Zaragoza por las facilidades puestas para que todo esto se haya podido llevar a cabo, así como agradecer también a la universidad de Budapest, Obuda University. Especialmente a los tutores de ambas universidades, los cuales me han guiado a lo largo de todo este proyecto.

### 5.1 LINEAS FUTURAS

A continuación se van a proponer algunas líneas futuras de cara a posibles nuevos proyectos para ampliar o complementar a este proyecto.

Primero se propone, como complemento práctico, un estudio real en el laboratorio de dichas topologías y técnicas de control. Para ello se desarrollaría una plataforma que incluyera una tarjeta con un procesador digital de señal (DSP) de bajo coste que se comunique con el ordenador. Así, las señales de control que se generan con *PSpice* o en *Simulink MATLAB* se trasladan al DSP, y este actuaría directamente sobre los circuitos de excitación de los transistores de potencia.

Este estudio se propuso inicialmente como uno de los objetivos de este proyecto, pero debido a la extensión del mismo y considerándola suficiente, se decidió no realizar esta parte.

A su vez, se propone realizar una herramienta didáctica similar a la conseguida en este proyecto, pero trabajando en este caso con convertidores AC-DC (circuitos rectificadores) así como con convertidores DC-DC y AC-AC. Tanto la parte del estudio teórico realizado en este proyecto como el estudio real en el laboratorio de dichas topologías y técnicas de control.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] KOLAR, "Seminario interactivo de electrónica de potencia (iPES)", ETH de Zurich. Disponible en: [http://www.ipes.ethz.ch/ipes/sp\\_index.html](http://www.ipes.ethz.ch/ipes/sp_index.html)
- [2] DANIEL W. HART, "Introduction to Power Electronics" (1<sup>a</sup> Edición), Prentice Hall, Octubre 1996.
- [3] JUAN LUIS VILLA, "Accionamiento y control de máquinas eléctricas", Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza.
- [4] J. M. BURDIO, "Electrónica de potencia", Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza..
- [5] MUHAMMAD H. RASHID, "Electrónica de Potencia. Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones" (3<sup>a</sup> Edition), Prentice Hall.
- [6] N. MOHAN, T. M. UNDELAND, W. P. ROBBINS, "Power electronics: converters, applications and desing" (2<sup>a</sup> Edición), Jhon Wiley & Sons, 1995.
- [7] Tutorial de MATLAB, MATLAB 2009b.
- [8] DIEGO ORLANDO BARRAGÁN GUERRERO "Manual de interfaz gráfica de usuario en MATLAB" (PartE 1).
- [9] MATLAB en Wikipedia. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/MATLAB>
- [10] Tutorial de PSpice, ORCAd 9.2.
- [11] SPICE en Wikipedia. Disponible en: <http://es.wikipedia.org/wiki/SPICE>
- [12] "GUIDE – MATLAB", Cedivirt.
- [13] YAIR MOSHE, "Advanced MATLAB Graphics and GUI", Department of Electrical Engineering, Technion – IIT Signal and Image Processing Laboratory.