



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento Tecnología Electrónica
Área Tecnología Electrónica

TRABAJO FIN DE GRADO

IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE MODULACIÓN PARA INVERSORES DE POTENCIA

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial

Autor: Carlos Andrés Ospina Franco

Tutor: Pedro Juan Sotorrío Ruiz

MÁLAGA, febrero de 2023

Resumen

Los inversores de potencia están constituidos por dos bloques fundamentales, actuación y control. Este documento está enfocado sobre el bloque de control, es decir, realiza la implementación de varias técnicas de modulación con la idea de analizar el comportamiento en cada una de ellas.

Para la implementación de los distintos métodos de modulación se ha elegido la placa de desarrollo MSP – EXP430FR2 con el microcontrolador MSP430FR2355 del fabricante Texas Instruments®, cumple con las especificaciones de diseño. El implementar las técnicas conlleva realizar una codificación de varias patillas del microcontrolador para facilitar la puesta en funcionamiento de alguna de las modulaciones.

Las medidas de cada una de las técnicas de modulación, se realiza mediante:

- Analizador lógico *Analog Discovery – DIGILENT®*, 100 MSPS y 16 canales, permite obtener los cronogramas de cada una de las técnicas para comprobar los intervalos de tiempo.
- Sonda diferencial *DP25 CHAUVIN – ARNOUX* con la cual se realizan las medidas de distorsión armónica en línea.
- Inversor SEMIKRON de la familia SKS 140F B6CI 92.
- Analizador de calidad eléctrica Chauvin Arnoux CA 8333, instrumento de medida que analiza las señales a la salida del inversor SEMIKRON.

Habiendo realizado la puesta en funcionamiento de las técnicas de modulación, se realiza una comparativa entre todas ellas con la idea de comprobar los parámetros de calidad.

Abstract

Power inverters consist of two fundamental blocks, which are actuation and control. This document focuses on the control block, which means it implements several modulation techniques in order to analyse the behaviour in each of them.

For the implementation of the different modulation methods, the MSP - EXP430FR2 development board with the MSP430FR2355 microcontroller from Texas Instruments® has been chosen. This instrument meets the design specifications. Implementing the techniques involves coding several pins of the microcontroller to facilitate the commissioning of some of the modulations.

The measurements of each of the modulation techniques are performed by using:

- Diligent Analog discovery, 100 MSPS and 16 channels, allows to obtain the chronograms of each of the techniques in order to check the time intervals.
- DP – 25 differential probe Chauvin Arnoux for harmonic distortion measurements.
- SKS 140F B6CI 92 SEMIKRON inverter.
- Chauvin Arnoux CA 8333 Power Quality Analyser: a measuring instrument which analyses the signals at the output of the SEMIKRON inverter.

Having carried out the implementation of the modulation techniques, a comparison is made between all of them in order to check the quality parameters.

Índice

Capítulo 1.....	1
1 Introducción.....	1-1
1.1 Objetivo.....	1-1
1.2 Metodología	1-3
1.3 Antecedentes	1-4
1.4 Términos y abreviaturas.....	1-5
Capítulo 2.....	2
2 Inversor de potencia.....	2-1
2.1 Introducción.	2-1
2.2 Serie de Fourier	2-3
2.3 Parámetros de calidad	2-5
2.3.1 Distorsión armónica total.....	2-5
2.3.2 Distorsión armónica ponderada	2-6
2.3.3 Factor de distorsión.....	2-6
2.4 Normativa UNE – EN 50160	2-7
Capítulo 3.....	3
3 Técnicas de modulación.....	3-1
3.1 Método onda cuadrada	3-1
3.2 Técnica SPWM	3-3
3.2.1 Señal moduladora	3-4
3.2.2 Señal Portadora	3-4
3.2.3 Índice de modulación de amplitud.....	3-4
3.2.4 Índice de modulación de frecuencia	3-5
3.2.5 SPWM bipolar	3-5
3.2.6 SPWM calculada.....	3-6

3.3	Técnica MSPWM.....	3-8
3.3.1	MSPWM calculada.....	3-9
3.3.2	Primer y último intervalo de 60°.....	3-9
3.3.3	Intervalo constante a nivel alto.....	3-10
3.3.4	Intervalo constante a nivel bajo.....	3-11
Capítulo 4.....		4
4	Cálculos.....	4-1
4.1	Cálculo del método onda cuadrada.....	4-1
4.2	Cálculo de la técnica SPWM.....	4-3
4.3	Cálculo de la técnica MSPWM.....	4-6
Capítulo 5.....		5
5	Implementación.....	5-1
5.1	Requisitos mínimos de sistema.....	5-1
5.2	Dispositivo de control.....	5-8
5.3	Esquema eléctrico.....	5-9
5.4	Programación.....	5-10
5.4.1	Método onda cuadrada.....	5-14
5.4.2	Técnica SPWM.....	5-16
5.4.3	Técnica MSPWM.....	5-17
Capítulo 6.....		6
6	Simulación.....	6-1
6.1	Onda cuadrada.....	6-1
6.2	SPWM.....	6-3
Capítulo 7.....		7
7	Resultados.....	7-1
7.1	Método onda cuadrada.....	7-1
7.2	Técnica SPWM.....	7-7
7.3	Técnica MSPWM.....	7-13

7.4	Resultados	7-19
Capítulo 8.....		8
8	Presupuesto	8-1
8.1	Presupuesto componentes	8-1
8.2	Mano de obra.....	8-1
8.3	Presupuesto total	8-1
Capítulo 9.....		9
9	Conclusiones.....	9-1
9.1	Técnicas.....	9-1
9.2	Implementación.....	9-1
9.3	Resultados	9-1
Capítulo 10.....		10
10	Bibliografía	10-1
Capítulo 11.....		11
11	Anexo.....	11-1
11.1	Programación del μ C.....	11-1

Índice de figuras

FIGURA 1-1. BLOQUES DE UN INVERSOR.	1-2
FIGURA 1-2. IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS DE CONTROL.	1-3
FIGURA 2-1. ESQUEMA DE UN PUENTE INVERSOR COMPLETO MONOFÁSICO.	2-1
FIGURA 2-2. FUNCIONAMIENTO DE UN INVERSOR MONOFÁSICO.	2-2
FIGURA 2-3. SEÑAL DE SALIDA EN LA CARGA.	2-2
FIGURA 2-4. ESQUEMA BÁSICO DE UN INVERSOR TRIFÁSICO.	2-3
FIGURA 2-5. VALORES DE LAS TENSIONES DE LOS ARMÓNICOS INDIVIDUALES.	2-7
FIGURA 3-1. INVERSOR MONOFÁSICO EN PUENTE COMPLETO.	3-1
FIGURA 3-2. SEÑAL CUADRADA DE PERIODO T.	3-2
FIGURA 3-3. REPRESENTACIÓN DE LA TÉCNICA SPWM.	3-3
FIGURA 3-4. TÉCNICA PWM BIPOLAR.	3-5
FIGURA 3-5. INTERVALOS DE TIEMPO EN FUNCIÓN DE LA SEÑAL SINUSOIDAL.	3-6
FIGURA 3-6. INTERVALOS DE ACTIVACIÓN.	3-7
FIGURA 3-7. REPRESENTACIÓN DE LA TÉCNICA MSPWM.	3-8
FIGURA 3-8. INTERVALO DE LA SEÑAL A NIVEL ALTO CONSTANTE EN MSPWM.	3-10
FIGURA 3-9. INTERVALO DE LA SEÑAL A NIVEL BAJO CONSTANTE EN MSPWM.	3-11
FIGURA 4-1. FORMA DE ONDA PARA UN INVERSOR TRIFÁSICO.	4-1
FIGURA 5-1. CAPACIDAD Y ORGANIZACIÓN DE MEMORIA PARA MSP430FR2355.	5-2
FIGURA 5-2. MODO DE DIRECCIONAMIENTO MSP430FR2355.	5-3
FIGURA 5-3. TEMPORIZADOR B DEL MSP430FR2355.	5-4
FIGURA 5-4. BLOQUE DE INTERRUPCIÓN DEL MSP430FR2355.	5-5
FIGURA 5-5. VECTORES Y FUENTE DE INTERRUPCIÓN DEL MSP430FR2355.	5-6
FIGURA 5-6. FUNCIONES DEL PUERTO 5.	5-7
FIGURA 5-7. DISPOSITIVO MSP430FR2355.	5-8
FIGURA 5-8. DIAGRAMA DE BLOQUES FUNCIONAL DE MSP430FR2355.	5-9
FIGURA 5-9. CONEXIONADO DE LAS PATILLAS, MSP430FR2355.	5-10
FIGURA 5-10. CONFIGURACIÓN DEL RELOJ A 16 MHZ.	5-11
FIGURA 5-11. CONFIGURACIÓN DEL TEMPORIZADOR B.	5-11
FIGURA 5-12. RUTINA DE INTERRUPCIÓN DE TIMER3_B0.	5-12
FIGURA 5-13. RUTINA DE INTERRUPCIÓN DE TIMER3_B1.	5-13
FIGURA 5-14. RUTINA DE EJECUCIÓN, ONDA CUADRADA.	5-14
FIGURA 5-15. RUTINA DE INICIALIZACIÓN DE VALORES, ONDA CUADRADA.	5-15
FIGURA 5-16. RUTINA DE EJECUCIÓN, SPWM.	5-16
FIGURA 5-17. RUTINA DE INICIALIZACIÓN DE VALORES, SPWM.	5-16
FIGURA 5-18. RUTINA DE EJECUCIÓN, MSPWM.	5-17
FIGURA 5-19. RUTINA DE INICIALIZACIÓN DE VALORES, MSPWM.	5-18
FIGURA 6-1. SEÑAL DE SALIDA. LÍNEA. SIMULACIÓN. ONDA CUADRADA.	6-1

FIGURA 6-2. ARMÓNICOS, U - V. SIMULACIÓN. ONDA CUADRADA..	6-2
FIGURA 6-3. SEÑAL DE SALIDA. LÍNEA. SIMULACIÓN. SPWM..	6-3
FIGURA 6-4. ARMÓNICOS, R - S. SIMULACIÓN. SPWM.....	6-4
FIGURA 7-1. CRONOGRAMA, MÉTODO ONDA CUADRADA.	7-1
FIGURA 7-2. ARMÓNICOS, FASE R. ONDA CUADRADA.	7-2
FIGURA 7-3. ARMÓNICOS, FASE S. ONDA CUADRADA.	7-3
FIGURA 7-4. ARMÓNICOS, FASE T. ONDA CUADRADA.	7-3
FIGURA 7-5. ESPECTRO DE FRECUENCIA. ONDA CUADRADA.	7-4
FIGURA 7-6. VALOR DE THD. ONDA CUADRADA.	7-5
FIGURA 7-7. DESFASE. ONDA CUADRADA.	7-6
FIGURA 7-8. CRONOGRAMA, TÉCNICA SPWM.	7-7
FIGURA 7-9. ARMÓNICOS, FASE R. SPWM.	7-8
FIGURA 7-10. ARMÓNICOS, FASE S. SPWM.	7-9
FIGURA 7-11. ARMÓNICOS, FASE T. SPWM.	7-10
FIGURA 7-12. ESPECTRO DE FRECUENCIA. SPWM.	7-11
FIGURA 7-13. VALOR DE THD. SPWM.	7-11
FIGURA 7-14. DESFASE. SPWM.	7-12
FIGURA 7-15. CRONOGRAMA, TÉCNICA MSPWM.	7-13
FIGURA 7-16. ARMÓNICOS, FASE R. MSPWM.	7-14
FIGURA 7-17. ARMÓNICOS, FASE S. MSPWM.	7-15
FIGURA 7-18. ARMÓNICOS, FASE T. MSPWM.	7-16
FIGURA 7-19. ESPECTRO DE FRECUENCIA. MSPWM.	7-17
FIGURA 7-20. VALOR DE THD. MSPWM.	7-18
FIGURA 7-21. DESFASE. MSPWM.	7-18

Índice de tablas

TABLA 4-1. ESTADOS DE ACTIVACIÓN I.	4-2
TABLA 4-2. ESTADOS DE ACTIVACIÓN II.	4-2
TABLA 4-3. ESTADOS DE ACTIVACIÓN III.	4-3
TABLA 4-4. OBTENCIÓN DE VALORES. TÉCNICA SPWM.	4-4
TABLA 4-5. VALORES PARA TEMPORIZADOR Y PUERTO DE SALIDA. TÉCNICA SPWM.	4-6
TABLA 4-6. OBTENCIÓN DE VALORES. TÉCNICA MSPWM.	4-8
TABLA 4-7. VALORES PARA EL TEMPORIZADOR Y PUERTO DE SALIDA. TÉCNICA MSPWM.	4-9
TABLA 5-1. CODIFICACIÓN P5.	5-8
TABLA 6-1. PARÁMETROS DE CALIDAD. SIMULACIÓN. ONDA CUADRADA.	6-2
TABLA 6-2. PARÁMETROS DE CALIDAD. SIMULACIÓN. SPWM.	6-4
TABLA 7-1. RESULTADOS, FASE 1 (R). ONDA CUADRADA.	7-2
TABLA 7-2. RESULTADOS, FASE 2 (S). ONDA CUADRADA.	7-3
TABLA 7-3. RESULTADOS, FASE 3 (T). ONDA CUADRADA.	7-4
TABLA 7-4. PARÁMETROS WTHD, DF, LÍNEA. ONDA CUADRADA.	7-6
TABLA 7-5. TIEMPO DE CADA INTERVALO, SPWM.	7-8
TABLA 7-6. RESULTADOS, FASE R. SPWM.	7-9
TABLA 7-7. RESULTADOS, FASE S. SPWM.	7-9
TABLA 7-8. RESULTADOS, FASE T. SPWM.	7-10
TABLA 7-9. PARÁMETROS WTHD, DF. SPWM.	7-12
TABLA 7-10. TIEMPO DE CADA INTERVALO, MSPWM.	7-14
TABLA 7-11. RESULTADOS, FASE R. MSPWM.	7-15
TABLA 7-12. RESULTADOS, FASE S. MSPWM.	7-16
TABLA 7-13. RESULTADOS, FASE T. MSPWM.	7-16
TABLA 7-14. PARÁMETROS WTHD, DF. MSPWM.	7-19
TABLA 7-15. COMPARATIVA THD.	7-19
TABLA 7-16. COMPARATIVA WTHD.	7-20
TABLA 7-17. COMPARATIVA DF.	7-20

Capítulo 1

1 Introducción

El aumento de inquietud por el desgaste del medio ambiente debido a la producción de energía eléctrica mediante métodos de obtención como los combustibles fósiles, ha generado un cambio en la manera de generarla, analizando métodos conocidos tales son, la energía solar, eólica, undimotriz y mareomotriz, geotérmica. De igual manera ha favorecido el desarrollo de nuevas técnicas como hidrógeno verde, energía del movimiento o cinética, la fotosíntesis [1]. En muchos casos en estas técnicas se obtiene energía eléctrica en corriente continua. Aunque, la red de distribución eléctrica necesite que la energía en corriente alterna y frecuencia constante. En este punto entra a tomar protagonismo los inversores electrónicos de potencia, los cuales realizan la transformación de energía eléctrica de corriente continua a corriente alterna, de igual manera pueden variar la frecuencia.

Los inversores son utilizados en multitud de aplicaciones desde pequeñas fuentes de alimentación para computadoras hasta aplicaciones industriales para controlar dispositivos de alta potencia. Los inversores de potencia son utilizados para “convertir” la corriente continua generada por ejemplo en los paneles solares fotovoltaicos, acumuladores o baterías, en corriente alterna y de esta manera poder ser inyectada a la red eléctrica o usada en instalaciones eléctricas aisladas.

Desde un punto de vista simplificado un inversor de potencia es un dispositivo compuesto por una parte física (circuito) y control (técnicas de modulación y programación). Este documento se enfoca en la parte de control, la cual se ejecuta mediante sistemas programables (microcontroladores , FPGAs, etc.).

1.1 Objetivo

En muchos casos el correcto funcionamiento de un inversor de potencia radica en la implementación de la técnica de modulación. Dependiendo de cuál sea dicha técnica el resulta es distinto. Las técnicas iniciales desarrolladas se efectuaron mediante procedimientos analógicos, siendo la base para las versiones digitales utilizadas hoy día. Las técnicas tratadas en este documento son digitales. La diferentes técnicas de modulación determinan en gran medida la calidad de la señal que se obtiene.

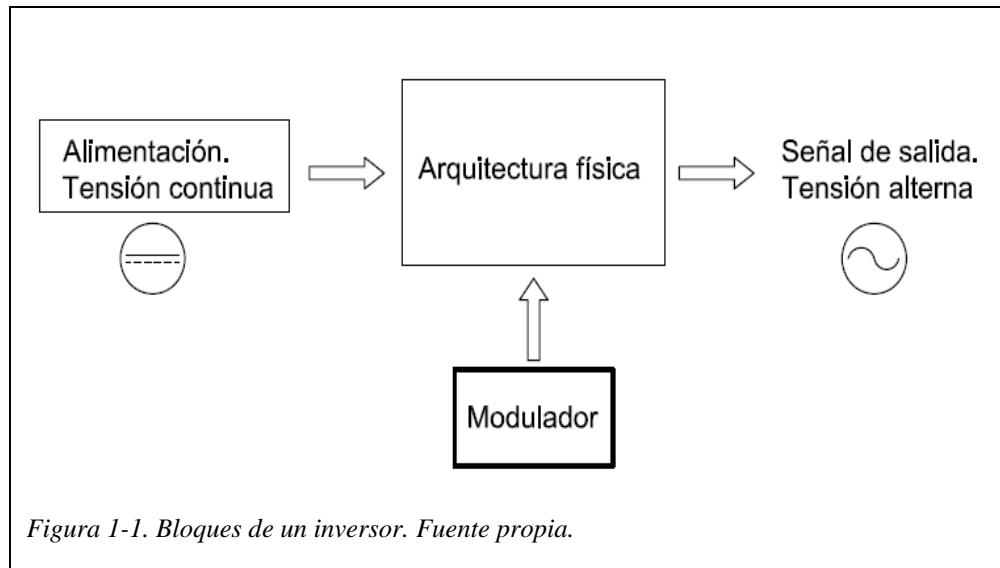
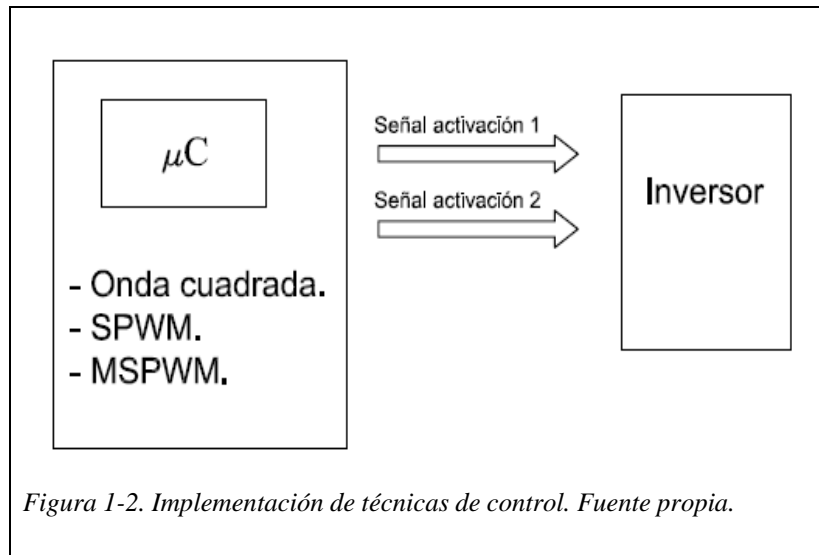


Figura 1-1. Bloques de un inversor. Fuente propia.

La figura 1 – 1 define de manera simplificada un inversor, compuesto por tres bloques y la señal se salida que es el resultado de toda la implementación realizada en el inversor. El bloque de *alimentación* hace referencia a la tensión y corriente de entrada que llega al inversor; el bloque de *arquitectura física* contiene todos los componentes como es condensadores, resistencias, transistores, etc.; el bloque *Modulador* es el encargado de generar las señales de activación. Lo cual, en función de una técnica u otra, la señal de salida será diferente. En este documento se realiza el desarrollo y la implementación de varias técnicas sobre dicho bloque.

Existen distintas técnicas de modulación para el control de un inversor de potencia. En este documento se centra en:

- Onda cuadrada, es una señal no modulada con ciclo de trabajo del 50 %.
- SPWM (*modulación por ancho de pulso sinusoidal*).
- MSPWM (*modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada*).



En la figura 1 – 2 se observa la finalidad del proyecto, implementar dichas técnicas en un microcontrolador (μC). Mediante dos señales (señal activación 1 y 2) se define una de las técnicas a poner en marcha. Los valores de tiempo de activación se implementan mediante tablas, se hará uso de un espacio de memoria, con lo cual, los recursos utilizados en el microcontrolador son mínimos.

Se tiene como resultado una señal modulada en la salida del inversor, la cual se asemeja a una onda sinusoidal. Para cada caso se comprueba mediante un análisis de espectro (programa o instrumento de medida) los parámetros de calidad, con la idea de comprobar si cumple con las especificaciones de la normativa, *Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución*, UNE – EN 50160.

1.2 Metodología

En el capítulo 2 se realiza una introducción sobre los inversores monofásicos y trifásicos, se plantea el *teorema de Fourier*, el cual, define como está compuesta una señal periódica no sinusoidal. Seguido se expone los parámetros que definen la calidad de una señal, la normativa que rige y define el límite que puede presentar la señal a la salida del inversor.

Para el tratamiento de los distintos métodos de modulación se parte de la forma de onda ideal, siendo la señal que se desea obtener a la salida del inversor. Para el caso de la técnica SPWM se trata de una señal sinusoidal, igualmente en la técnica MSPWM. La

técnica *Onda cuadrada*, es una señal cuadrada con ciclo de trabajo del 50 %. El estudio de la forma de onda y el planteamiento se realiza en el capítulo 3, se desarrollan las ecuaciones con las que se obtiene los distintos valores de tiempo para definir la señal modulada.

En el capítulo 4 se define el conjunto de tablas, las cuales van a contener los valores de tiempo para la activación y desactivación de las patillas del dispositivo microcontrolador en cada intervalo.

En el capítulo 5 se define los requisitos mínimos que debe tener el dispositivo de control para llevar a cabo la implementación. Teniendo presente que la implementación se realiza mediante tablas, el dispositivo a elegir debe tener un espacio de memoria disponible para albergar todos los valores de tiempo y estados de las señales de las patillas en cada intervalo.

En el capítulo 6 se realiza la simulación en LabVIEW del método onda cuadrada y la técnica SPWM y obtener los parámetros de calidad.

En el capítulo 7 se obtienen los resultados de cada una de las técnicas mediante instrumentos de medida, con la finalidad de comparar los resultados y determinar si son correctos los valores.

En el capítulo 8 define el coste económico de todo el trabajo.

En el capítulo 9 se determinan las conclusiones de todo lo planteado.

1.3 Antecedentes

El principio de funcionamiento de los convertidores de potencia está basado en la implementación de estrategias o técnicas PWM (*modulación por ancho de pulso*).

Por lo general la implementación de técnicas tiene por objeto mejorar el comportamiento del sistema, es decir, reducir la distorsión armónica total (THD), incrementar la eficiencia de conmutación, reducir las pérdidas de conmutación, etc. Las diferentes técnicas han ido mejorando y con ello incrementando la dificultad del algoritmo que se implementa con el propósito de conseguir una mayor fiabilidad y eficacia. La aparición de los μ Cs han favorecido la implementación de dichas técnicas.

El presente documento expone un análisis de varias técnicas, cada una con un algoritmo definido. El adoptar un determinado algoritmo o tipo de modulación tiene como objeto comparar el comportamiento del inversor de potencia.

1.4 Términos y abreviaturas

μC: Microcontrolador.

FPGA: Circuito integrado reconfigurable (*Field Programmable Gate Arrays*).

DF: Factor de distorsión (*Distortion Factor*).

GTO: Tiristor desactivado por puerta (*Gate Turn-Off Thyristor*).

IGBT: Transistor Bipolar de Puerta Aislada (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

MOSFET: Transistor de Efecto de Campo Metal – Óxido – Semiconductor (*Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*).

MSPWM: Modulación por Ancho de Pulso Sinusoidal Modificada (*Modified Sinusoidal Pulse Width Modulation*).

PWM: Modulación por Ancho de Pulso (*Pulse Width Modulation*).

RMS: Valor cuadrático medio (*Root Mean Square*).

SPWM: Modulación Sinusoidal de Ancho de Pulso (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*).

THD: Distorsión armónica total (*Total Harmonic Distortion*).

TPWM – DM: Modulación por ancho de pulso trapezoidal – modulación directa (*Trapezoidal PWM with Direct Modulation*).

WTHD : Tasa de distorsión ponderada (*Weighted Total Harmonic Distortion*).

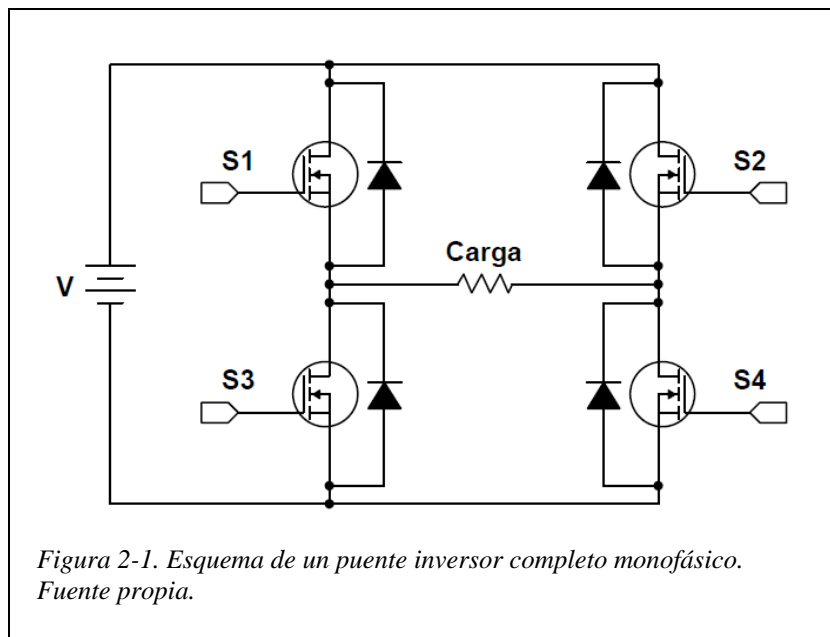
FRAM: Memoria ferroeléctricas de acceso aleatorio (*Ferroelectric Random Access Memory*)

Capítulo 2

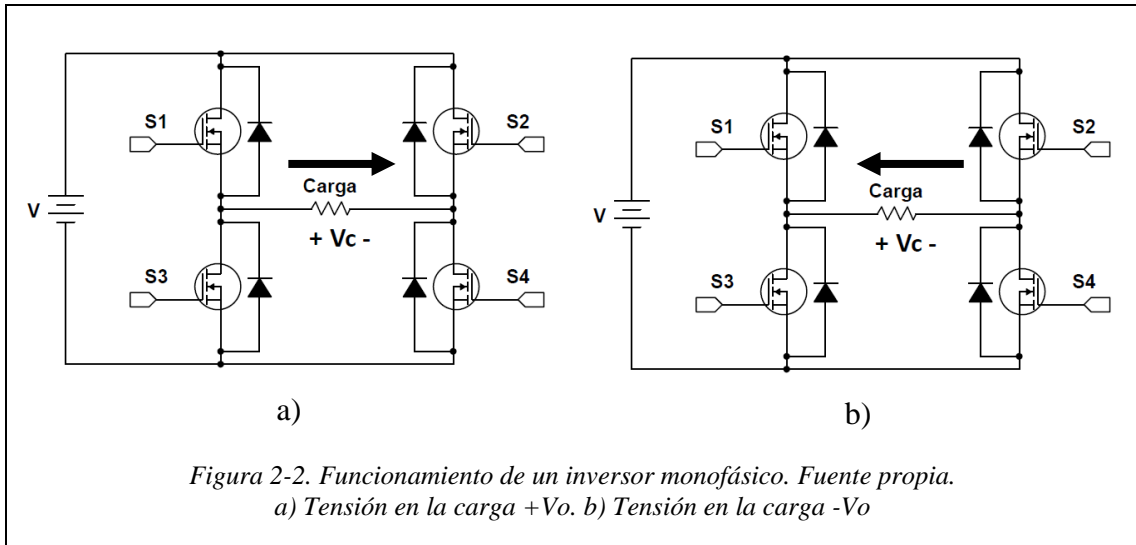
2 Inversor de potencia

2.1 Introducción.

Para simplificar el estudio se hace referencia a un inversor monofásico en puente completo o de onda completa. También llamado convertidor, ya que, “convierte” la tensión continua en una señal modulada, la cual se asemeja a una señal alterna. Constituido por cuatro dispositivos semiconductores, como pueden ser IGBT, MOSFET, GTO, etc., los cuales trabajan en corte (no conduce) o saturación (conduce). Estos dispositivos deben ser activados por medio de pulsos de disparo generados a partir de otros circuitos (dispositivos que hacen de enlace entre el μC y los elementos de potencia, lo cuales conmutan). Generalmente los pulsos de activación son generados empleando una de muchas técnicas de modulación, según sea la tarea por realizar.

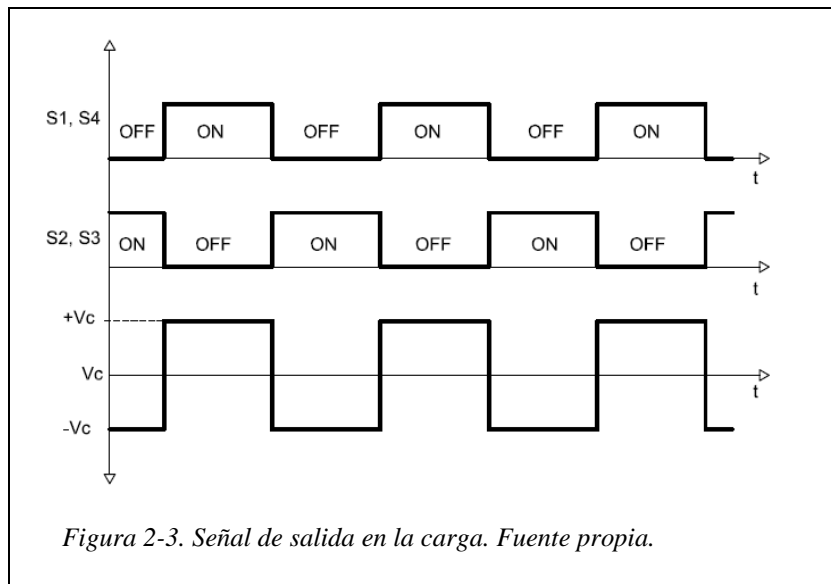


La figura 2 – 1 corresponde con un esquema simplificado de la parte de potencia de inversor. En este caso, está constituido por cuatro transistores MOSFET de enriquecimiento, en el cual las entradas S1 y S4 trabajan sincronizados, es decir, cuando la tensión en la entrada S1 y S4 es V_{ON} (nivel alto) los transistores están en conducción y cuando es V_{OFF} (nivel bajo) los transistores están en corte. Las entradas S2 y S3 trabajan de forma idéntica, salvo en instantes diferentes, de tal modo que si S1 y S4 están en conducción S2 y S3 no conducen y viceversa.



La figura 2 – 2 a) representa el funcionamiento para un inversor monofásico cuando la tensión en la carga es positiva ($+V_c$) en el cual S1, S4 están en conducción y S2, S3 no conducen.

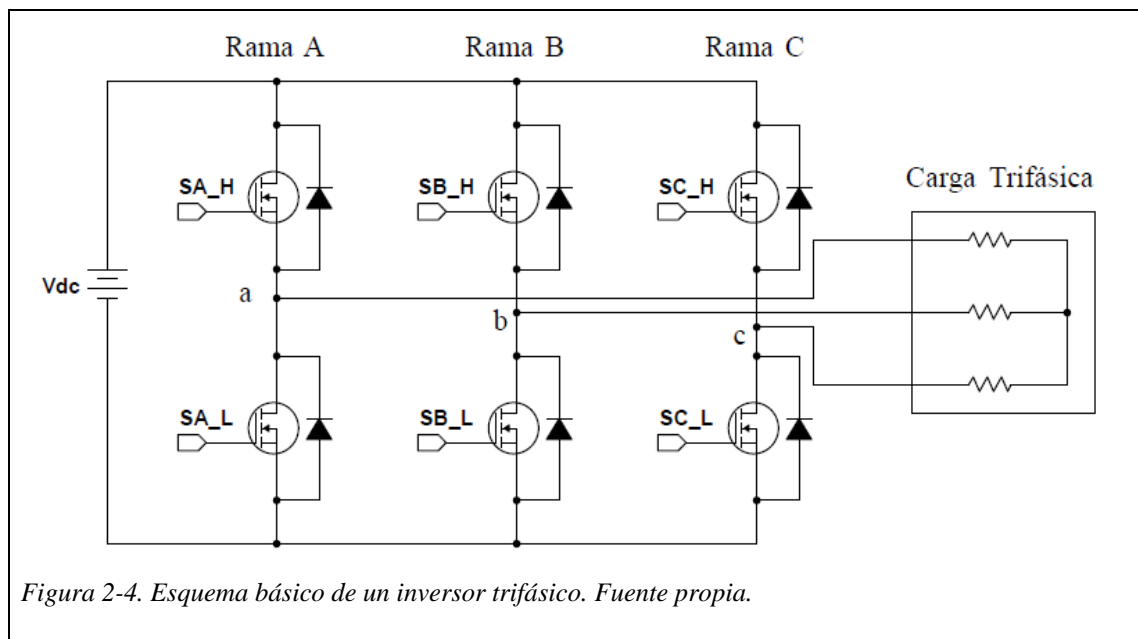
La figura 2 – 2 b) representa el funcionamiento para un inversor monofásico cuando la tensión en la carga es negativa ($-V_c$) en el cual S2, S3 están en conducción y S1, S4 no conducen. La señal que se obtiene a la salida al realizar dicha conmutación es la figura 2 – 3.



La figura 2 – 3 representa el accionamiento de los cuatro dispositivos de control, en ella S1, S4 se activan (ON) en el mismo instante tiempo y S2, S3 se desactivan (OFF)

obteniendo a la salida una variación de tensión en V_c , por ello la señal en la carga varía entre $+V_c$ y $-V_c$, con un periodo definido por el ancho de pulso.

Nunca debe coincidir la activación de dichas parejas ($S1 - S4$, $S2 - S3$) simultáneamente, de lo contrario se produce un cortocircuito. Se ha de tener presente las características de conmutación de los semiconductores. Concretamente los tiempos de conexión y desconexión.



En la figura 2 – 4 se observa un inversor trifásico, el cual se parece a la de un inversor monofásico. Se compone de tres ramas (A, B, C) con dos interruptores en cada una de ellas. SA_H, SB_H, SC_H, en la parte alta de cada rama y SA_L, SB_L, SC_L en la parte baja de cada rama. Cada rama produce una tensión en la salida, la cual tiene su frecuencia fundamental desplazada 120° respecto a las otras salidas.

2.2 Serie de Fourier

La serie de Fourier es una herramienta matemática con la cual se puede obtener información de una función no sinusoidal. Por lo tanto, cuando se hace referencia a la *serie de Fourier*, realmente está reduciendo la complejidad de la función para extraer

información de la señal, entre ellos las distintas frecuencias que componen la señal periódica.

Jean-Baptiste Joseph Fourier: “Cualquier señal está construida por suma de senos”. Con ello, la información que contiene una señal en el dominio en el tiempo puede pasar al dominio de la frecuencia y viceversa, siendo muy útiles en el estudio de funciones periódicas no sinusoidales.

La serie de Fourier se puede representar como suma de senos y cosenos [5], pág. 321:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \text{sen}(n\omega_0 t)) \quad (2-1)$$

ω_0 es la frecuencia angular.

Los términos a_0 , a_n , b_n son los coeficientes de Fourier.

- a_0 es la amplitud de la señal en $f = 0$, es decir, componente continua.
- a_n, b_n son las amplitudes de las distintas frecuencias, componentes alternas.

Definidas por:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2-2)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad (2-3)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T x(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt \quad (2-4)$$

La aplicación de la serie de Fourier se puede realizar siempre y cuando, tengan presente las siguientes condiciones:

- La integral a lo largo de un periodo T de la función $x(t)$ sea un valor finito.
- La función debe poseer un número finito de discontinuidades en un periodo T.
- La función debe poseer un número finito de máximos y mínimos en un periodo T.

2.3 Parámetros de calidad

Los parámetros de rendimiento de un inversor de potencia definen la calidad de la señal a la salida por lo general presenta armónicos no deseados. Por ello, se evalúa y verifica la calidad de la señal mediante:

- Distorsión total armónica THD (*Total Harmonic Distortion*).
- Distorsión armónica ponderada WTHD (*Weighted Total Harmonic Distortion*).
- Factor de distorsión DF (*distortion factor*).

2.3.1 Distorsión armónica total

La distorsión armónica total (THD) facilita el contenido total armónico. Es un parámetro importante en los sistemas de comunicación, audio y energía, por lo general debe ser lo más bajo posible[8].

Las frecuencias armónicas de una corriente o tensión periódica son componentes de frecuencia de la señal principal. Este es el resultado que define el análisis de Fourier de una señal periódica. La señal que es puramente sinusoidal no posee distorsión armónica porque es una señal de una sola frecuencia, con lo cual una señal periódica que no sea sinusoidal pura tendrá componentes de mayor frecuencia que ayudaran a la distorsión armónica de la señal. Entendiendo, cuanto menos se parezca una señal periódica a una sinusoidal, tendrá mayor distorsión armónica y más fuertes son las componentes armónicas.

Este parámetro es la relación de la tensión cuadrática media equivalente (RMS) de todas las frecuencias armónicas (desde el armónico 2 en adelante) y la tensión (RMS) de la frecuencia fundamental:

$$THD = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2,3,4,\dots}^{n=\infty} V_n^2} \quad (2-5)$$

Limitando el valor de n a 50.

Si se expresa como porcentaje respecto a la frecuencia fundamental, la ecuación es:

$$THD (\%) = 100 \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2,3,4\dots}^{n=\infty} V_n^2} \quad (2-6)$$

Limitando el valor de n a 50.

2.3.2 Distorsión armónica ponderada

El parámetro de distorsión armónica ponderada (WTHD) proporciona una mejor disposición de la contaminación armónica empleando el orden de cada componente como su elemento de peso. La expresión es:

$$WTHD = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2,3,4\dots}^{n=\infty} \left(\frac{V_n}{n}\right)^2} \quad (2-7)$$

Limitando el valor de n a 50.

Si se expresa como porcentaje de la frecuencia fundamental, la ecuación es:

$$WTHD = 100 \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2,3,4\dots}^{n=\infty} \left(\frac{V_n}{n}\right)^2} \quad (2-8)$$

Limitando el valor de n a 50.

2.3.3 Factor de distorsión

El factor de distorsión (DF) realiza una medida del alejamiento de la señal de salida con respecto a la señal fundamental, es decir, la eficacia para reducir las componentes armónicas no deseadas sin necesidad de implementar un filtro de carga de segundo orden.

$$DF = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2,3,4\dots}^{n=\infty} \left(\frac{V_n}{n^2}\right)^2} \quad (2-9)$$

Limitando el valor de n a 50.

Si se expresa como porcentaje de la frecuencia fundamental, la ecuación es:

$$DF = 100 \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2,3,4\dots}^{n=\infty} \left(\frac{V_n}{n^2}\right)^2} \quad (2-10)$$

Limitando el valor de n a 50.

2.4 Normativa UNE – EN 50160

Esta norma detalla los criterios que deben cumplir el suministro de red eléctrica. Las principales características de la tensión suministrada por una red general de distribución en baja y media tensión para condiciones normales en beneficio.

La finalidad de la normal es precisar y detallar los valores que se caracteriza la tensión de alimentación como es, frecuencia, amplitud, forma de onda, simetría, armónicos, etc.

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden h	Amplitud relativa u_h	Orden h	Amplitud relativa u_h	Orden h	Amplitud relativa u_h
5	6,0%	3	5,0%	2	2,0%
7	5,0%	9	1,5%	4	1,0%
11	3,5%	15	0,5%	6 ... 24	0,5%
13	3,0%	21	0,5%		
17	2,0%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

NOTA Los valores que corresponden a los armónicos de orden superior a 25, que son generalmente débiles y muy imprevisibles debido a los efectos de resonancia, no están indicados en esta tabla.

Figura 2-5. Valores de las tensiones de los armónicos individuales. Fuente UNE – EN 50160.

La figura 2 – 5 hace referencia a la tabla de la norma española UNE – EN 50160[10] con los valores máximos en porcentaje para los armónicos de la señal. De igual manera expone que la tasa de distorsión armónica total (THD) de la tensión suministrada no debe superar el 8% (siendo la suma de todos los armónicos a excepción del fundamental hasta el orden 40).

Nota: El límite de orden 40 es según convenio.

En condiciones normales la frecuencia nominal de tensión entregada debe ser de 50 Hz. Pero el valor medio de la frecuencia, es decir, la variación o el error para redes acopladas debe ser de $50 \text{ Hz} \pm 1\%$, es decir, 49,5 Hz a 50,5 Hz.

Capítulo 3

3 Técnicas de modulación

De forma global un inversor es un dispositivo el cual presenta en su salida una señal sinusoidal con amplitud y/o frecuencia variable a partir de una fuente de corriente continua. La secuencia para la conmutación de los transistores (interruptores) que integran un inversor viene impuesta por el algoritmo de modulación y control. En la actualidad existen distintas técnicas de modulación PWM aplicadas al control de los inversores que sirven para controlar el voltaje de salida, en este documento se presentan algunas de estas estrategias.

Dentro de las técnicas de modulación PWM se han propuesto diferentes algoritmos de modulación, cada uno con el propósito de incorporar mejoras, por ejemplo: disminuir el contenido armónico (THD), aumentar la eficiencia del convertidor, etc. Un mayor rendimiento del inversor favorece el aprovechamiento de la energía, con lo cual, disminuyen las pérdidas por calor.

3.1 Método onda cuadrada

El método *onda cuadrada* no es una técnica de modulación, se trata de un método de referencia para ser comparado con las demás técnicas. En este caso los transistores (interruptores) son controlados en parejas para obtener una señal cuadrada con un ciclo de trabajo del 50 %. El inversor de potencia monofásico en puente completo se representa en la figura 3 – 1 .

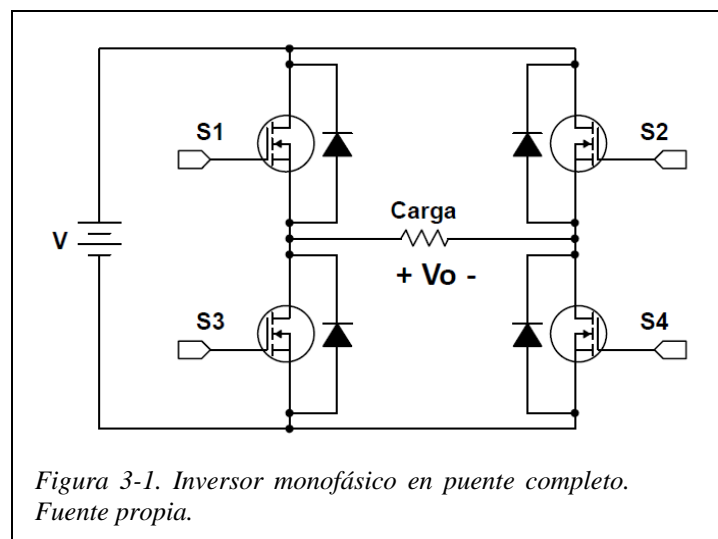
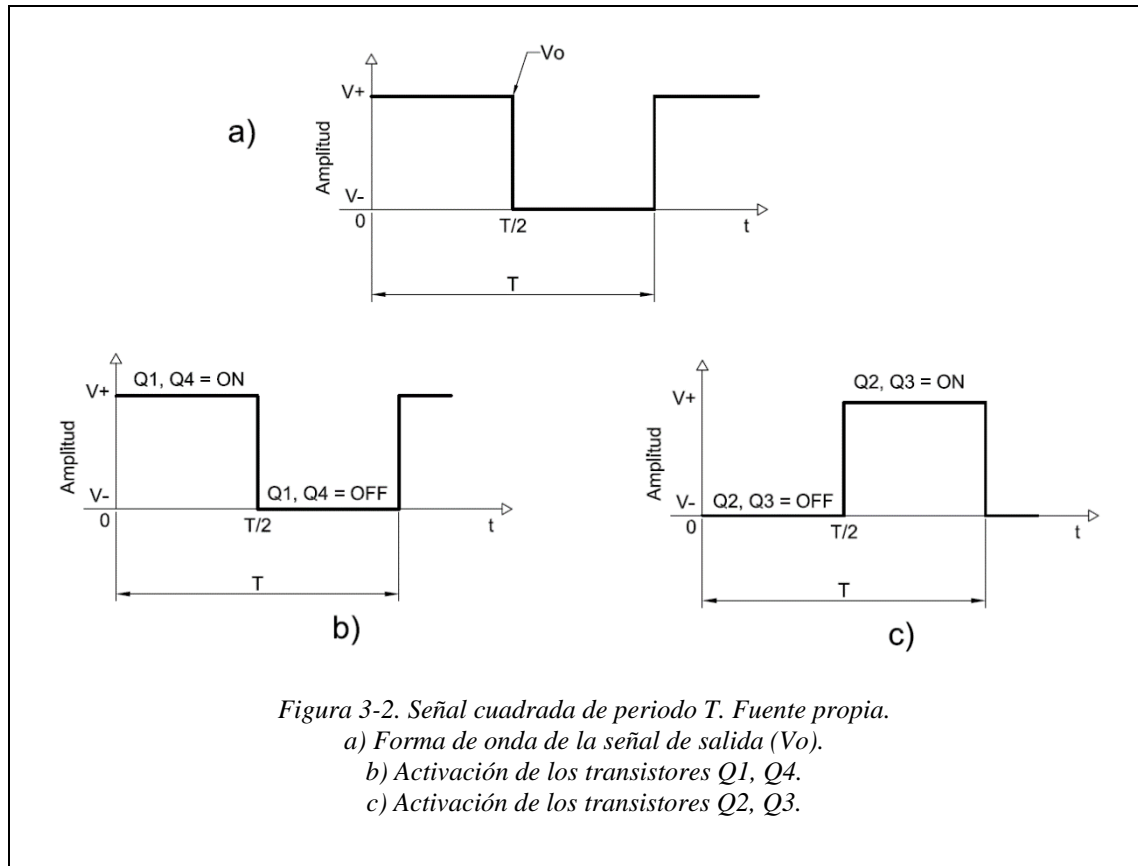


Figura 3-1. Inversor monofásico en puente completo.
Fuente propia.

Cuando se activan los transistores Q1, Q4, los transistores Q2, Q3 están desactivados (figura 3 – 2 b)), de igual manera cuando Q1, Q4 están desactivados, los transistores Q2, Q3 están activos (figura 3 – 2 c)). La figura 3 – 2 a) representa la señal de salida (V_o) del inversor.

Por tanto, para la implementación se debe cumplir que ninguna de las parejas de transistores S1, S4 y S2, S3 estén activas simultáneamente.



Sabiendo el principio de funcionamiento de un inversor monofásico, se procede a realizar la implementación en un inversor trifásico, el cual se compone de tres inversores monofásicos donde las señales de salida de cada uno está desfasadas 120° .

El voltaje instantáneo de salida se define mediante una serie de Fourier:

$$V_o = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \text{sen } n\omega t \quad (3-1)$$

Donde $\omega = 2\pi f_0$ siendo f_0 la frecuencia del voltaje de salida, la tensión $V_s = V_+$.

Para $n = 1$ en la ecuación (3 – 1) se obtiene el valor máximo de la componente fundamental:

$$V_1 = \frac{4V_s}{\pi} = 1,27V_s \quad (3-2)$$

3.2 Técnica SPWM

SPWM (*Sinusoidal Pulse Width Modulation*) o PWM sinusoidal se presentó en 1964 por Schönung [3]. La modulación se realiza en función de una señal sinusoidal (referencia) y una señal portadora (triangular). Es una técnica simple que garantiza unos resultados aceptables, presenta un buen desempeño en la distorsión armónica (THD) [2]. Este desempeño se debe a su frecuencia de conmutación constante que genera un espectro definido, con componentes en alta frecuencia y con reducción de armónicos de bajo orden.

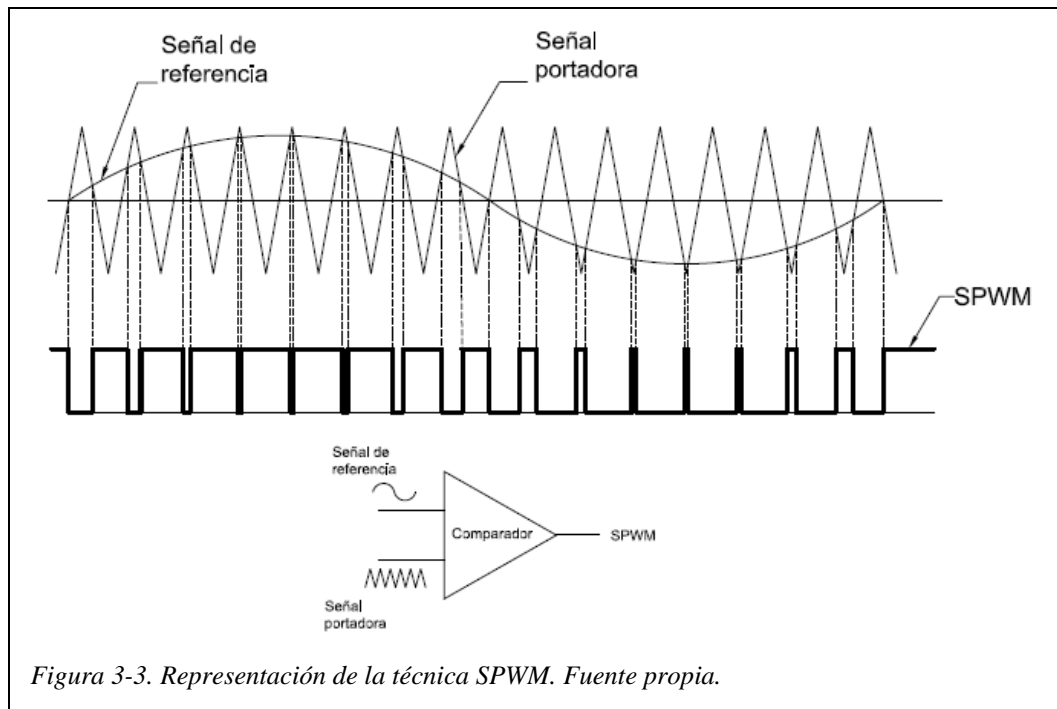


Figura 3-3. Representación de la técnica SPWM. Fuente propia.

Los tiempos que controlan la activación de los transistores en la etapa de potencia se obtienen mediante la comparación entre la señal portadora y una señal de baja frecuencia llamada referencia, se observa en la figura 3 – 3. La comparación de dichas señales genera

un tren de pulsos de duración variable que es utilizado para la conmutación de los transistores en el puente inversor [7]. En la figura 3 – 3 el comparador a su salida se tiene la señal SPWM la cual es una salida digital.

La técnica SPWM es fácil de implementar, garantiza unos resultados aceptables incluida la sobremodulación, de igual manera, presenta un buen factor de distorsión.

3.2.1 Señal moduladora

Es una señal sinusoidal o referencia que contiene la información de frecuencia, amplitud y fase, deseada. Domina el índice de modulación (M) con ello, se determina la tensión eficaz a la salida del inversor.

3.2.2 Señal Portadora

La señal portadora define el número de pulsos o intervalos. Es una señal periódica y triangular, pero existen otras variantes, diente de sierra con pendiente negativa, pendiente positiva o combinación de las tres.

Cuando la señal portadora es triangular, se presenta dos puntos de contacto con la señal modulada, quedando los pulsos de activación en el centro, denominado *double edge* (*doble borde*) [2].

3.2.3 Índice de modulación de amplitud

El término índice de modulación de amplitud (M) es el cociente entre la amplitud de la señal de referencia (A_r) y la amplitud máxima de la señal portadora (A_p). El voltaje en la salida del inversor puede ser controlado con el índice de modulación.

$$M = \frac{A_r}{A_p} \quad (3-3)$$

En este documento el índice de modulación de amplitud es la unidad.

3.2.4 Índice de modulación de frecuencia

El índice de modulación de frecuencia (N) determina la distorsión armónica de la señal de salida. Es una medida del contenido armónico de la señal. En la técnica SPWM radica la definición del ancho de cada pulso en proporción con la amplitud de la señal sinusoidal, siendo evaluada en el centro de mismo pulso.

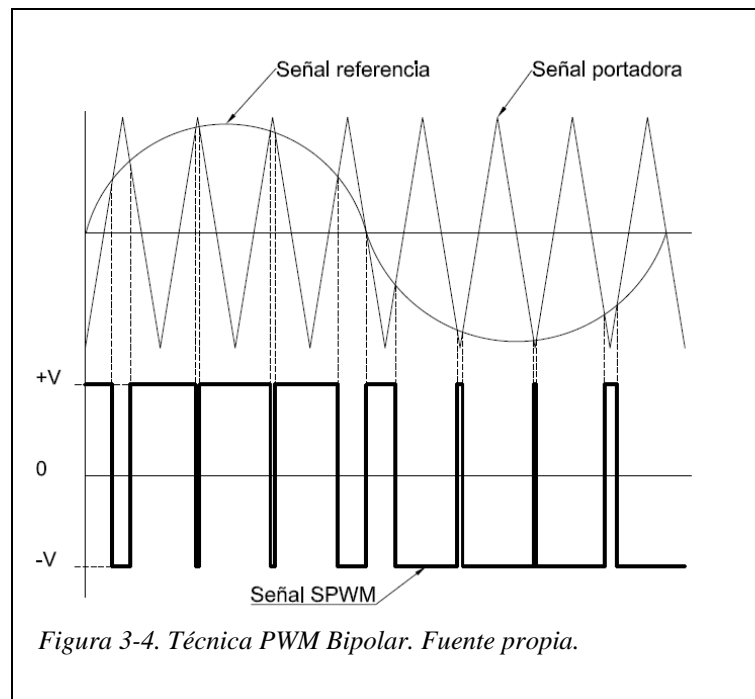
El índice de modulación de frecuencia es el cociente entre la frecuencia de la señal portadora (f_p) y la frecuencia de la señal de referencia (f_m).

$$N = \frac{f_p}{f_m} \quad (3-4)$$

Cuando N es un número entero, el modulador es *síncrono*. En este documento el índice de modulación de frecuencia es un número entero.

3.2.5 SPWM bipolar

Con la idea de minimizar la distorsión armónica en la señal, existen dos estrategias de conmutación en el inversor para la señal portadora, unipolar y bipolar.



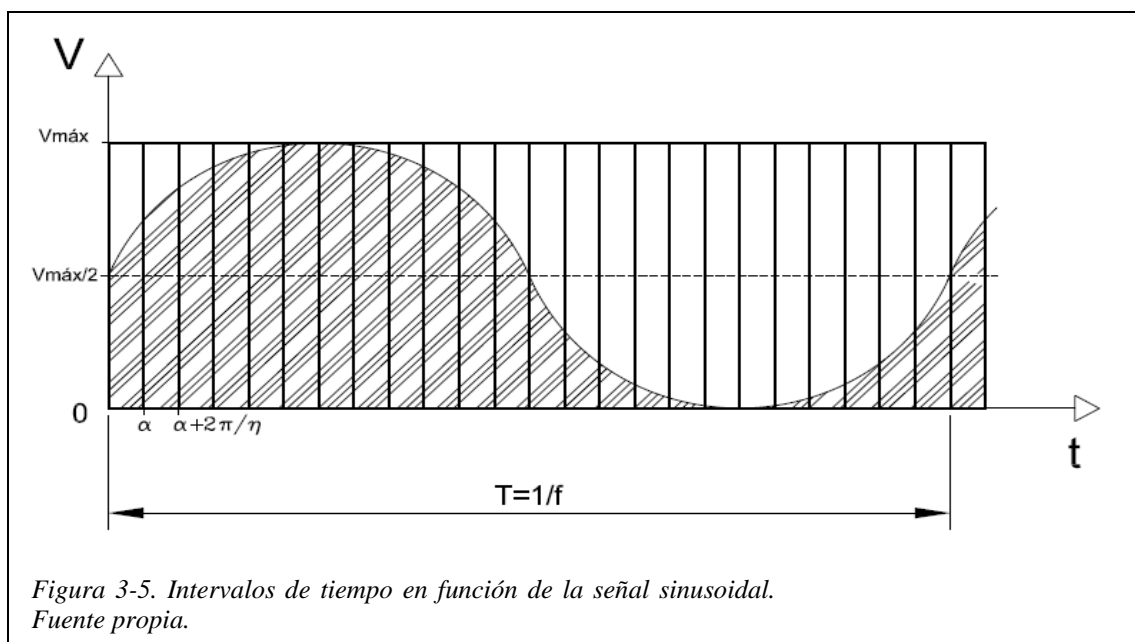
SPWM Bipolar (figura 3 – 4) asentada en la comparación de una señal de referencia (sinusoidal) y una señal portadora triangular de mayor frecuencia que varía entre $+V$ y $-V$. Cuando el valor instantáneo de la señal de referencia es superior a la señal portadora, la salida está en $+V$, si la señal de referencia es inferior a la portadora, la salida está en $-V$. La implementación de la técnica de modulación se realiza mediante SPWM bipolar.

3.2.6 SPWM calculada

La ecuación (3 – 5) define de manera algebraica [7] los valores para la activación de los dispositivos de potencia, siendo A la amplitud máxima de la señal de referencia (moduladora) y $\omega = 2\pi f$ siendo f la frecuencia deseada.

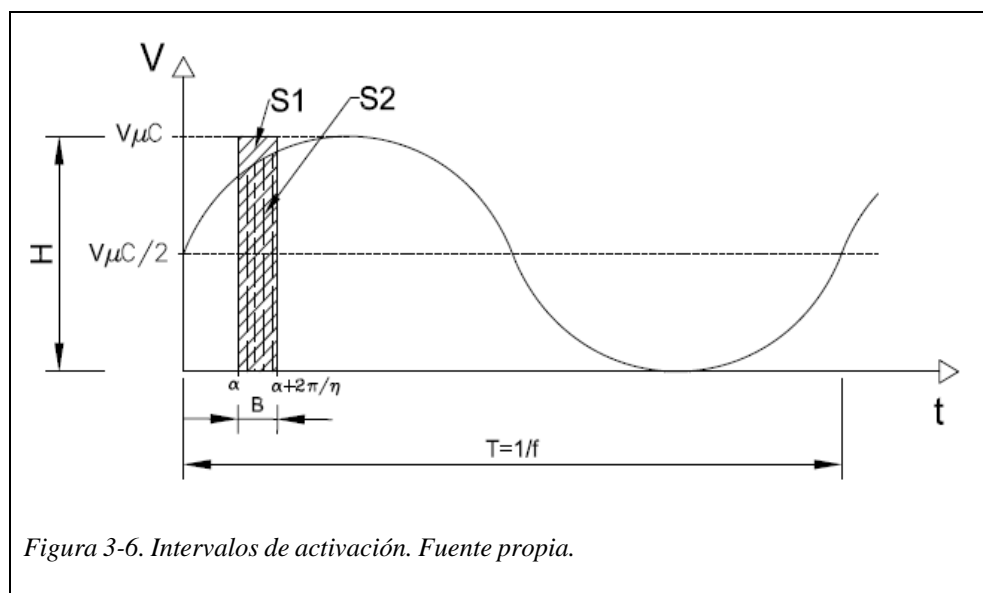
$$V(t) = A * \text{sen}(\omega t) \quad (3-5)$$

En este documento no utiliza la ecuación (3 – 5). Se analiza esta técnica para obtener una ecuación independiente [11].



En la figura 3 – 5 se presentan los intervalos de activación los cuales son dependientes de la onda sinusoidal. Para ser precisos, la cantidad de energía que aporta cada pulso (intervalo) es igual que la contribuida por la señal sinusoidal para ese mismo intervalo de

tiempo. Siendo la señal sinusoidal troceada a paso de α (radianes) la cual presenta un offset de $V_{\mu C}/2$. Partiendo desde 0° donde se tiene un desplazamiento de energía hasta llegar a 90° , valor máximo de energía aportada.



El valor máximo de tensión del μC es $V_{\mu C} = 3,3 V$. Mediante la figura 3 – 6 se realiza la obtención de la ecuación para definir los valores de tiempo de cada intervalo. Se elige un intervalo, donde la amplitud de S1 es el valor máximo y S2 la amplitud de la sinusoidal para cada intervalo. La duración de cada pulso está comprendido entre α y $\left(\alpha + \frac{2\pi}{n}\right)$ siendo n el número de intervalos en el que se divide un periodo de la señal, igualmente se corresponde con el índice de modulación de frecuencia (N). Donde H es $V_{\mu C}$ y B es el intervalo entre α y $\left(\alpha + \frac{2\pi}{n}\right)$:

$$S1 = B \times H \tag{3-6}$$

$$S2 = \int_{\alpha}^{\alpha + \frac{2\pi}{n}} \left(\frac{H}{2} \text{sen}(t) + \frac{H}{2} \right) dt \tag{3-7}$$

Igualando términos para hallar el valor de B :

$$S1 = S2 \tag{3-8}$$

$$B \times H = \int_{\alpha}^{\alpha + \frac{2\pi}{n}} \left(\frac{H}{2} \text{sen}(t) + \frac{H}{2} \right) dt \quad (3-9)$$

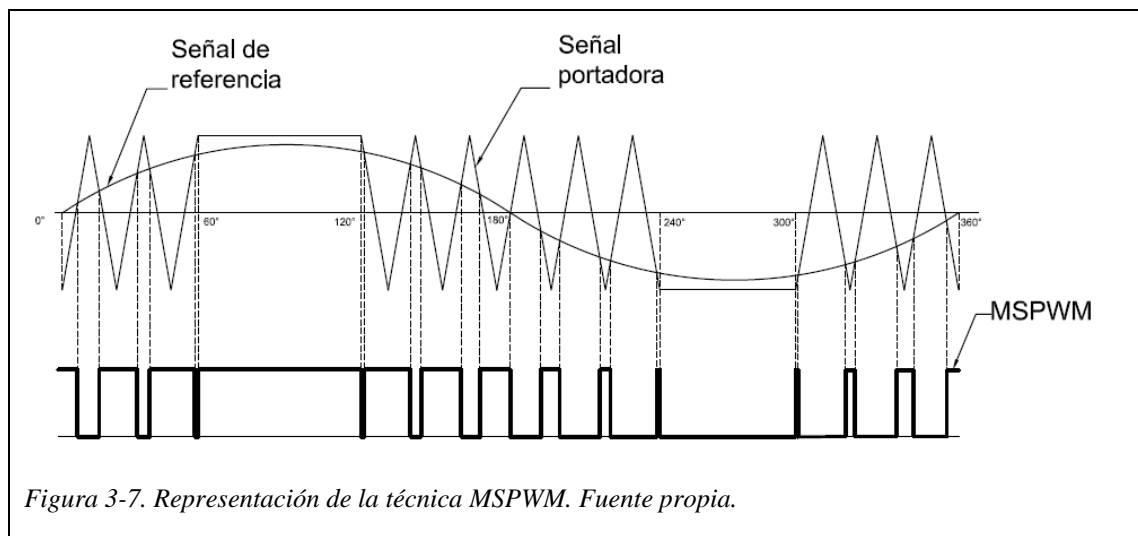
Habiendo resuelto la integral, se obtiene:

$$B = \frac{1}{2} \left(\text{Cos}(\alpha) + \text{Cos} \left(\alpha + \frac{2\pi}{n} \right) + \left(\alpha + \frac{2\pi}{n} - \alpha \right) \right) \quad (3-10)$$

Se obtiene el valor de activación B para cada intervalo en función de la señal sinusoidal. El valor B se obtiene en unidades de radianes, para obtener cada valor en unidades de tiempo se divide B entre $\omega = 2\pi f$.

3.3 Técnica MSPWM

MSPWM (*modified sinusoidal pulse-width modulation*, “*modulación por ancho de pulso sinusoidal modificada*”) consiste en aplicar una señal portadora durante unos intervalos definidos, como se aprecia en la figura 3 – 7.



Comparando dichas señales solo en el primero y último intervalo de 60° de cada medio periodo [7], es decir, solo se realiza la comparación de dichas señales en los intervalos donde tiene mucha más variación la señal de referencia.

- Semiperiodo positivo: entre 0° y 60°, de igual manera, entre 120° y 180°.

- Semiperiodo negativo: entre 180° y 240°, de igual manera, entre 300° y 360°.

Con ello, dos intervalos de tiempo la señal se mantiene en un nivel constante. En el intervalo entre 60° y 120° comprendido para el semiperiodo positivo, la señal se mantiene a nivel alto. En el intervalo entre 240° y 300° comprendido para el semiperiodo negativo, la señal se mantiene a nivel bajo. La idea es que la componente fundamental incremente y el factor de distorsión disminuya con respecto a la técnica SPWM.

La finalidad de esta técnica es mejorar las características de la técnica SPWM, ya que, presenta una alta conmutación (SPWM) reduciendo la componente fundamental. En la técnica MSPWM la componente fundamental incrementa y las componentes armónicas disminuyen.

3.3.1 MSPWM calculada

Para generar los pulsos de activación, no se realiza mediante comparación de dos señales. Se trabaja con el método empleado en el apartado 3.2.6 en el cual los intervalos de activación son dependientes de la onda sinusoidal. Solo se emplea en el primero y último intervalo de 60° de cada medio periodo.

3.3.2 Primer y último intervalo de 60°

Para el primer y último intervalos de 60° de cada semiperiodo se cumple la ecuación (3 – 10) planteada en la técnica SPWM, la cual se expone:

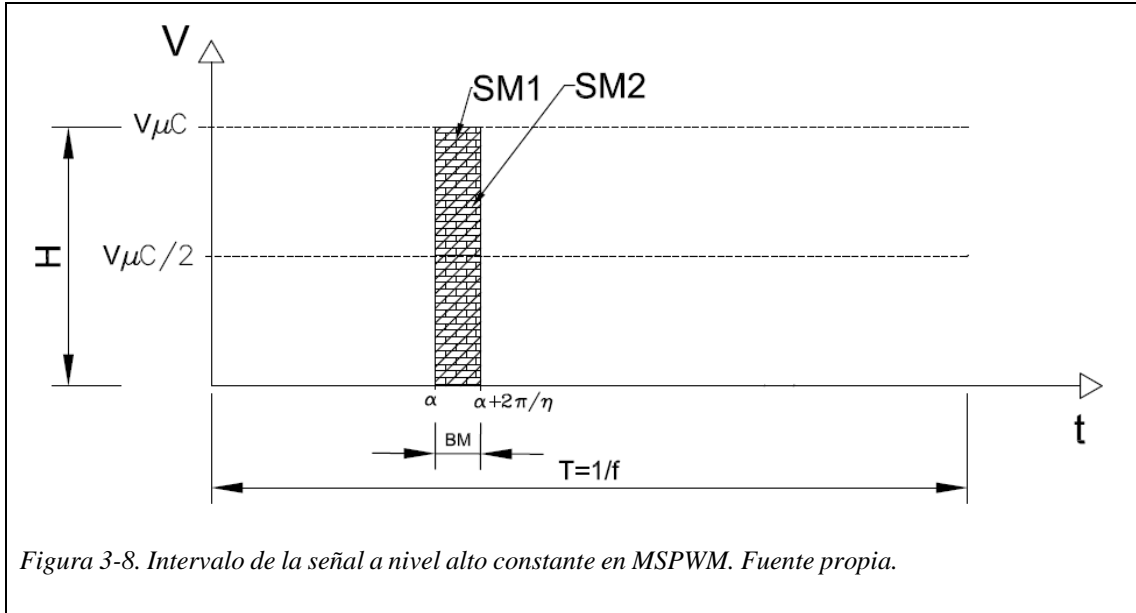
$$B = \frac{1}{2} \left(\cos(\alpha) + \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{n}\right) + \left(\alpha + \frac{2\pi}{n} - \alpha\right) \right) \quad (3-11)$$

El término n es el número de intervalos en el que se divide un periodo de la señal.

Siendo el valor de activación B para cada intervalo en función de la señal sinusoidal. El valor de B se obtiene en unidades de radianes, para obtener cada valor en unidades de tiempo se divide $\omega = 2\pi f$.

3.3.3 Intervalo constante a nivel alto

Para el intervalo en el cual la señal se mantiene a un nivel alto constante se analiza la figura 3 – 8.



Donde H es $V_{\mu C}$ y BM es el intervalo entre α y $\left(\alpha + \frac{2\pi}{n}\right)$:

$$SM1 = BM \times H \quad (3-12)$$

$$SM2 = H \times \left(\left(\alpha + \frac{2\pi}{n} \right) - \alpha \right) \quad (3-13)$$

Igualando términos:

$$SM1 = SM2 \quad (3-14)$$

$$BM \times H = H \times \left(\left(\alpha + \frac{2\pi}{n} \right) - \alpha \right) \quad (3-15)$$

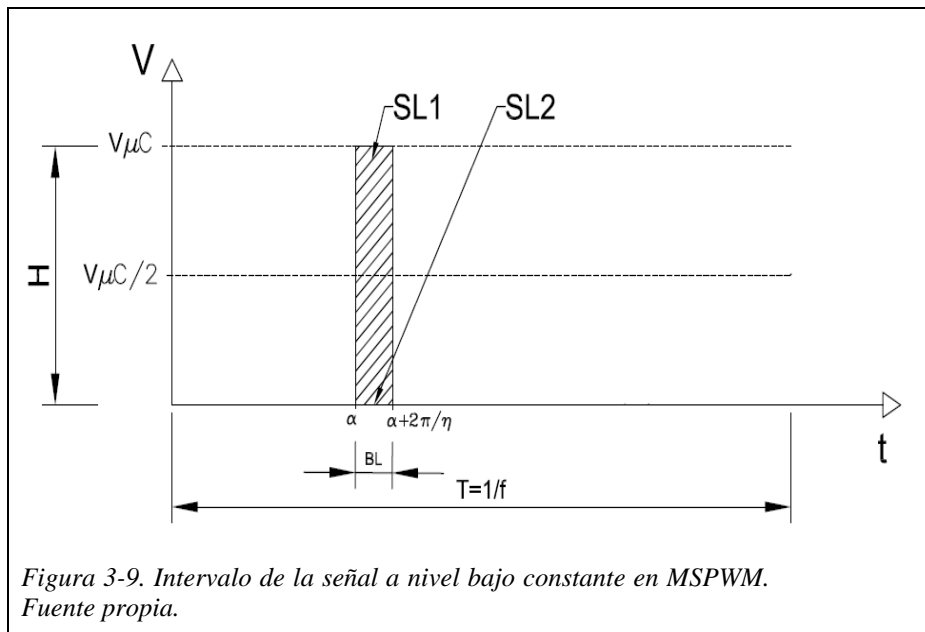
$$BM = \left(\left(\alpha + \frac{2\pi}{n} \right) - \alpha \right) \quad (3-16)$$

Se observa que el valor de cada intervalo no depende de la amplitud. La ecuación (3 – 16) define el valor de tiempo en el semiperiodo positivo, en el cual la señal se mantiene a nivel alto, el cual se corresponde a la totalidad del intervalo. El valor de

activación BM para cada intervalo se obtiene en unidades de radianes, para obtener cada valor en unidades de tiempo se divide el valor de BM entre $\omega = 2\pi f_0$.

3.3.4 Intervalo constante a nivel bajo

Para el intervalo en el cual la señal se mantiene a un nivel bajo constante se analiza la figura 3 – 9.



Siendo:

$$SL1 = SL2 \quad (3-17)$$

$$SL1 = BL \times H \quad (3-18)$$

$$SL2 = 0 \times \left(\left(\alpha + \frac{2\pi}{n} \right) - \alpha \right) \quad (3-19)$$

En este caso la amplitud de $SL2$ es cero, igualando términos:

$$BL = 0 \quad (3-20)$$

El valor de BL es cero, con ello se confirma que, para el intervalo de tiempo, la señal se mantiene a nivel bajo.

Capítulo 4

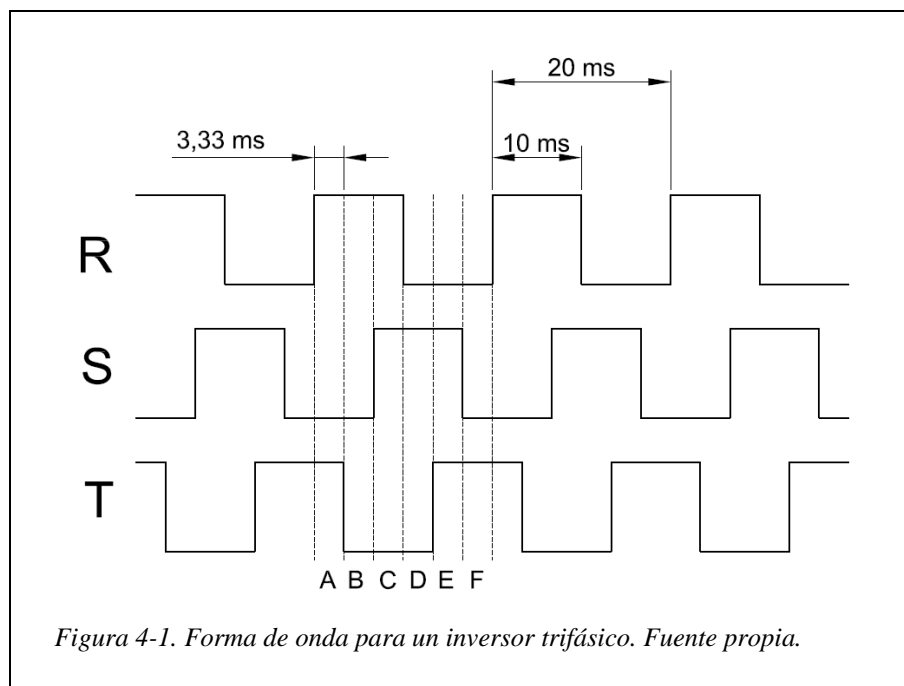
4 Cálculos

En este apartado se pone en marcha todo lo desarrollado hasta este punto. La implementación se realiza mediante tablas, con lo cual se obtienen los valores de cada técnica de modulación, los cuales se deben cargar en el temporizador y puertos del microcontrolador.

4.1 Cálculo del método onda cuadrada

En este caso la señal es una onda PWM de duración en alto del 50 % del periodo. Siendo $T = 20$ ms, el tiempo en el cual la señal debe estar a nivel alto es de 10 ms.

En este caso, se puede realizar la implementación para un inversor trifásico, con ello se debe generar tres señales desfasadas 120° .



La figura 4 – 1 representa la forma de onda para un inversor trifásico, compuesta de tres señales R, S, T. Para realizar la implementación se decide dividir el periodo de la señal en seis intervalos (A, B, C, D, E, F) siendo cada intervalo de 3,33 milisegundos, obteniendo la tabla 4 – 1.

Fase 1 (R)					
Puerto			Intervalo		
Nivel	Puerto (Hex)	Tiempo (ms)	Dec	Hex	
A	1	0x01	3,33	53.333,33	0xD055
B	1	0x01	3,33	53.333,33	0xD055
C	1	0x01	3,33	53.333,33	0xD055
D	0	0x00	3,33	53.333,33	0xD055
E	0	0x00	3,33	53.333,33	0xD055
F	0	0x00	3,33	53.333,33	0xD055

Tabla 4-1. Estados de activación I. Fuente propia.

En la tabla 4 – 1 representa los estados que debe tener la fase 1 (R). De igual manera, el valor de tiempo (3,33 ms) para cada intervalo.

La columna *Nivel* definen la activación o desactivación de la fase 1 (R). Proporcionando el valor para cada intervalo en hexadecimal, ya que, son los valores que se van a cargar cuando se realice la implementación en el μC .

El bloque intervalo define el valor de tiempo para cada intervalo (3,33 ms) para un total de 20 ms. Dicho valor de tiempo es traducido en decimal (Dec) y hexadecimal (Hex):

$$Dec = \frac{f_{\mu C}}{f_o \times (n^\circ \text{ intervalos})} \tag{4-1}$$

Donde $f_{\mu C}$ es la frecuencia de funcionamiento de μC , en este caso son 16 MHz, f_o es la frecuencia fundamental (50 Hz) y $n^\circ \text{ intervalos}$, se corresponde con el número total de intervalos en el cual se divide un periodo de la señal; siendo seis intervalos. La columna *Hex* (hexadecimal) se corresponde con el valor de *Dec*.

Fase 2 (S)					
Puerto			Intervalo		
Nivel	Puerto (Hex)	Tiempo (ms)	Dec	Hex	
A	0	0x00	3,33	53.333,33	0xD055
B	0	0x00	3,33	53.333,33	0xD055
C	1	0x01	3,33	53.333,33	0xD055
D	1	0x01	3,33	53.333,33	0xD055
E	1	0x01	3,33	53.333,33	0xD055
F	0	0x00	3,33	53.333,33	0xD055

Tabla 4-2. Estados de activación II. Fuente propia.

La tabla 4 – 2 representa los estados que debe tener la fase 2 (S). La columna *Nivel* define los estados de la patilla para la fase 2 (S). El bloque *intervalo* es el mismo que el empleado en la tabla 4 – 1.

La columna *Nivel* definen la activación o desactivación de la fase 2 (S). Proporcionando el valor para cada intervalo en hexadecimal.

Fase 3 (T)					
Puerto			Intervalo		
	Nivel	Puerto (Hex)	Tiempo (ms)	Dec	Hex
A	1	0x01	3,33	53.333,33	0xD055
B	0	0x00	3,33	53.333,33	0xD055
C	0	0x00	3,33	53.333,33	0xD055
D	0	0x00	3,33	53.333,33	0xD055
E	1	0x01	3,33	53.333,33	0xD055
F	1	0x01	3,33	53.333,33	0xD055

Tabla 4-3. Estados de activación III. Fuente propia.

La tabla 4 – 3 representa los estados que debe tener la fase 3 (T). La columna *Nivel* define los estados de la patilla para la fase 3 (T). El bloque *intervalo* es el mismo que el empleado en la tabla 4 – 1.

La columna *Nivel* definen la activación o desactivación de la fase 3 (T). Proporcionando el valor para cada intervalo en hexadecimal.

Habiendo definido seis intervalos para cada fase los cuales equivalen a seis valores de tiempo iguales, es decir, dos bytes para un total de 12 bytes (B). De igual manera, para el mismo número de intervalos (6) se define el estado de las patillas (R, S o T), siendo cada valor un byte, se obtiene 6 B. Concluyendo un total de $12 \times 3(\text{Fases}) + 6 \times 3(\text{patillas}) = 54 \text{ bytes}$ de espacio en memoria.

4.2 Cálculo de la técnica SPWM

Partiendo de los parámetros, índice de modulación de amplitud el cual es la unidad y el índice de frecuencia, el cual es 24. De igual manera, para obtener los distintos valores se ha empleado la ecuación (3 – 10), siendo:

$$B = \frac{1}{2} \left(\cos(\alpha) + \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{n}\right) + \left(\alpha + \frac{2\pi}{n} - \alpha\right) \right) \quad (4-2)$$

Para representar el valor de *B* válido se debe pasar a unidad de tiempo. Siendo la frecuencia de 50 Hz, el valor de *B* se obtiene en segundos:

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2\pi 50} \right) \left(\cos(\alpha) + \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{n}\right) + \left(\alpha + \frac{2\pi}{n} - \alpha\right) \right) \quad (4-3)$$

El número de intervalos que se divide la señal es $n = 24$ [8] [9], siendo el periodo de 20 ms cada intervalo es de 833,333 μ s. La variable n se corresponde con índice de modulación de frecuencia (N). Por tanto, mediante la ecuación (4 – 3) se obtiene la tabla 4 – 4.

Ángulo		Coseno	Valor de B		Carga (clk=16 MHz)			Error
Radianes	Grados		Radianes	Tiempo (μ s)	Teórico	Activo	Desactivo	%
0	0	1	0,1479367	470,90	7486,138	7486	362,436	0,00184987
0,2617993	15	0,96592583	0,1808499	575,66	9151,662	9152	257,670	0,00369174
0,5235987	30	0,8660254	0,2103590	669,59	10644,930	10645	163,740	0,00065961
0,7853981	45	0,70710678	0,23445308	746,29	11864,178	11864	87,046	0,00149796
1,0471975	60	0,5	0,25149017	800,52	12726,316	12726	32,815	0,00248467
1,3089969	75	0,25881905	0,26030922	828,59	13172,592	13173	4,743	0,00309788
1,5707963	90	6,1257E-17	0,26030922	828,59	13172,592	13173	4,743	0,00309788
1,8325957	105	-0,2588190	0,25149017	800,52	12726,316	12726	32,815	0,00248467
2,0943951	120	-0,5	0,23445308	746,29	11864,178	11864	87,046	0,00149796
2,3561944	135	-0,7071067	0,21035901	669,59	10644,930	10645	163,740	0,00065961
2,6179938	150	-0,8660254	0,18084991	575,66	9151,662	9152	257,670	0,00369174
2,8797932	165	-0,9659258	0,14793678	470,90	7486,138	7486	362,436	0,00184987
3,1415926	180	-1	0,11386261	362,44	5761,862	5762	470,897	0,00240336
3,4033920	195	-0,9659258	0,08094948	257,67	4096,338	4096	575,663	0,00824874
3,6651914	210	-0,8660254	0,05144038	163,74	2603,070	2603	669,594	0,00269747
3,9269908	225	-0,7071067	0,02734630	87,05	1383,822	1384	746,287	0,01284091
4,1887902	240	-0,5	0,01030922	32,82	521,684	522	800,518	0,06057466
4,4505895	255	-0,2588190	0,00149017	4,74	75,408	75	828,590	0,54411096
4,7123889	270	-1,837E-16	0,00149017	4,74	75,408	75	828,590	0,54411096
4,9741883	285	0,25881905	0,01030922	32,82	521,684	522	800,518	0,06057466
5,2359877	300	0,5	0,02734630	87,05	1383,822	1384	746,287	0,01284091
5,4977871	315	0,70710678	0,05144038	163,74	2603,070	2603	669,594	0,00269747
5,7595865	330	0,8660254	0,08094948	257,67	4096,338	4096	575,663	0,00824874
6,0213859	345	0,96592583	0,11386261	362,44	5761,862	5762	470,897	0,00240336
6,2831853	360	1	0,14793678	470,90	7486,138	7486	362,436	0,00184987

Tabla 4-4. Obtención de valores. Técnica SPWM. Fuente propia.

Se ha empleado una hoja de cálculo para obtener los distintos valores de tiempo en cada intervalo. La tabla 4 – 4 representa desde 0° hasta 360° para comprobar la iteración de los valores. El único rango de valores que no se repite es entre 0° a 90°, desde ese punto se reiteran los términos.

La tabla 4 – 4 está compuesta de varias agrupaciones de columnas, las cuales se detallan.

Ángulo, define el intervalo en radianes y grados.

Coseno, son los valores que se obtienen al hallar el coseno de cada intervalo en radianes.

Valor B, se compone de dos columnas (*radianes, tiempo*); *tiempo* emplea la ecuación (4 – 2) y obtiene el valor de *B* en radianes. *Radianes* emplea la ecuación (4 – 3), obtiene el valor de *B* en unidades de tiempo (μ s, microsegundos).

Carga, se compone de tres columnas (*teórico*, *activo*, *desactivo*); *teórico* son los valores que se obtiene al emplear $(4 - 1)$, siendo $f_{\mu C} = 16 \text{ MHz}$ y el valor de $n^\circ \text{ intervalos} = n = 24$ obteniendo el valor de cada intervalo de 13.333,3 (decimal) el cual equivale en tiempo a 833,33 μs . empleando:

$$Teórico = \frac{tiempo \times decimal}{intervalo_{tiempo}} \quad (4-4)$$

Se define el valor teórico para cada intervalo. El dato obtenido no es un valor entero. Lo cual, la columna *activo* se compone de los valores enteros para cuando la señal debe estar a nivel alto. La columna *desactivo* se corresponde con los valores, cuando la señal debe estar a nivel bajo. El datos de la columna *Activo* y *Desactivo* en el sistema hexadecimal se

Error, dicha columna enseña el error cometido al pasar el valor *teórico* (con decimales) a *activo* (entero).

Teniendo presente que el tiempo máximo del pulso puede ser de 833,33 μs (24 intervalos iguales en un periodo de 20 ms) se observar en la tabla 4 – 4, el valor máximo de tiempo es para los pulsos situados alrededor de 90° siendo 828,59 μs , con ello, confirma el correcto funcionamiento. Las otras dos fases (S, T) emplean la misma (tabla 4 – 6) pero desfasada 120° en el caso de la fase 2 (S) y 240° en el caso de la fase 3 (T).

Intervalo	Activo		Desactivo/2		P1 (R)		
	Dec	Hex	Des	Hex	OFF ₁	ON	OFF ₂
1	7486	0x1D5F	2894	0x0B4E	0x00	0x01	0x00
2	9152	0x23E8	2057	0x0809	0x00	0x01	0x00
3	10645	0x29C4	1307	0x051B	0x00	0x01	0x00
4	11864	0x2E8C	695	0x02B7	0x00	0x01	0x00
5	12726	0x31EE	262	0x0106	0x00	0x01	0x00
6	13173	0x33AE	38	0x0026	0x00	0x01	0x00
7	13173	0x33AE	38	0x0026	0x00	0x01	0x00
8	12726	0x31EE	262	0x0106	0x00	0x01	0x00
9	11864	0x2E8C	695	0x02B7	0x00	0x01	0x00
10	10645	0x29C4	1307	0x051B	0x00	0x01	0x00
11	9152	0x23E8	2057	0x0809	0x00	0x01	0x00
12	7486	0x1D5F	2894	0x0B4E	0x00	0x01	0x00
13	5762	0x169B	3760	0x0EB0	0x00	0x01	0x00
14	4096	0x1012	4596	0x11F4	0x00	0x01	0x00
15	2603	0x0A36	5346	0x14E2	0x00	0x01	0x00
16	1384	0x056E	5958	0x1746	0x00	0x01	0x00
17	522	0x020C	6391	0x18F7	0x00	0x01	0x00
18	75	0x004C	6615	0x19D7	0x00	0x01	0x00
19	75	0x004C	6615	0x19D7	0x00	0x01	0x00

20	522	0x020C	6391	0x18F7	0x00	0x01	0x00
21	1384	0x056E	5958	0x1746	0x00	0x01	0x00
22	2603	0x0A36	5346	0x14E2	0x00	0x01	0x00
23	4096	0x1012	4596	0x11F4	0x00	0x01	0x00
24	5762	0x169B	3760	0x0EB0	0x00	0x01	0x00
25	7486	0x1D5F	2894	0x0B4E	0x00	0x01	0x00

Tabla 4-5. Valores para temporizador y puerto de salida. Técnica SPWM. Fuente propia.

La tabla 4 – 5 se corresponde con la fase 1 (R). El bloque *Activo* es el valor en el cual la señal debe estar a nivel alto, definido en el sistema decimal y hexadecimal. El bloque *Desactivo/2* es el valor en el cual la señal debe estar a nivel bajo dividido entre 2, con ello, se centra el pulso a nivel alto. Definido en el sistema decimal y hexadecimal. El bloque *PI (R)* define el estado de las patillas del puerto 1, compuesto por dos bytes cuando la señal está a nivel bajo y un byte cuando la señal está a nivel alto. De igual manera, la tabla 4 – 5 se emplea en la fase S para el puerto 2 y en la fase T para el puerto 3.

Habiendo definido los 24 intervalos para cada fase, lo cual equivale a $24 \times 2(\text{activo}, \text{desactivo}) = 48$ valores de tiempo. Siendo 4 bytes por cada intervalo para un total de 96 bytes (B). De igual manera, el mismo número de intervalos (24) se define el estado de las patillas (R, S o T), para el caso de la fase 1 (R) siendo cada intervalo 3 byte, se obtiene 72 B. Se concluye, un total de $96 \times 3(\text{Fases}) + 72 \times 3(\text{patillas}) = 504 \text{ bytes}$ de espacio en memoria para el conjunto de las tres fases (R, S, T).

El método de cálculo es diferencial respecto al término anterior del ángulo, la posición de los pulsos es desplazada respecto al origen de la señal. Utilizar los datos obtenidos da lugar a una deformación de la sinusoidal. En su lugar, una vez entendido el principio de funcionamiento, se debe organizar para que los pulsos de activación queden centrados respecto de cada intervalo.

4.3 Cálculo de la técnica MSPWM

En esta técnica se emplean los parámetros, índice de modulación de amplitud el cual es la unidad y el índice de frecuencia, el cual es 24.

Para obtener los valores de cada pulso se utiliza las mismas ecuaciones empleadas en la técnica SPWM (4 – 2) y (4 – 3), excepto en dos intervalos:

- Intervalo comprendido entre 60° y 120° la señal debe mantenerse a nivel alto.

- Intervalo comprendido entre 240° y 300° la señal debe mantenerse a nivel bajo.

Para el primer y último intervalos de 60° de cada semiperiodo:

$$B = \frac{1}{2} \left(\cos(\alpha) + \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{n}\right) + \left(\alpha + \frac{2\pi}{n} - \alpha\right) \right) \quad (4-5)$$

Para representar el valor de B válido se debe pasar a unidad de tiempo. Siendo la frecuencia de 50 Hz, el valor de B se obtiene en segundos:

$$B = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2\pi 50} \right) \left(\cos(\alpha) + \cos\left(\alpha + \frac{2\pi}{n}\right) + \left(\alpha + \frac{2\pi}{n} - \alpha\right) \right) \quad (4-6)$$

El número de intervalos que se divide la señal es $n = 24$ [8] [9], siendo el periodo de 20 ms cada intervalo es de 833,333 μ s.

Para los intervalos comprendidos entre 60° y 120°, en los que la señal se mantiene a nivel alto, se emplea:

$$B = \left(\left(\alpha + \frac{2\pi}{n} \right) - \alpha \right) \quad (4-7)$$

Para que el valor de B sea válido se debe pasar a unidad de tiempo.

Los intervalos comprendidos entre 240° y 300°, en los que la señal se mantiene a nivel bajo, se emplea:

$$B = 0 \quad (4-8)$$

Mediante las ecuaciones (4 – 6), (4 – 7) y (4 – 8) se obtiene la tabla 4 – 6.

Ángulo		Valor de B			Carga (clk=16 MHz)			Error
Radianes	Grados	Coseno	Radianes	Tiempo (μ s)	Teórico	Activo	Desactivo	%
0	0	1	0,14793678	470,90	7486,138	7486	362,436	0,00184987
0,2617993	15	0,96592583	0,18084991	575,66	9151,662	9152	257,670	0,00369174
0,5235987	30	0,8660254	0,21035901	669,59	10644,930	10645	163,740	0,00065961
0,7853981	45	0,70710678	0,23445308	746,29	11864,178	11864	87,046	0,00149796
1,0471975	60	---	0,26179939	833,33	13248,000	13248	0,000	0,00000000
1,3089969	75	---	0,26179939	833,33	13248,000	13248	0,000	0,00000000
1,5707963	90	---	0,26179939	833,33	13248,000	13248	0,000	0,00000000
1,8325957	105	---	0,26179939	833,33	13248,000	13248	0,000	0,00000000
2,0943951	120	-0,5	0,23445308	746,29	11864,178	11864	87,046	0,00149796
2,3561944	135	-0,7071067	0,21035901	669,59	10644,930	10645	163,740	0,00065961
2,6179938	150	-0,8660254	0,18084991	575,66	9151,662	9152	257,670	0,00369174
2,8797932	165	-0,9659258	0,14793678	470,90	7486,138	7486	362,436	0,00184987
3,1415926	180	-1	0,11386261	362,44	5761,862	5762	470,897	0,00240336
3,4033920	195	-0,9659258	0,08094948	257,67	4096,338	4096	575,663	0,00824874
3,6651914	210	-0,8660254	0,05144038	163,74	2603,070	2603	669,594	0,00269747
3,9269908	225	-0,7071067	0,02734630	87,05	1383,822	1384	746,287	0,01284091
4,1887902	240	---	0,00000000	0,00	0,000	0	833,333	0,00000000

4,4505895	255	---	0,00000000	0,00	0,000	0	833,333	0,00000000
4,7123889	270	---	0,00000000	0,00	0,000	0	833,333	0,00000000
4,9741883	285	---	0,00000000	0,00	0,000	0	833,333	0,00000000
5,2359877	300	0,5	0,02734630	87,05	1383,822	1384	746,287	0,01284091
5,4977871	315	0,70710678	0,05144038	163,74	2603,070	2603	669,594	0,00269747
5,7595865	330	0,8660254	0,08094948	257,67	4096,338	4096	575,663	0,00824874
6,0213859	345	0,96592583	0,11386261	362,44	5761,862	5762	470,897	0,00240336
6,2831853	360	1	0,14793678	470,90	7486,138	7486	362,436	0,00184987

Tabla 4-6. Obtención de valores. Técnica MSPWM. Fuente propia.

Se ha empleado una hoja de cálculo para obtener los distintos valores de tiempo en cada intervalo de los pulsos. La tabla representa desde 0° hasta 360° para comprobar la iteración de los valores.

Observar así mismo el valor máximo de tiempo cuando la señal está a nivel alto, es para los pulsos comprendidos entre 60° y 120°, donde cada intervalo se corresponde con 833,333 μs, de igual manera el valor mínimo de tiempo (0 μs) cuando la señal está a nivel alto, es para los pulsos comprendidos entre 240° y 300°. Con ello se obtiene 24 intervalos iguales en un periodo de 20 ms.

El significado de cada columna (ángulo, valor de B, etc.) de la tabla 4 – 6, tienen el mismo significado de la tabla 4 – 4 del apartado 4.2. Las otras dos fases (S, T) emplean la misma tabla 4 – 6 pero desfasada 120° en el caso de la fase 2 (S) y 240° en el caso de la fase 3 (T).

Intervalo	Activo		Desactivo/2		P1 (R)		
	Dec	Hex	Des	Hex	OFF ₁	ON	OFF ₂
1	7519	0x1D5F	2894	0x0B4E	0x00	0x01	0x00
2	9192	0x23E8	2057	0x0809	0x00	0x01	0x00
3	10692	0x29C4	1307	0x051B	0x00	0x01	0x00
4	11916	0x2E8C	695	0x02B7	0x00	0x01	0x00
5	13306	0x33FA	0	0x0000	0x01	0x01	0x01
6	13306	0x33FA	0	0x0000	0x01	0x01	0x01
7	13306	0x33FA	0	0x0000	0x01	0x01	0x01
8	13306	0x33FA	0	0x0000	0x01	0x01	0x01
9	11916	0x2E8C	695	0x02B7	0x00	0x01	0x00
10	10692	0x29C4	1307	0x051B	0x00	0x01	0x00
11	9192	0x23E8	2057	0x0809	0x00	0x01	0x00
12	7519	0x1D5F	2894	0x0B4E	0x00	0x01	0x00
13	5787	0x169B	3760	0x0EB0	0x00	0x01	0x00
14	4114	0x1012	4596	0x11F4	0x00	0x01	0x00
15	2614	0x0A36	5346	0x14E2	0x00	0x01	0x00
16	1390	0x056E	5958	0x1746	0x00	0x01	0x00
17	0	0x0000	6653	0x19FD	0x00	0x00	0x00
18	0	0x0000	6653	0x19FD	0x00	0x00	0x00
19	0	0x0000	6653	0x19FD	0x00	0x00	0x00
20	0	0x0000	6653	0x19FD	0x00	0x00	0x00
21	1390	0x056E	5958	0x1746	0x00	0x01	0x00
22	2614	0x0A36	5346	0x14E2	0x00	0x01	0x00
23	4114	0x1012	4596	0x11F4	0x00	0x01	0x00
24	5787	0x169B	3760	0x0EB0	0x00	0x01	0x00
25	7519	0x1D5F	2894	0x0B4E	0x00	0x01	0x00

Tabla 4-7. Valores para el temporizador y puerto de salida. Técnica MSPWM. Fuente propia.

La tabla 4 – 7 se corresponde con una fase 1 (R). El bloque *Activo* es el valor en el cual la señal debe estar a nivel alto, definido en el sistema decimal y hexadecimal. El bloque *Desactivo/2* es el valor en el cual la señal debe estar a nivel bajo dividido entre 2, con ello, se centra el pulso a nivel alto. Definido en el sistema decimal y hexadecimal. El bloque *PI (R)* define el estado de las patillas del puerto 1, compuesto por dos bytes cuando la señal está a nivel bajo y un byte cuando la señal está a nivel alto. De igual manera, la tabla 4 – 7 se emplea en la fase S para el puerto 2 y en la fase T para el puerto 3.

Habiendo definido los 24 intervalos para cada fase por 2 (activo, desactivo), lo cual equivalen a $24 \times 2 = 48$ valores de tiempo. Siendo 4 bytes por cada intervalo para un total de 96 bytes (B). De igual manera, el mismo número de intervalos (24) se define el estado de las patillas (R, S o T), para el caso de la fase 1 (R) siendo cada intervalo 3 byte, se obtiene 72 B. Se concluye, un total de $96 \times 3(\text{Fases}) + 72 \times 3(\text{patillas}) = 504 \text{ bytes}$ de espacio en memoria para el conjunto de las tres fases (R, S, T).

El método de cálculo de la técnica MSPWM es diferencial respecto al término anterior del ángulo, la posición de los pulsos es desplazada respecto al origen de la señal. Utilizar tal cual los datos obtenidos da lugar a una deformación de la senoidal. En su lugar, una vez entendido el principio de funcionamiento, se debe organizar para que los pulsos de activación queden centrados respecto de cada intervalo.

La idea de usar como unidad de tiempo los milisegundos (μs) meramente es agilizar la implementación del algoritmo de modulación por medio de μC . Sin embargo, esto no deja de ser una cuestión propia. De igual manera, la unidad de tiempo puede ser cualquiera, siempre y cuando cumpla con las especificaciones de exactitud en los valores de tiempo calculados.

Capítulo 5

5 Implementación

Los métodos desarrollados, onda cuadrada, SPWM, MSPWM, se han implementado utilizando microprocesador comercial de bajo coste de la compañía TEXAS INSTRUMENTS. La implementación se ha realizado por medio de tablas de valores.

La implementación por tablas es una forma de desempeñar las técnicas tratadas en este documento y con ello, utilizar pocos recursos del μC . Los valores de tiempo se calculan mediante las ecuaciones planteadas anteriormente, obteniendo como finalidad los valores que se almacenan por medio de tablas. Dichos valores se guardan en un espacio de memoria y el programa carga cada valor de forma secuencial y cíclica en el temporizador. En este tipo de implementación el μC no realiza ningún cálculo para la obtención de los valores de tiempo.

5.1 Requisitos mínimos de sistema

Para realizar la implementación por tablas, el dispositivo de control o microcontrolador debe tener como mínimo los siguientes recursos:

- Espacio de almacenamiento.
- Operar con tablas.
- Temporizador de 16 bits.
- Operatividad por interrupciones.
- Cambio de secuencia.

Espacio para guardar los valores

Se analiza detalladamente la capacidad mínima que debe tener el espacio de memoria para almacenar los distintos valores para cada una de las técnicas.

En la técnica onda cuadrada se deben guardar 54 bytes de espacio en memoria para el conjunto de las tres fases (R, S, T). Obtenido en el apartado 4 – 1.

- En la técnica SPWM se deben guardar 504 bytes de espacio en memoria para el conjunto de las tres fases (R, S, T). Obtenido en el apartado 4 – 2.
- En la técnica MSPWM se deben guardar 504 bytes de espacio en memoria para el conjunto de las tres fases (R, S, T). Obtenido en el apartado 4 – 3.

Para un total de 1062 B de espacio de memoria requerido para implementar las técnicas.

	ACCESS	MSP430FR2355	MSP430FR2353
Memory (FRAM) Main: interrupt vectors and signatures Main: code memory	Read/Write (Optional Write Protect) ⁽¹⁾	32KB FFFFh to FF80h FFFFh to 8000h	16KB FFFFh to FF80h FFFFh to C000h
RAM	Read/Write	4KB 2FFFh to 2000h	2KB 27FFh to 2000h
Information memory (FRAM)	Read/Write ⁽²⁾	512 bytes 19FFh to 1800h	512 bytes 19FFh to 1800h
Driver library and FFT library (ROM)	Read only	20KB FAC00h to FFBFFh	20KB FAC00h to FFBFFh
Peripherals	Read/Write	4KB 0FFFh to 0020h	4KB 0FFFh to 0020h
Tiny RAM	Read/Write	26 bytes 001Fh to 0006h	26 bytes 001Fh to 0006h
Reserved ⁽³⁾	Read	6 bytes 0005h to 0000h	6 bytes 0005h to 0000h

Figura 5-1. Capacidad y organización de memoria para MSP430FR2355.
Fuente [13], pág. 65.

La figura 5 – 1 corresponde a la tabla *Organización de memoria*, del manual del fabricante en la cual la capacidad y organización memoria de 32 KB (*dispositivo elegido MSP430FR2355*) comprendida entre 0x8000 – 0xFFFF para FRAM, capacidad suficiente para almacenar los datos que son volcados al temporizador y puerto I/O (*input/output (entrada/salida)*). Analizando el valor de memoria requerido, ocupa un 5 % de la capacidad total.

Operar con tablas

El fabricante permite mediante comandos realizar fácilmente el direccionamiento de los datos almacenados.

As, Ad	Addressing Mode	Syntax	Description
00, 0	Register	Rn	Register contents are operand.
01, 1	Indexed	X(Rn)	(Rn + X) points to the operand. X is stored in the next word, or stored in combination of the preceding extension word and the next word.
01, 1	Symbolic	ADDR	(PC + X) points to the operand. X is stored in the next word, or stored in combination of the preceding extension word and the next word. Indexed mode X(PC) is used.
01, 1	Absolute	&ADDR	The word following the instruction contains the absolute address. X is stored in the next word, or stored in combination of the preceding extension word and the next word. Indexed mode X(SR) is used.
10, -	Indirect Register	@Rn	Rn is used as a pointer to the operand.
11, -	Indirect Autoincrement	@Rn+	Rn is used as a pointer to the operand. Rn is incremented afterwards by 1 for .B instructions, by 2 for .W instructions, and by 4 for .A instructions.
11, -	Immediate	#N	N is stored in the next word, or stored in combination of the preceding extension word and the next word. Indirect autoincrement mode @PC+ is used.

Figura 5-2. Modo de direccionamiento MSP430FR2355. Fuente [12], pág. 134.

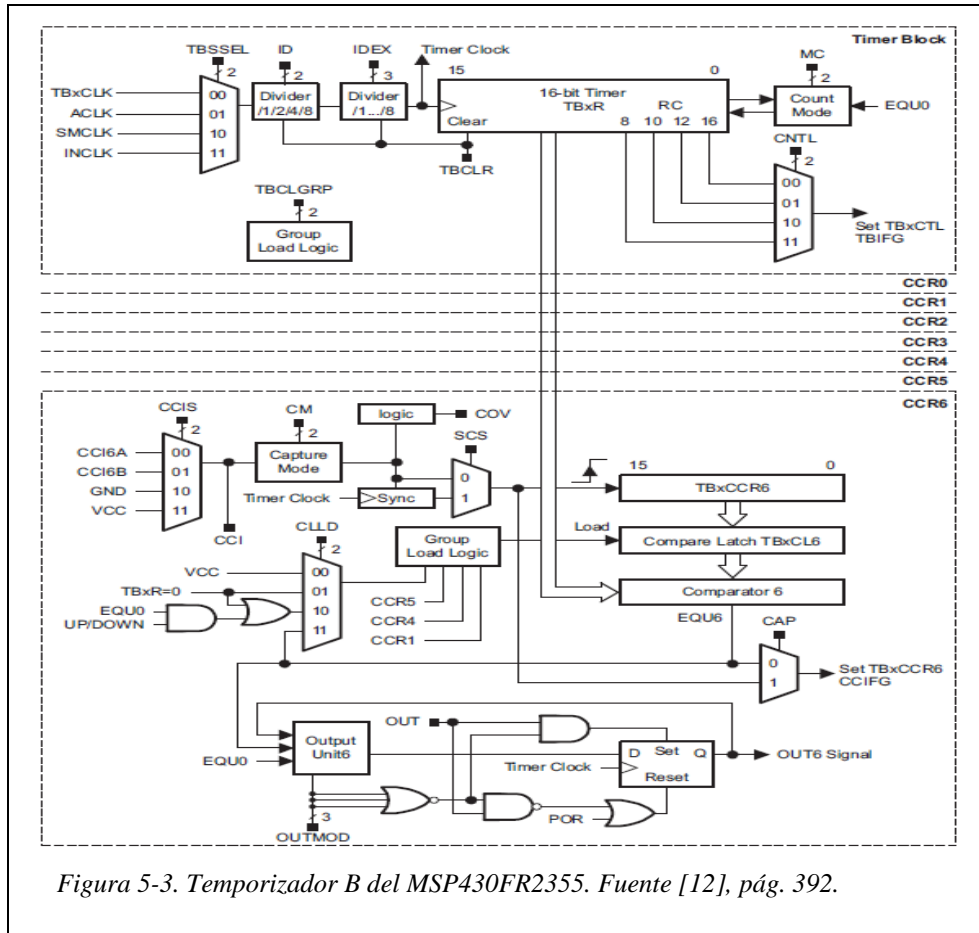
La figura 5 – 2 representa los modos de direccionamiento que permite el dispositivo. Analizando cada uno, se decide operar mediante el modo “*Indirect autoincrement*” (modo indirecto autoincremento). Dicho modo de funcionamiento carga un dato en el temporizador o puerto e incrementa en dos byte el direccionamiento del puntero, requiriendo para ello 5 periodos de reloj. Se elige este modo por presentar menor número de periodos de reloj en comparación con los demás.

Temporizador de 16 bits

Se emplean contadores digitales para realizar la cuenta de cada intervalo de tiempo con exactitud. Estos contadores tienen su funcionamiento o señal de control en el “reloj” el cual es una señal periódica y se emplea para establecer el valor de *tiempo base* en el temporizador.

Para una señal de periodo 20 ms (50 Hz) con intervalos como máximo de 833,33 μ s (para técnicas SPWM, MSPWM) el temporizador debe ser como mínimo de 10 bits.

El μ C elegido (MSP430FR2355) cumple los requisitos mínimos, ya que el dispositivo cuenta con dos temporizadores (Timer_A, Timer_B), Timer_A tiene un valor de cuenta fijo de 16 bits ([12], pág. 368) y el Timer_B es programable para 8, 10, 12, 16 bits ([12], pág. 391) .



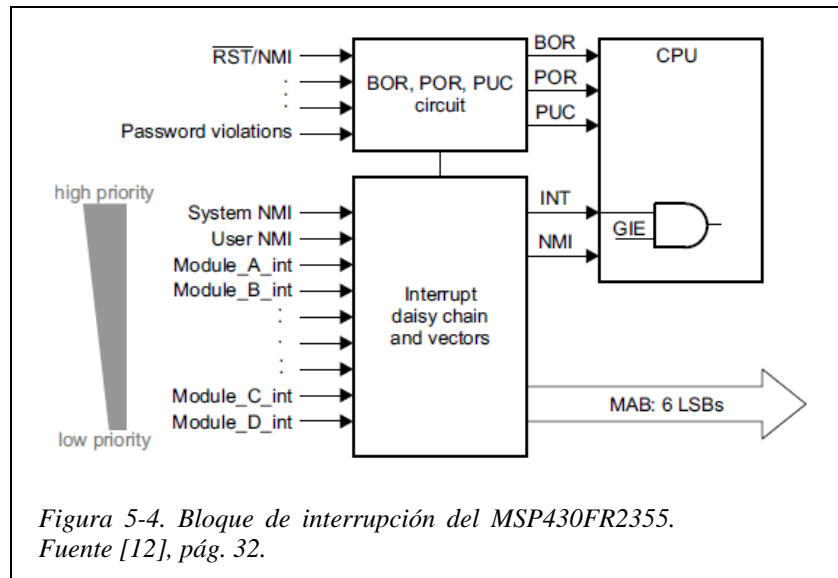
La figura 5 – 3 describe el temporizador B el cual es de 16 bits y puede trabajar por interrupciones; pudiendo generar un máximo de seis interrupciones (CCR1, CCR2, CCR3, CCR4, CCR5, CCR6), la interrupción CCR0 está asociada con la interrupción TBIFG la cual se ejecuta cuando el valor de cuenta llega a cero para el modo de cuenta ascendente.

Siendo los temporizadores de 16 bits y trabajando a una frecuencia de 16 MHz se puede tener un tiempo máximo 4,096 ms (244 Hz). Para el caso de necesitar aumentar la frecuencia de la señal modulada se puede tener hasta un valor de tiempo mínimo de 62,5 ns (16 MHz). El valor de cuenta mínimo entre todas las técnicas es 76d (técnica SPWM), se obtiene una frecuencia máxima de 21 kHz, valor de frecuencia que se encuentra dentro del rango de funcionamiento del dispositivo.

Operatividad por interrupciones

Para obtener una señal modulada la cual cumpla con los tiempos de cada intervalo, la ejecución debe realizarse con precisión. Para realizarlo, no basta con disponer de contadores y comparar valores, debe presentar alta precisión en la base de tiempo.

La operatividad por interrupciones desempeña un rol importante para garantizar los intervalos de tiempo en la modulación, permitiendo independizar del resto del programa.



En la figura 5 – 4 se observa la configuración que presenta el dispositivo para ejecutar las interrupciones. Su funcionamiento es modo interrupción vectorizada, las interrupciones pueden ser enmascaradas con el bit GIE. Presenta dos niveles de NMI (*Non Maskable Interrupt*, interrupción no enmascarable):

- **Sistema NMI** (SNMI, *Sistem Non Maskable Interrupt*, interrupción no enmascarable del sistema), se configura la patilla RST/NMI en modo NMI o se genera una falla en el oscilador.
- **Usuario NMI** (UNMI, *User Non Maskable Interrupt*, usuario Interrupción no enmascarable), se genera cuando existen errores de FRAM, acceso a memoria disponible, entre otros eventos.

Las NMI son habilitadas por interrupción individual. Cuando se admite una interrupción de NMI, otros NMI de ese nivel se desactivan automáticamente para impedir el anidamiento de NMI consecutivos del propio nivel. Cuando se recibe una interrupción,

todos los bits de activación se reestablecen y el usuario debe configurar los bits para realizar de nuevo la habilitación de la interrupción.

La ejecución del programa comienza en la dirección almacenada en el vector NMI como se muestra en la figura 5 – 5. Solo se muestra hasta la prioridad 51 pero existe hasta la prioridad 39, siendo el vector de interrupción reservado para el puerto 4.

INTERRUPT SOURCE	INTERRUPT FLAG	SYSTEM INTERRUPT	WORD ADDRESS	PRIORITY
System Reset Power up, brownout, supply supervisor External reset RST Watchdog time-out, key violation FRAM uncorrectable bit error detection Software POR, BOR FLL unlock error	SVSHIFG PMMRSTIFG WDTIFG PMMPORIFG, PMMBORIFG SYSRSTIV FLLULPUC	Reset	FFFEh	63, Highest
System NMI Vacant memory access JTAG mailbox FRAM access time error FRAM bit-error detection	VMAIFG JMBINIFG, JMBOUTIFG CBDIFG, UBDIFG	Non-Maskable	FFFCh	62
User NMI External NMI Oscillator fault	NMIIFG OFIFG	Non-Maskable	FFFAh	61
Timer0_B3	TB0CCR0 CCIFG0	Maskable	FFF8h	60
Timer0_B3	TB0CCR1 CCIFG1, TB0CCR2 CCIFG2, TB0IFG (TB0IV)	Maskable	FFF6h	59
Timer1_B3	TB1CCR0 CCIFG0	Maskable	FFF4h	58
Timer1_B3	TB1CCR1 CCIFG1, TB1CCR2 CCIFG2, TB1IFG (TB1IV)	Maskable	FFF2h	57
Timer2_B3	TB2CCR0 CCIFG0	Maskable	FFF0h	56
Timer2_B3	TB2CCR1 CCIFG1, TB2CCR2 CCIFG2, TB2IFG (TB2IV)	Maskable	FFEEh	55
Timer3_B7	TB3CCR0 CCIFG0	Maskable	FFECh	54
Timer3_B7	TB3CCR1 CCIFG1, TB3CCR2 CCIFG2, TB3CCR3 CCIFG3, TB3CCR4 CCIFG4, TB3CCR5 CCIFG5, TB3CCR6 CCIFG6, TB3IFG (TB3IV)	Maskable	FFEAh	53
RTC counter	RTCIFG	Maskable	FFE8h	52
Watchdog timer interval mode	WDTIFG	Maskable	FFE6h	51

*Figura 5-5. Vectores y fuente de interrupción del MSP430FR2355.
Fuente [12], pág. 63.*

Los vectores de interrupción se encuentran en el rango de direcciones 0xFFFF a 0xFFCE, siendo la 0xFFFF la dirección de mayor prioridad.

Al definir la interrupción que realiza la modulación es importante que sea la que tiene mayor prioridad en el caso de haber otras interrupciones deben ser de prioridad baja. Con ello, se garantiza un correcto funcionamiento en la duración de los pulsos.

Un dato importante que aporta el fabricante es el tiempo de latencia el cual es seis ciclos maquina comenzando por la aceptación de la interrupción [12]. A la hora de implementar el código, se debe tener presente que habilitar una interrupción conlleva un tiempo 375 ns. Siendo el valor de cuenta mínimo de 76d (técnica SPWM), que equivale a 4,75

μs. Se concluye que el tiempo de latencia ocupa el 10 % del intervalo. La rutina de interrupción debe ser inferior a 4,75 μs para no generar errores de funcionamiento.

La rutina de interrupción debe tener otros requisitos:

- *Rutina equilibrada en tiempo.* Las diversas acciones que se ejecutan en la rutina de interrupción hasta llegar al cambio de la señal modulada debe tener todas las mismas duraciones en tiempo.
- *Duración.* La ejecución de la rutina no debe ser mayor al tiempo (valor) más corto de la modulación.

Cambio de secuencia

Al realizar la implementado de varias técnicas de modulación, se desea seleccionar una de ellas y cambiar de técnica cuando se desee. Para dicho control se definen unas patillas del μC como entradas.

PIN NAME (P5.x)	x	FUNCTION	CONTROL BITS AND SIGNALS ⁽¹⁾	
			P5DIR.x	P5SELx
P5.0/TB2.1/MFM.RX/A8	0	P5.0 (I/O)	I: 0; O: 1	00
		TB2.CCI1A	I	01
		TB2.1	O	
		MFM.RX	X	10
P5.1/TB2.2/MFM.TX/A9	1	A8	X	11
		P5.1 (I/O)	I: 0; O: 1	00
		TB2.CCI2A	I	01
		TB2.2	O	
		MFM.TX	X	10
A9	X	11		
P5.2/TB2CLK/A10	2	P5.2 (I/O)	I: 0; O: 1	00
		TB2CLK	I	01
		VSS	O	
		A10	X	11
P5.3/TB2TRG/A11	3	P5.3 (I/O)	I: 0; O: 1	00
		TB2TRG	I	01
		VSS	O	
		A11	X	11
P5.4	4	P5.4 (I/O)	I: 0; O: 1	00

(1) X = don't care

Figura 5-6. Funciones del puerto 5. Fuente [13] pág. 104.

La figura 5 – 6 define la configuración para el puerto cinco (P5), el cual se emplea para el cambio de secuencia. Se define como patilla de entrada o salida cargando un cero en el registro P5SEL.x. Para definir una patilla como entrada se carga un cero el registro P5DIR.x o uno para definirlo como salida.

Técnica	Puerto 5	
	P5.1	P5.0
OFF	0	0
Onda Cuadrada	0	1
SPWM	1	0
MSPWM	1	1

Tabla 5-1. Codificación P5. Fuente propia.

La tabla 5 – 1 define la codificación de las patillas del puerto 5 (P5). Se codifica un nivel bajo en las patillas P5.1 = 0, P5.0 = 0 (OFF) el cual no se pone en funcionamiento ninguna de las técnicas, en caso contrario una de técnicas se pondrán en marcha.

5.2 Dispositivo de control

Para realizar la implementación de las técnicas se decide utilizar un microcontrolador (µC) de TEXAS INSTRUMENTS. Siendo por décadas una empresa dedicada a proporcionar dispositivos de bajo coste. Entre todas las familias de µC que existen se elige la familia MSP430, siendo la placa de desarrollo MSP-EX430FR2355 [14] y el circuito integrado M430FR2355 [12].

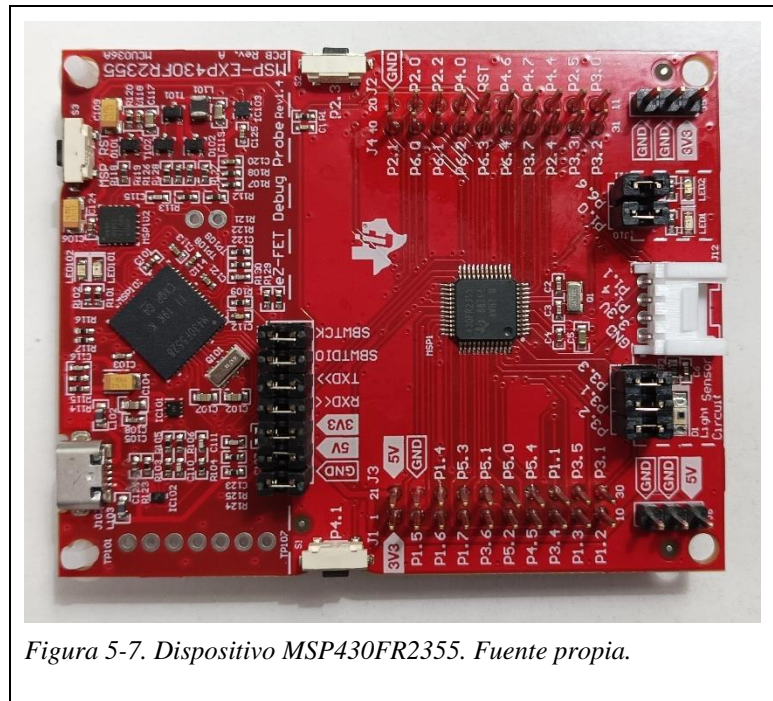
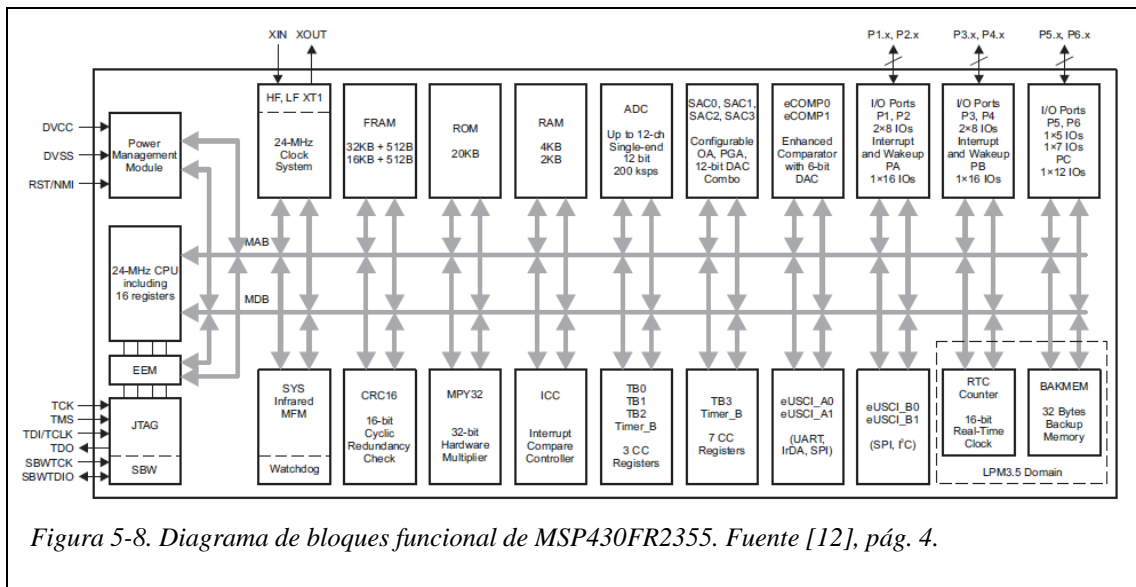


Figura 5-7. Dispositivo MSP430FR2355. Fuente propia.

La figura 5 – 7 expone el dispositivo a utilizar para la implementación de las distintas técnicas, dicho dispositivo presenta las siguientes características:

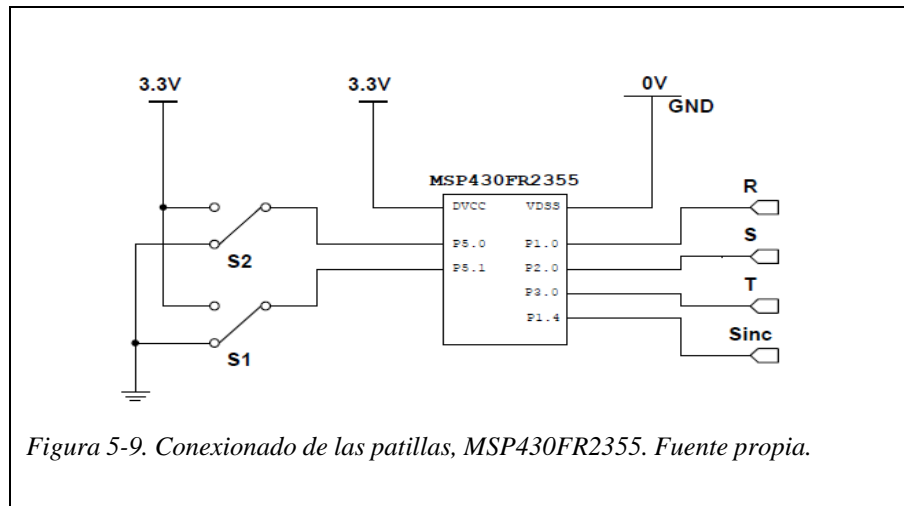
- Almacenamiento: Memoria FRAM de 32 KB, memoria SRAM 256 B.
- Frecuencia de funcionamiento hasta 24 MHz.
- Dos temporizadores Timer_A, Timer_B.
- 44 patillas de conexión, configurables como entradas o salidas. comprendidas entre el puerto P1 a P6.
- Convertidor Analógico / Digital.



La figura 5 – 8 representa el diagrama de bloques del dispositivo MSP430FR2355. El temporizador empleado es el bloque TB3 Timer_B el cual presenta las 7 interrupciones. De igual manera, para las patillas a utilizar se emplea los bloques *I/O Ports*, P1, P2, P3, y P5.

5.3 Esquema eléctrico

La figura 5 – 9 representa el conexionado de las patillas. Las etiquetas S1, S2 son los interruptores, los cuales conmutan entre 3,3 V y 0 V. Mediante codificación de S1 y S2 se define el funcionamiento de una de las técnicas implementadas en el dispositivo. Para dichos interruptores no hace falta implementar ninguna resistencia, ya que, la configuración se realiza mediante código, el dispositivo habilita las patillas P5.0, P5.1 para dicha función.



Las patillas P1.0, P2.0, P3.0 hacen referencia a las etiquetas R, S, T, respectivamente, son las que se conectan al inversor. La patilla P1.4 con la etiqueta *Sinc* es la señal de sincronización la cual define el periodo de la señal.

5.4 Programación

El lenguaje de programación utilizado para la implementar la modulación con las distintas técnicas Onda Cuadrada, SPWM, MSPWM, se realiza íntegramente en lenguaje máquina (ensamblador o nemónico) sobre un microcontrolador MSP430FR2355 utilizando la placa MSP-EXP430FR2. El código se realiza con el programa CCS (Code Composer Studio V 12.1) [15] el cual es proporcionado por el fabricante. En el Anexo A1 se encuentra la descripción de toda la programación realizada.

Se analiza:

- Configuración del reloj del sistema.
- Configuración del temporizador.
- Rutina de interrupción.
- Técnica Onda Cuadrada.
- Técnica SPWM.
- Técnica MSPWM.

Configuración del reloj del sistema

La configuración del reloj se realiza para $f_{\mu C} = 16$ MHz. Se decide utilizar la señal de reloj de SMCLK (*Subsystem master clock*, Reloj maestro del subsistema) para el temporizador. Dicha señal es gobernada por el registro DCO (*Digitally Controlled Oscillator*, Oscilador controlado digitalmente).

164	mov.w	#FRCTLPW+NWAITS_1,&FRCTL0	; Config. FRAM
165	bis.w	#SCG0,SR	; Deshabilitar FLL
166	bis.w	#SELREF__REFOCLK,&CSCTL3	; Establecer REFO como FLL
167	mov.w	#DCOFTRIMEN_1+DCOFTRIM0,&CSCTL1	; DCOFTRIM=3
168	mov.w	&CERO,&CSCTL0	; Limpiar DCO, registros MOD
169	bic.w	#DCORSEL_7,&CSCTL1	; Limpiar DCO frecuencia
170	mov.w	#DCOFTRIM1+DCORSEL_5,&CSCTL1	
171			; DCO Range = 16MHz
172	mov.w	#FLLD_0+487,&CSCTL2	; DCO DIV = 16MHz
173	nop		
174	nop		
175	nop		
176	bic.w	#SCG0,SR	; Habilitar FLL
177 Unlock	mov.w	&CSCTL7,R3	
178	and.w	#FLLUNLOCK0 FLLUNLOCK1,R3	
179	jnz	Unlock	; FLL bloqueado?
180	mov.w	#SELMS__DCOCLKDIV,&CSCTL4	

Figura 5-10. Configuración del reloj a 16 MHz. Fuente propia.

La figura 5 – 10 define los parámetros para DCO = 16 MHz. La línea 164 se corresponde con la habilitación de escritura sobre la FRAM, el fabricante lo exige siempre que se desee modificar los parámetros por defecto de funcionamiento. Entre la línea 165 y 172 selecciona la fuente de reloj de referencia para FLL (*Frequency Locked Loop*, Bucle de frecuencia bloqueada) siendo el contador principal, el cual realiza la cuenta hacia arriba. Se habilita la frecuencia para DCO, definiendo el rango en 16 MHz y la división por 1. Entre la línea 176 a 179 se comprueba que el registro FLL esté bloqueado de lo contrario el dispositivo presenta errores de funcionamiento [12].

Configuración del temporizador.

201	bis.w	#CM_1 CCIS_1 CCIE SCS,&TB3CCTL0	; Capturar flanco subida
202	bis.w	#CM_1 CCIS_1 CCIE SCS,&TB3CCTL1	; CCI0B=SMCLK,
203	bis.w	#CM_1 CCIS_1 CCIE SCS,&TB3CCTL2	; Sincrono
204	bis.w	#CM_1 CCIS_1 CCIE SCS,&TB3CCTL3	; Habilitar comparar
205	bis.w	#CM_1 CCIS_1 CCIE SCS,&TB3CCTL4	; Habilitar Int.
206	bis.w	#CM_1 CCIS_1 CCIE SCS,&TB3CCTL5	
207	bis.w	#CM_1 CCIS_1 CCIE SCS,&TB3CCTL6	
208			
209	mov.w	#TBSSSEL_2 MC_1 TBCLR TBIE,&TB3CTL	; SMCLK, modo UP
210			; TBR=0, habilitar int.

Figura 5-11. Configuración del temporizador B. Fuente propia.

La figura 5 – 11 representa la configuración del temporizador B, entre la línea 201 a 207 se determina la activación de la interrupción, activación por flanco de subida y síncrono, la fuente del reloj que es SMCLK, se habilita el modo comparar y los indicadores de interrupción en cada uno de los registros (TB3CCTL0, ... , TB3CCTL6). La línea 209 configura el temporizador. La fuente es SMCLK (16 MHz), cuenta ascendente, inicializa a cero el valor del temporizador y habilita la interrupción.

Rutina de interrupción.

Para la rutina de interrupción se emplearon los dos vectores Timer3_B0 y Timer3_B1. Se genera la interrupción del Timer3_B0 cuando el temporizador llega a cero y Timer3_B1 se genera la interrupción en los valores comprendidos entre cero y el valor máximo.

```

358 TIMER3_B0    cmp.w    #0,0(R5)           ; ¿Es final de tabla?
359              jne     T1                ; NO-> salta a T1
360              mov.w  4(SP),R10         ; R10=SP(tablaP3)
361              mov.w  6(SP),R9         ; R9=SP(tablaP2)
362              mov.w  8(SP),R8         ; R8=SP(tablaP1)
363              mov.w  10(SP),R7        ; R7=SP(tablaF3)
364              mov.w  12(SP),R6        ; R6=SP(tablaF2)
365              mov.w  14(SP),R5        ; R5=SP(tablaF1)
366
367 T1           mov.w  @R5+,&TB3CCR1     ; TB3CCR1=(R5)
368              mov.w  @R5+,&TB3CCR2     ; TB3CCR2=(R5)
369              mov.w  @R6+,&TB3CCR3     ; TB3CCR3=(R6)
370              mov.w  @R6+,&TB3CCR4     ; TB3CCR4=(R6)
371              mov.w  @R7+,&TB3CCR5     ; TB3CCR5=(R7)
372              mov.w  @R7+,&TB3CCR6     ; TB3CCR6=(R7)
373              mov.b  @R8+,&P1OUT       ; P1OUT=(R8)
374              mov.b  @R9+,&P2OUT       ; P2OUT=(R9)
375              mov.b  @R10+,&P3OUT      ; P3OUT=(R10)
376              xor.b  #BIT0,&P4OUT     ; T intervalo
377              reti                    ; Salir de Int.

```

Figura 5-12. Rutina de interrupción de Timer3_B0. Fuente propia.

La figura 5 – 12 define la rutina de interrupción para el vector Timer3_B0. En la línea 358 se comprueba si ha llegado al final de la tabla. En el caso de haber llegado al final de la tabla ejecuta las líneas 360 a 365 en las cuales copia el valor almacenado en la pila en los registros que contienen, por una parte, los valores iniciales a cargar en cada uno de los registros (R5, R6, R7) y por otra el valor inicial de cada uno de los puertos utilizados (R8, R9, R10).

Entre las líneas 367 a 376 actualiza el contenido de los registros (R5, R6, R7) en los registros de indicador de interrupción (TB3CCR1, ... , TB3CCR6) respectivamente, de

igual manera, el contenido de los registros (R8, R9, R10) en los puertos P1, P2, P3 respectivamente.

Habiendo definido la estructura de la interrupción para Timer3_B0, se procede analizar el tiempo que emplea. El fabricante afirma que entrar en la rutina son 6 periodos más 5 de la instrucción *reti*. Se presentando dos casos. Cuando ha llegado y no al final de la tabla.

- En el caso de no haber llegado se tienen 44 periodos de reloj más 11 periodos (fabricante), se tiene un total de 55 periodos, equivalen a 3,43 μ s. Valor de tiempo que se encuentra dentro del valor máximo (apartado 5.1).
- En el caso de haber llegado se tienen 68 periodos de reloj más 11 periodos (fabricante), se tiene un total de 79 periodos, equivalen a 4,93 μ s. Este valor es superior al comentado en el apartado 5.1 pero con la diferencia, de que, este valor de tiempo solo es empleado en el final de la tabla, en dicho intervalo el tiempo mínimo requerido es de 162,65 μ s, con lo cual, el funcionamiento de la rutina de interrupción para este caso cumple con los requisitos de tiempo.

380	TIMER3_B1	add	&TB3IV,PC	; Agregar a PC
381		reti		; No int.
382		jmp	CCR1	; TB3IV_TB3CCR1
383		jmp	CCR2	; TB3IV_TB3CCR2
384		jmp	CCR3	; TB3IV_TB3CCR3
385		jmp	CCR4	; TB3IV_TB3CCR4
386		jmp	CCR5	; TB3IV_TB3CCR5
387		jmp	CCR6	; TB3IV_TB3CCR6
388	TB3IFG	reti		; Salir de Int.
389	;-----			
390	CCR6	mov.B	@R10+,&P3OUT	; P3OUT=(R10)
391		reti		; Salir de Int.
392				
393	CCR5	mov.B	@R10+,&P3OUT	; P3OUT=(R10)
394		reti		; Salir de Int.
395				
396	CCR4	mov.B	@R9+,&P2OUT	; P2OUT=(R9)
397		reti		; Salir de Int.
398				
399	CCR3	mov.B	@R9+,&P2OUT	; P2OUT=(R9)
400		reti		; Salir de Int.
401				
402	CCR2	mov.B	@R8+,&P1OUT	; P1OUT=(R8)
403		reti		; Salir de Int.
404				
405	CCR1	mov.B	@R8+,&P1OUT	; P1OUT=(R8)
406		reti		; Salir de Int.

Figura 5-13. Rutina de interrupción de Timer3_B1. Fuente propia.

En la figura 5 – 13 define la rutina de interrupción para el vector Timer3_B1. En la línea 380 carga la dirección de la interrupción en el contador de programa que lo ha solicitado. Entre la línea 390 a 406 se actualiza el estado de las patillas de los puertos correspondientes a la interrupción que lo haya solicitado.

Habiendo definido la estructura de la interrupción para Timer3_B1, se procede analizar el tiempo que emplea. El fabricante afirma que entrar en la rutina son 6 y la instrucción *reti* son 5 periodos. Se analiza los distintos casos.

- La interrupción TB3IFG emplea 3 periodos, sumado a las 11 periodos, requiere un tiempo de 875 ns.
- El indicador CCR1 emplea 4 periodos, sumado a las 11 periodos, requiere un tiempo de 937,5 ns. De igual manera para los demás indicadores (CCR2, ... , CCR6) se emplea el mismo valor de tiempo.

Se concluye, la rutina de interrupción es su conjunto cumple con las especificaciones planteadas.

5.4.1 Método onda cuadrada

```

233 0C      bit.b  #BIT0,&P5IN          ; P5.1==H ?
234      jz     SPWM                  ; Z=0, salta si es distinto
235      bit.b  #BIT1,&P5IN          ; P5.1==H ?
236      jnz    SPWM                  ; Z=1, salta si es distinto
237      bit.b  #BIT2,&P5IN          ; P5.1==L ?
238      jnz    SPWM                  ; Z=1, salta si es distinto
239      cmp.w  &UNO,R4              ; R4=0x01 ?
240      jz     SPWM                  ; Z=1, salta si es igual
241      mov.w  &UNO,R4              ; R4=0x01
242      mov.w  #__STACK_END,SP      ; Inicializar puntero
243      mov.w  &BASE1_T,&TB3CCR0    ; T=intervalo(3,33ms)

```

Figura 5-14. Rutina de ejecución, onda cuadrada. Fuente propia.

La figura 5 – 14 representa la ejecución del método onda cuadrada. Entre las líneas 233 a 238 comprueba el estado de las patillas del puerto 5. Entre las líneas 239 a 241 comprueba si el registro 4 contiene el dato 0x01, en el caso de no contenerlo se copia 0x01 en el registro 4 para confirmar que ya ha inicializado los parámetros para ejecutar la técnica. Seguido de inicializar el puntero y cargar el valor de cuenta en el temporizador (3,33 ms) para cada intervalo.

```

244 ;-----Fase1-----
245     mov.w  #tablaOC1,R5           ; R5=tablaOC1
246     push  #tablaOC1             ; SP=tablaOC1
247     mov.w  @R5+,&TB3CCR1        ; TB3CCR1=(R5)
248     mov.w  @R5+,&TB3CCR2        ; TB3CCR2=(R5)
249 ;-----Fase2-----
250     mov.w  #tablaOC2,R6           ; R6=tablaOC2
251     push  #tablaOC2             ; SP=tablaOC2
252     mov.w  @R6+,&TB3CCR3        ; TB3CCR3=(R6)
253     mov.w  @R6+,&TB3CCR4        ; TB3CCR4=(R6)
254 ;-----Fase3-----
255     mov.w  #tablaOC3,R7           ; R7=tablaOC3
256     push  #tablaOC3             ; SP=tablaOC3
257     mov.w  @R7+,&TB3CCR5        ; TB3CCR5=(R7)
258     mov.w  @R7+,&TB3CCR6        ; TB3CCR6=(R7)
259 ;-----Salida Fase1-----
260     mov.w  #tablaOCP1,R8          ; R8=tablaOCP1
261     push  #tablaOCP1             ; SP=tablaOCP1
262     mov.B  @R8+,&P1OUT           ; P1OUT=(R8)
263 ;-----Salida Fase2-----
264     mov.w  #tablaOCP2,R9          ; R9=tablaOCP2
265     push  #tablaOCP2             ; SP=tablaOCP2
266     mov.B  @R9+,&P2OUT           ; P2OUT=(R9)
267 ;-----Salida Fase3-----
268     mov.w  #tablaOCP3,R10         ; R10=tablaOCP3
269     push  #tablaOCP3             ; SP=tablaOCP4
270     mov.B  @R10+,&P3OUT          ; P3OUT=(R10)
271     jmp   Mainloop               ; Salta Mainloop
272 ;-----

```

Figura 5-15. Rutina de inicialización de valores, Onda Cuadrada. Fuente propia.

La figura 5 – 15 presenta la inicialización de valores del método onda cuadrada. Está dividido por fases. Desde la línea 245 a 248 referente a la fase 1 (R), se carga el valor contenido en *tablaOC1* en el registro 5, seguido se guarda dicho valor en la pila de la memoria. El dato contenido en R5 se carga en el indicador de interrupción TB3CCR1, seguido de un incremento de posición en dos bytes de R5. De igual manera, se vuelve a cargar el dato nuevo en TB3CCR2 y a su vez, incrementa en dos bytes R5. Para las demás fases (S, T) se repite dicho ejecución de código, pero cambiando el registro. Entre la línea 250 a 253 para la fase 2 (S), entre la línea 255 a 258 para la fase 3 (T).

La activación de la patilla (fase 1 (R)) del puerto 1 definido entre la línea 260 a 262, copia el contenido de *tablaOCP1* en R8 seguido se guarda dicho valor en la pila de la memoria. El dato contenido en R8 es cargado en el puerto 1, a su vez, es incrementado R8. Para las demás fases (S, T) se repite dicho ejecución de código, pero cambiando el registro; R9 para la fase 2 (S) comprendido entre la línea 264 a 266 y R10 para la fase 3 (T) comprendido entre la línea 268 a 270. En la línea 271 realiza un salto a la etiqueta *Mainloop*.

5.4.2 Técnica SPWM

274 SPWM	bit.b	#BIT0,&P5IN		; P5.1==L ?
275	jnz	MSPWM		; Z=1, salta si es distinto
276	bit.b	#BIT1,&P5IN		; P5.1==H ?
277	jz	MSPWM		; Z=0, salta si es distinto
278	bit.b	#BIT2,&P5IN		; P5.1==L ?
279	jnz	MSPWM		; Z=1, salta si es distinto
280	cmp.w	&DOS,R4		; R4=0x02 ?
281	jz	MSPWM		; Z=1, salta si es igual
282	mov.w	&DOS,R4		; R4=0x02
283	mov.w	#_STACK_END,SP		; Inicializar puntero
284	mov.w	&BASE2_T,&TB3CCR0		; T=intervalo(833us)

Figura 5-16. Rutina de ejecución, SPWM. Fuente propia.

La figura 5 – 16 representa la ejecución de la técnica SPWM. Entre las líneas 274 a 279 comprueba el estado de las patillas del puerto 5. Entre las líneas 280 a 282 comprueba si el registro 4 contiene el dato 0x02, en el caso contrario se copia 0x02 en el registro 4 para confirmar que ya ha inicializado los parámetros para ejecutar la técnica. Seguido de inicializar el puntero y cargar el valor de cuenta en el temporizador (833 μ s) para cada intervalo.

285 ;	-----Fase1-----			
286	mov.w	#tablaS1,R5		; R5=tablaS1
287	push	#tablaS1		; SP=tablaS1
288	mov.w	@R5+,&TB3CCR1		; TB3CCR1=(R5)
289	mov.w	@R5+,&TB3CCR2		; TB3CCR2=(R5)
290 ;	-----Fase2-----			
291	mov.w	#tablaS2,R6		; R6=tablaS2
292	push	#tablaS2		; SP=tablaS2
293	mov.w	@R6+,&TB3CCR3		; TB3CCR3=(R6)
294	mov.w	@R6+,&TB3CCR4		; TB3CCR4=(R6)
295 ;	-----Fase3-----			
296	mov.w	#tablaS3,R7		; R7=tablaS3
297	push	#tablaS3		; SP=tablaS3
298	mov.w	@R7+,&TB3CCR5		; TB3CCR5=(R7)
299	mov.w	@R7+,&TB3CCR6		; TB3CCR6=(R7)
300 ;	-----Salida Fase1-----			
301	mov.w	#tablaSP1,R8		; R8=tablaSP1
302	push	#tablaSP1		; SP=tablaSP1
303	mov.B	@R8+,&P1OUT		; P1OUT=(R8)
304 ;	-----Salida Fase2-----			
305	mov.w	#tablaSP2,R9		; R9=tablaSP2
306	push	#tablaSP2		; SP=tablaSP2
307	mov.B	@R9+,&P2OUT		; P2OUT=(R9)
308 ;	-----Salida Fase3-----			
309	mov.w	#tablaSP3,R10		; R10=tablaSP3
310	push	#tablaSP3		; SP=tablaSP4
311	mov.B	@R10+,&P3OUT		; P3OUT=(R10)
312	jmp	Mainloop		; Salta Mainloop

Figura 5-17. Rutina de inicialización de valores, SPWM. Fuente propia.

La figura 5 – 17 presenta la inicialización de valores para la técnica SPWM. Está dividido por fases. Desde la línea 286 a 289 hace referencia a la fase 1 (R), se carga el valor contenido en *tablaS1* en el registro 5, seguido se guarda dicho valor en la pila de la

memoria. El dato contenido en R5 se carga en el indicador de interrupción TB3CCR1, seguido de un incremento de posición en dos bytes de R5. De igual manera, se vuelve a cargar el dato nuevo en TB3CCR2 y a su vez, es incrementado R5. Para las demás fases (S, T) se repite dicha ejecución de código, pero cambiando el registro. Entre la línea 291 a 294 para la fase 2 (S), entre la línea 296 a 299 para la fase 3 (T).

La activación de la patilla (fase 1 (R)) del puerto 1 definido entre la línea 301 a 303, copia el contenido de *tablaSP1* en R8 seguido se guarda dicho valor en la pila de la memoria. El dato contenido en R8 es cargado en el puerto 1, a su vez, incrementa en dos bytes R8. Para las demás fases (S, T) se repite dicha ejecución de código, pero cambiando el registro; R9 para la fase 2 (S) comprendido entre la línea 305 a 307 y R10 para la fase 3 (T) comprendido entre la línea 309 a 311. En la línea 312 realiza un salto a la etiqueta *Mainloop*.

5.4.3 Técnica MSPWM

```

315 MSPWM      bit.b   #BIT0,&P5IN                ; P5.1==H ?
316           jz      Mainloop                    ; Z=0, salta si es distinto
317           bit.b   #BIT1,&P5IN                ; P5.2==H ?
318           jz      Mainloop                    ; Z=0, salta si es distinto
319           bit.b   #BIT2,&P5IN                ; P5.1==L ?
320           jnz     Mainloop                    ; Z=1, salta si es distinto
321           cmp.w   &TRES,R4                   ; R4=0x03 ?
322           jz      Mainloop                    ; Z=1, salta si es igual
323           mov.w   &TRES,R4                   ; R4=0x03
324           mov.w   #__STACK_END,SP           ; Inicializar puntero
325           mov.w   &BASE2_T,&TB3CCR0         ; T=intervalo(833us)

```

Figura 5-18. Rutina de ejecución, MSPWM. Fuente propia.

La figura 5 – 18 representa la ejecución de la técnica MSPWM. Entre las líneas 315 a 320 comprueba el estado de las patillas del puerto 5. Entre las líneas 321 a 323 comprueba si el registro 4 contiene un 0x03, en el caso contrario se copia el 0x03 en el registro 4 para confirmar que ya ha inicializado los parámetros para ejecutar la técnica. Seguido de inicializar el puntero y cargar el valor de cuenta en el temporizador (833 μ s) para cada intervalo.

```

326 ;-----Fase1-----
327     mov.w  #tablaMS1,R5                ; R5=tablaMS1
328     push  #tablaMS1                    ; SP=tablaMS1
329     mov.w  @R5+,&TB3CCR1                ; TB3CCR1=(R5)
330     mov.w  @R5+,&TB3CCR2                ; TB3CCR2=(R5)
331 ;-----Fase2-----
332     mov.w  #tablaMS2,R6                ; R6=tablaMS2
333     push  #tablaMS2                    ; SP=tablaMS2
334     mov.w  @R6+,&TB3CCR3                ; TB3CCR3=(R6)
335     mov.w  @R6+,&TB3CCR4                ; TB3CCR4=(R6)
336 ;-----Fase3-----
337     mov.w  #tablaMS3,R7                ; R7=tablaMS3
338     push  #tablaMS3                    ; SP=tablaMS3
339     mov.w  @R7+,&TB3CCR5                ; TB3CCR5=(R7)
340     mov.w  @R7+,&TB3CCR6                ; TB3CCR6=(R7)
341 ;-----Salida Fase1-----
342     mov.w  #tablaMSP1,R8               ; R8=tablaMSP1
343     push  #tablaMSP1                    ; SP=tablaMSP1
344     mov.B  @R8+,&P1OUT                   ; P1OUT=(R8)
345 ;-----Salida Fase2-----
346     mov.w  #tablaMSP2,R9               ; R9=tablaMSP2
347     push  #tablaMSP2                    ; SP=tablaMSP2
348     mov.B  @R9+,&P2OUT                   ; P2OUT=(R9)
349 ;-----Salida Fase3-----
350     mov.w  #tablaMSP3,R10              ; R10=tablaMSP3
351     push  #tablaMSP3                    ; SP=tablaMSP3
352     mov.B  @R10+,&P3OUT                  ; P3OUT=(R10)
353     jmp   Mainloop                      ; Salta Mainloop
354 ;-----

```

Figura 5-19. Rutina de inicialización de valores, MSPWM. Fuente propia.

La figura 5 – 19 presenta la inicialización de valores para la técnica MSPWM. Está dividido por fases. Desde la línea 327 a 330 referente a la fase 1 (R), se carga el valor contenido en *tablaMS1* en el registro 5, seguido se guarda dicho valor en la pila de la memoria. El dato contenido en R5 es cargado en el indicador de interrupción TB3CCR1, seguido de un incremento de posición en dos bytes de R5. De igual manera, se vuelve a cargar el dato nuevo en TB3CCR2 y a su vez, incrementa en dos bytes R5. Para las demás fases (S, T) se repite dicha ejecución de código, pero cambiando el registro. Entre la línea 332 a 335 para la fase 2 (S), entre la línea 337 a 340 para la fase 3 (T).

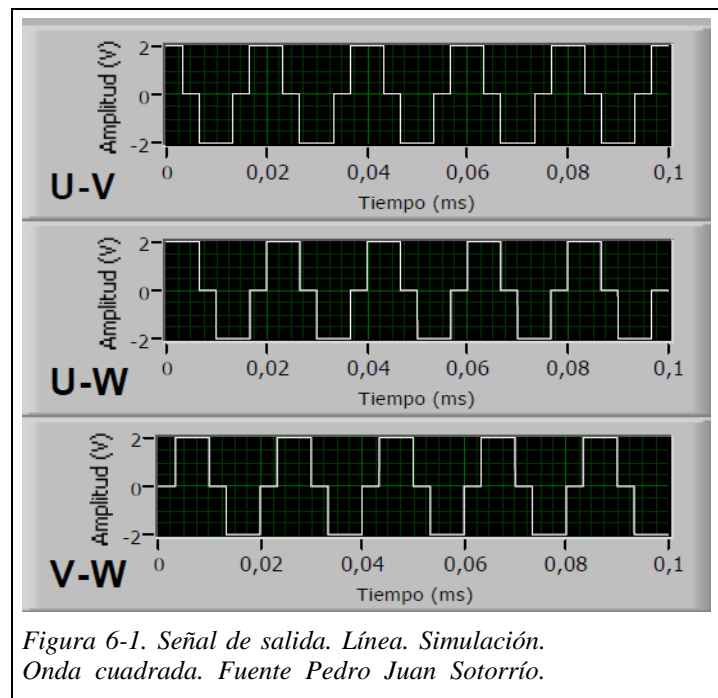
La activación de la patilla (fase 1 (R)) del puerto 1 definido entre la línea 342 a 344, copia el contenido de *tablaMSP1* en R8 seguido se guarda dicho valor en la pila de la memoria. El dato contenido en R8 es cargado en el puerto 1, a su vez, incrementa en dos bytes R8. Para las demás fases (S, T) se repite dicha ejecución de código, pero cambiando el registro; R9 para la fase 2 (S) comprendido entre la línea 346 a 348 y R10 para la fase 3 (T) comprendido entre la línea 350 a 352. En la línea 353 realiza un salto a la etiqueta *Mainloop*.

Capítulo 6

6 Simulación

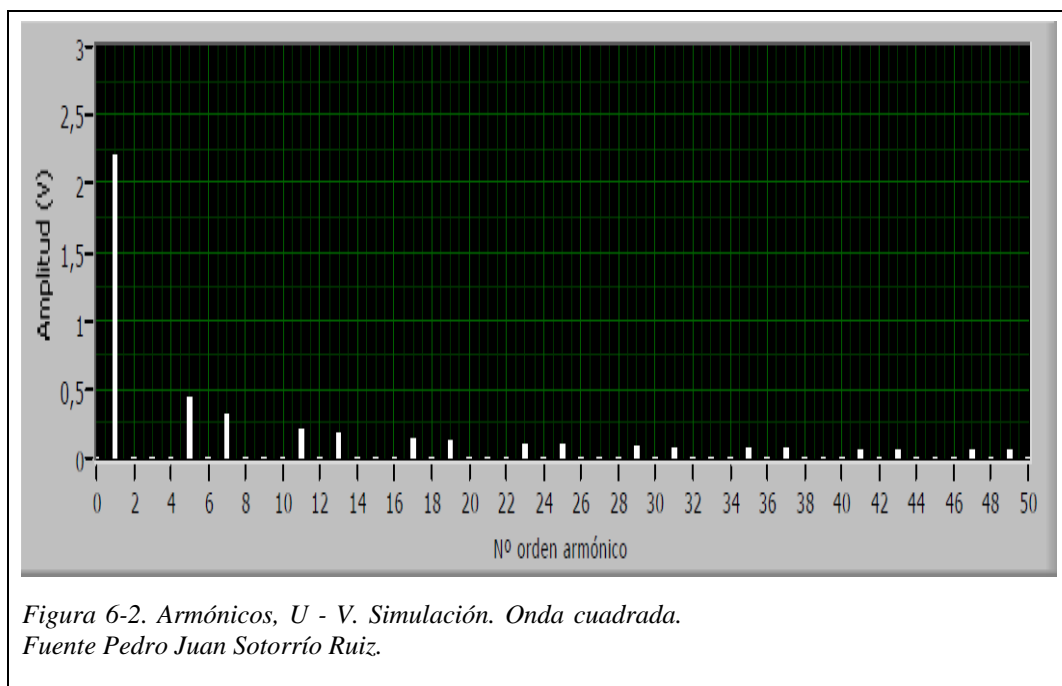
Se pretende comprobar el correcto funcionamiento para ello se realiza la simulación de las técnicas descritas en el capítulo 3 mediante LabVIEW® para obtener los parámetros de calidad y comprobar el correcto funcionamiento.

6.1 Onda cuadrada



La figura 6 – 1 representa la señal de salida de las tres líneas:

- U – V representa a U12.
- U – W representa a U23.
- V – W representa a U31.



La figura 6 – 2 representa el espectro armónico de la línea U – V en la cual los armónicos impares múltiplos de tres se eliminan por compensación.

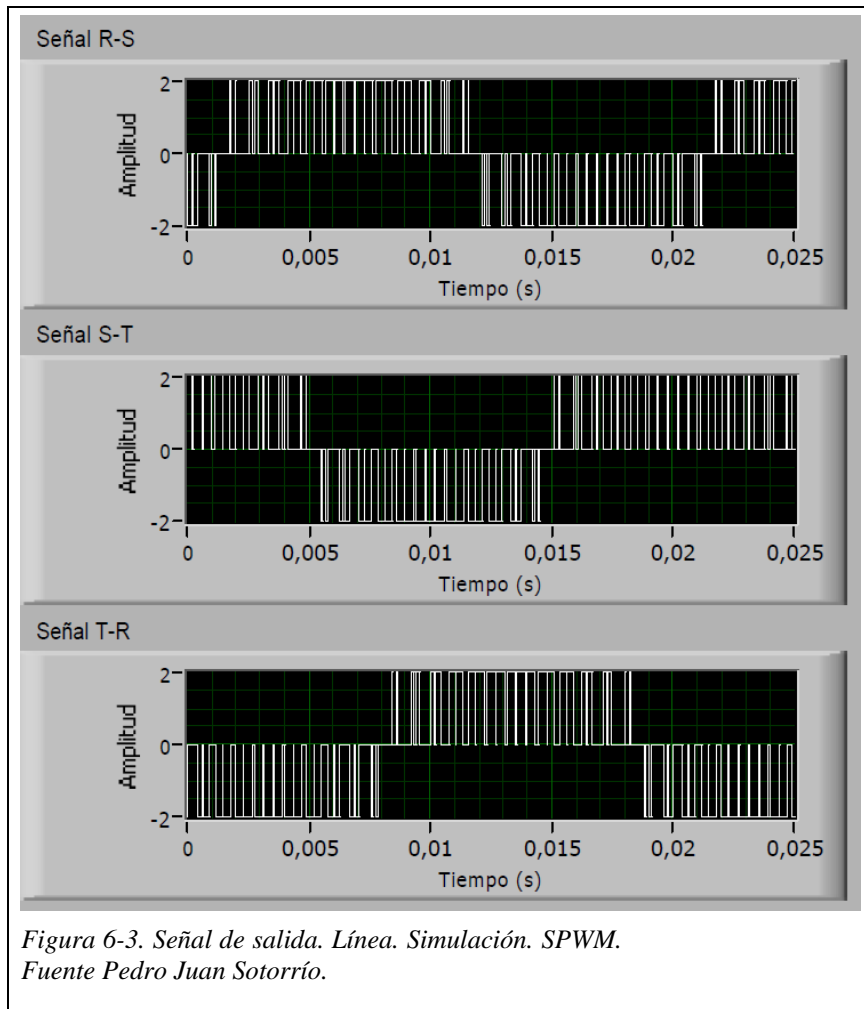
Se procede a obtener los parámetro de calidad.

Parámetro de calidad	Resultado (%)
	U – V
THD	29,92
WTHD	4,63
DF	0,85

Tabla 6-1. Parámetros de calidad. Simulación. Onda cuadrada. Fuente propia.

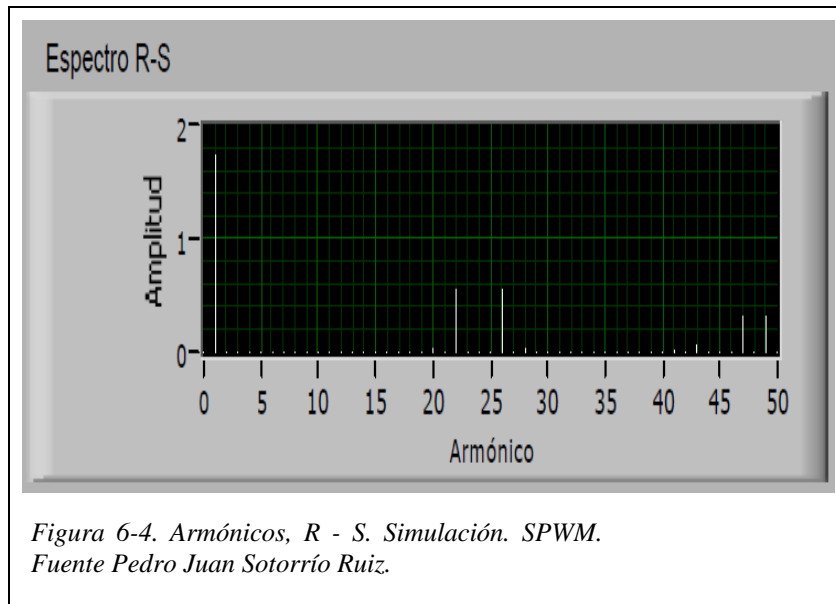
La tabla 6 – 1 representa los parámetros de calidad de la señal de línea U – V. Al realizar la simulación para las líneas U – W, V – W se obtienen los mismos parámetros.

6.2 SPWM



La figura 6 – 3 representa la señal de salida de las tres líneas:

- R – S representa a U12.
- S – T representa a U23.
- T – R representa a U31.



La figura 6 – 4 representa el espectro armónico de la línea R – S en la cual los armónicos impares múltiplos de tres se eliminan por compensación. Se procede a obtener los parámetro de calidad.

Parámetro de calidad	Resultado (%)
	R – S
THD	48,66
WTHD	1,94
DF	0,1

Tabla 6-2. Parámetros de calidad. Simulación. SPWM. Fuente propia.

La tabla 6 – 2 representa los parámetros de calidad de la señal de línea R – S. Al realizar la simulación para las líneas S – T, T – R se obtienen los mismos parámetros.

Capítulo 7

7 Resultados

Para obtener los resultados de calidad referente a cada técnica se ha empleado.

- El analizador lógico *Analog Discovery* – *DIGILENT*®, 100 MSPS y 16 canales, permite obtener los cronogramas de cada una de las técnicas para comprobar los intervalos de tiempo.
- Sonda diferencial DP25 CHAUVIN – ARNOUX.
- Inversor SEMIKRON de la familia SKS 140F B6CI 92.
- Analizador de calidad eléctrica Chauvin Arnoux CA 8333, instrumento de medida que analiza las señales a la salida del inversor SEMIKRON.

7.1 Método onda cuadrada

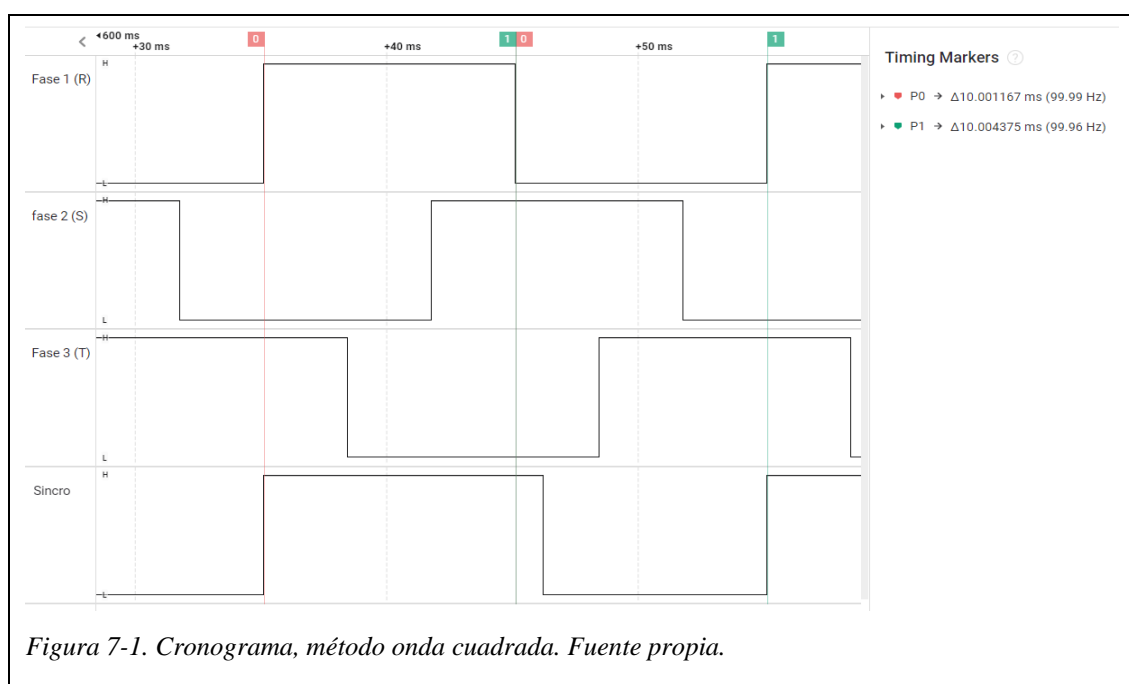
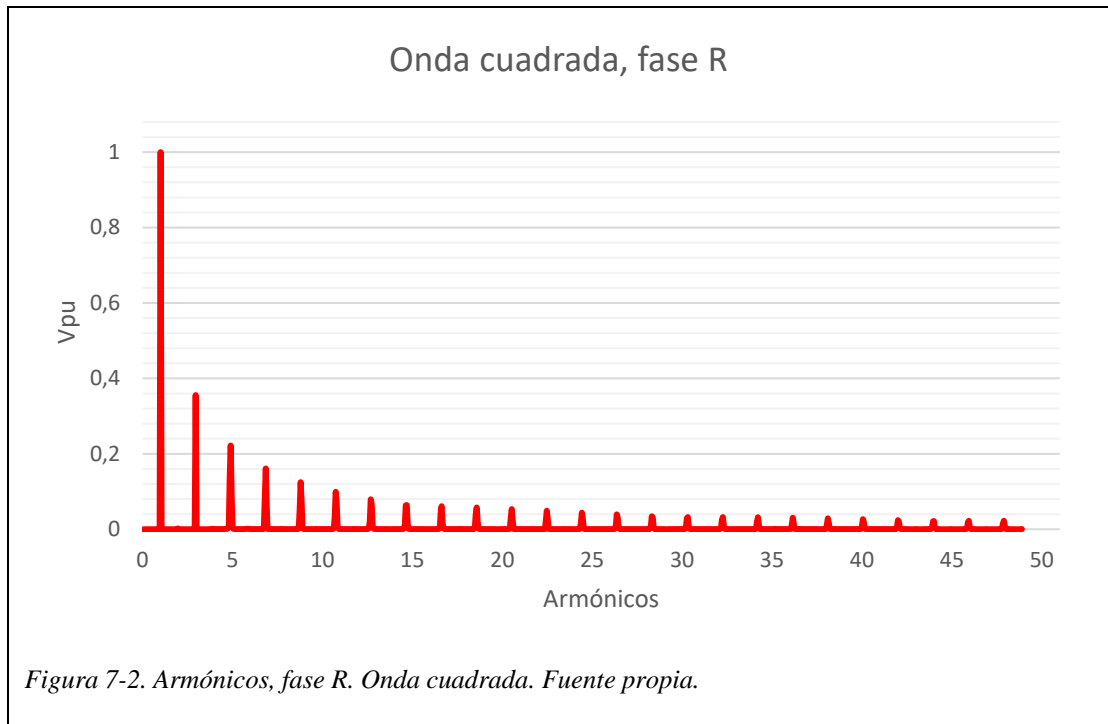


Figura 7-1. Cronograma, método onda cuadrada. Fuente propia.

La figura 7 – 1 representa el cronograma obtenido mediante el analizador lógico *Analog Discovery*. La salida de las tres señales R, S, T, haciendo referencia a Fase 1 (R), Fase 2 (S), Fase 3 (T) respectivamente, la señal *Sincro* define el inicio del periodo de la fase 1. La señal tiene un periodo de $10,002 \text{ ms} + 10,004 \text{ ms} = 20,006 \text{ ms}$ presentando un error de 0,03 %. Siendo un error inferior al 1 % el cual exige la normativa UNE – EN 50160.



La figura 7 – 2 representa los valores obtenidos en unidades Vpu para la fase 1 (R). De forma general se observan todos los armónicos de orden impar.

Para la fase 1 (R) se presentan un máximo en el armónico 3 de 0,35 %, seguido del armónico 5 con 0,22 %, armónico 7 con 0,16 %, respecto del armónico fundamental.

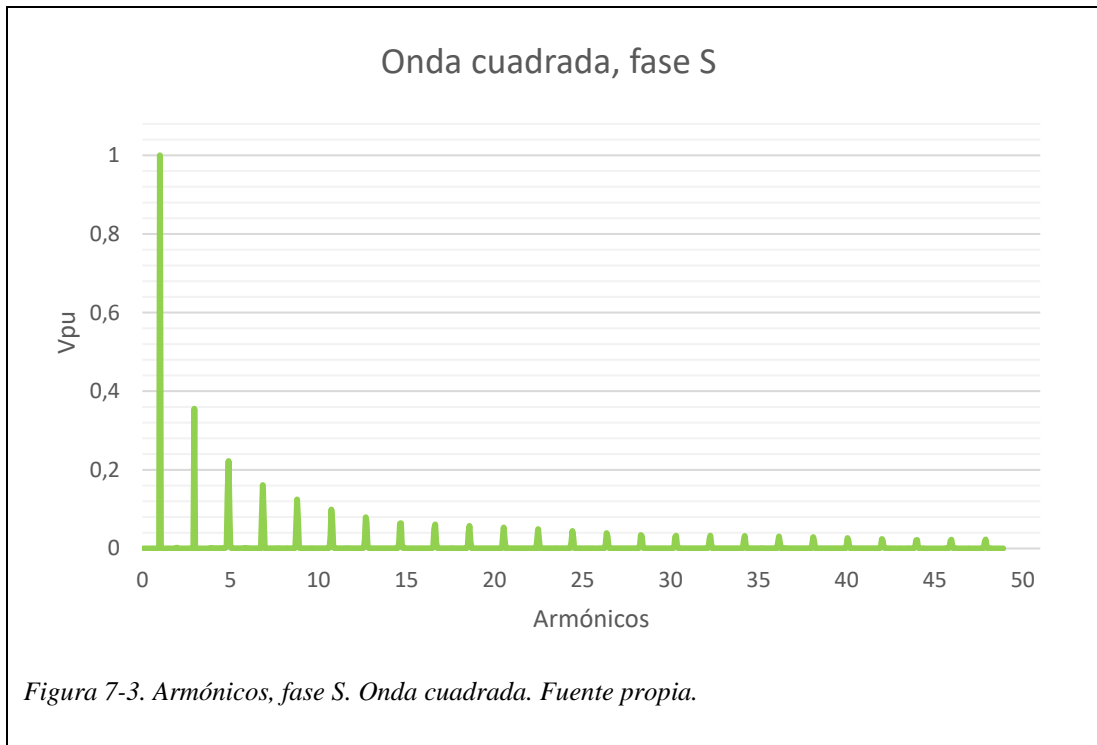
La tabla 7 – 1 muestra los parámetros de calidad para la fase 1 (R):

Parámetro de calidad	Resultado (%)
THD	51,28
WTHD	13,25
DF	4,21

Tabla 7-1. Resultados, fase 1 (R). Onda cuadrada. Fuente propia.

La figura 7 – 3 representa los valores obtenidos en unidades Vpu para la fase 2 (S). De forma general se observan todos los armónicos de orden impar.

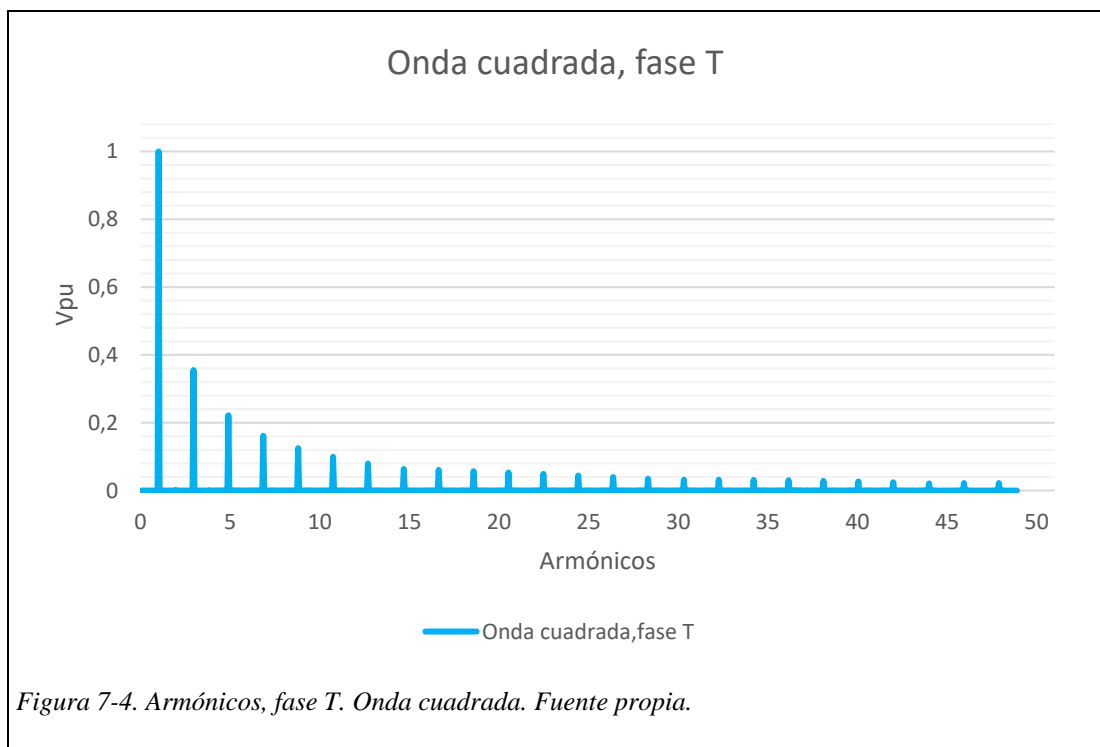
Para la fase 2 (S) se presentan un máximo en el armónico 3 de 0,35 %, seguido del armónico 5 con 0,22 %, armónico 7 con 0,16 %, respecto del armónico fundamental.



La tabla 7 – 2 muestra los parámetros de calidad para la fase 2 (S):

Parámetro de calidad	Resultado (%)
THD	51,21
WTHD	13,25
DF	4,22

Tabla 7-2. Resultados, fase 2 (S). Onda cuadrada. Fuente propia.



La figura 7 – 4 representa los valores obtenidos en unidades Vpu para la fase 3 (T). De forma general se observan todos los armónicos de orden impar.

Para la fase 3 (T) se presentan un máximo en el armónico 3 de 0,35 %, seguido del armónico 5 con 0,22 %, armónico 7 con 0,16 %, respecto del armónico fundamental.

La tabla 7 – 3 muestra los parámetros de calidad para la fase 3 (T):

Parámetro de calidad	Resultado (%)
THD	51,2
WTHD	13,25
DF	4,21

Tabla 7-3. Resultados, fase 3 (T). Onda cuadrada. Fuente propia.

Se procede a realizar el análisis línea a línea, para ello se define cada línea, siendo el conjunto de dos fases.

- Línea R – S (U12).
- Línea S – T (U23).
- Línea T – R (U31).

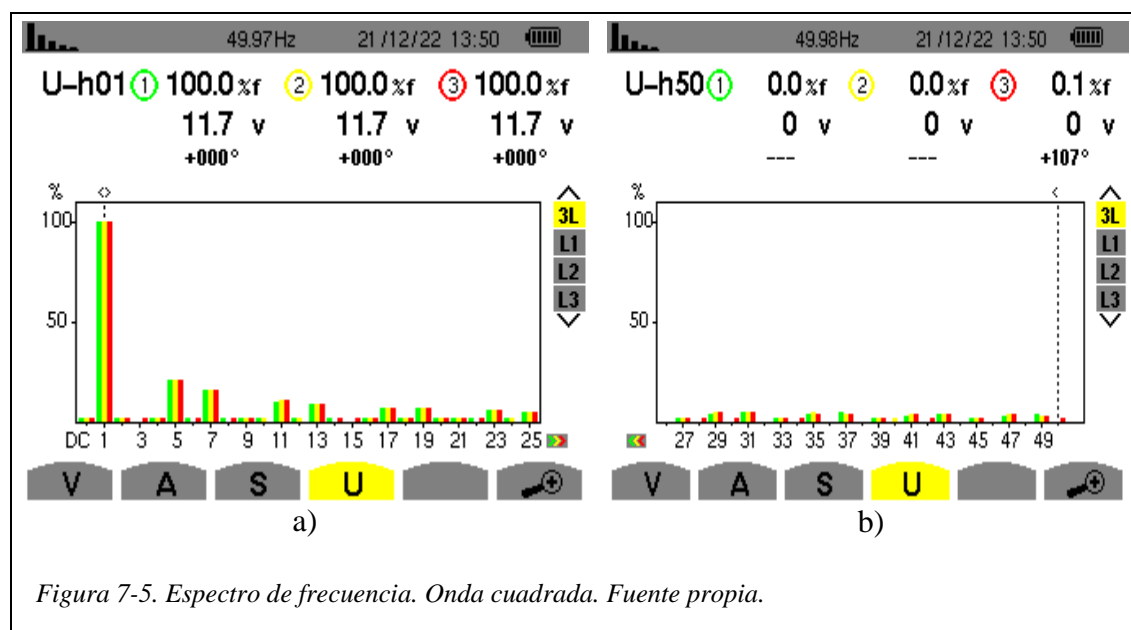


Figura 7-5. Espectro de frecuencia. Onda cuadrada. Fuente propia.

Las figura 7 – 5 a) y b) representan el espectro de frecuencia en su conjunto para la técnica onda cuadrada en valor porcentual de las tres líneas:

- 1.- Línea U12 (R – S).
- 2.- Línea U23 (S – T).
- 3.- Línea U31 (T – R).

Los armónicos múltiplos de 3 son reducidos. La frecuencia obtenida en esta medida es de 49,98 Hz.

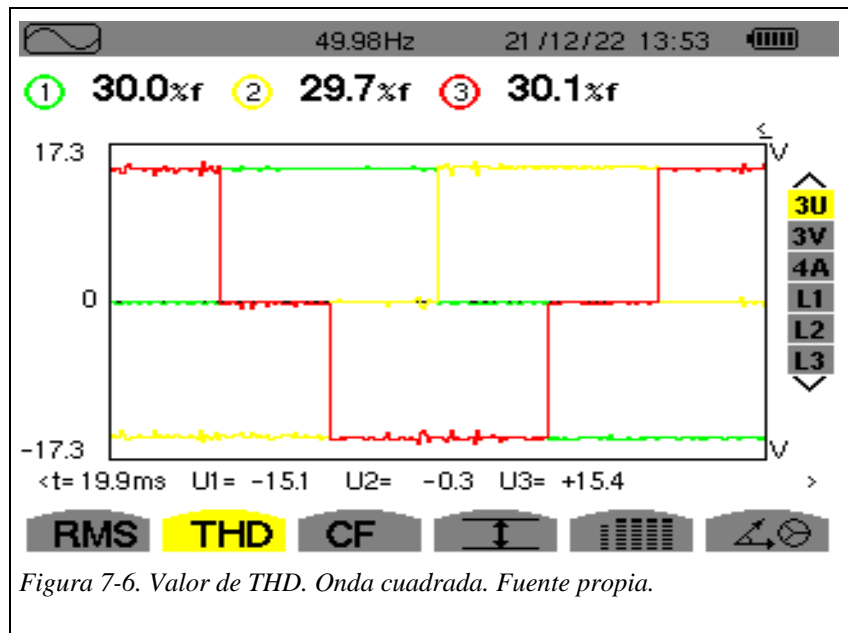
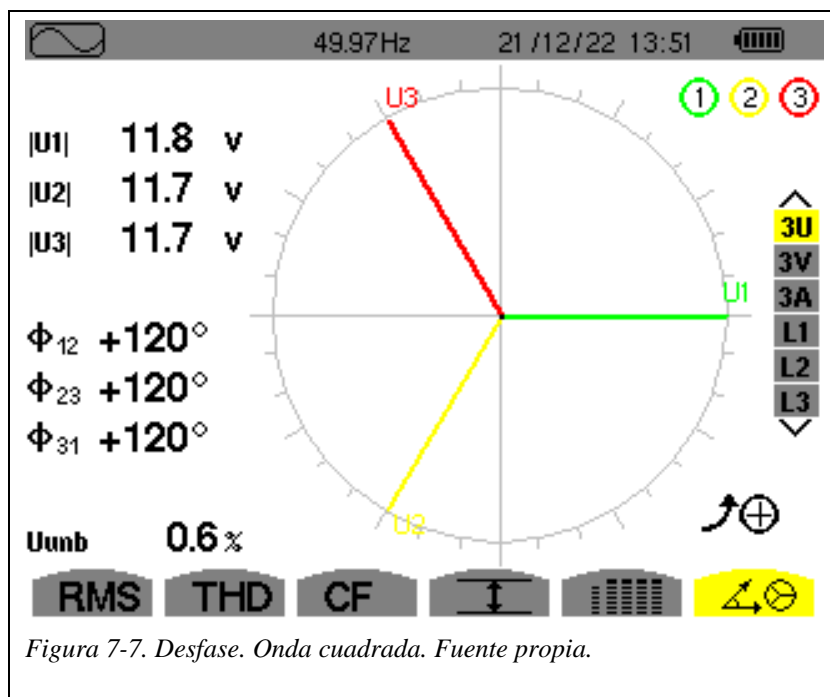


Figura 7-6. Valor de THD. Onda cuadrada. Fuente propia.

En la figura 7 – 6 se observa la señal de las tres líneas. De igual manera, el valor obtenido de THD en valor porcentual respecto del armónico fundamental para las tres líneas:

- 1.- Línea U12 (R – S), THD = 30 %.
- 2.- Línea U23 (S – T), THD = 29,7 %.
- 3.- Línea U31 (T – R), THD = 30,1 %.

De igual manera, se observa la señal de salida para cada una de las líneas con una frecuencia de 49,98 Hz.



La figura 7 – 7 representa el desfase entre las tensiones de línea, obteniendo:

- 1.- Línea U12 (R – S), $\phi_{12} = 120^\circ$.
- 2.- Línea U23 (S – T), $\phi_{23} = 120^\circ$.
- 3.- Línea U31 (T – R), $\phi_{13} = 120^\circ$.

La tabla 7 – 4 muestra los parámetros de calidad WTHD, DF:

Parámetro de calidad	Resultado (%)		
	U12	U23	U31
WTHD	4,65	4,59	4,65
DF	0,86	0,85	0,86

Tabla 7-4. Parámetros WTHD, DF, línea. Onda cuadrada. Fuente propia.

7.2 Técnica SPWM

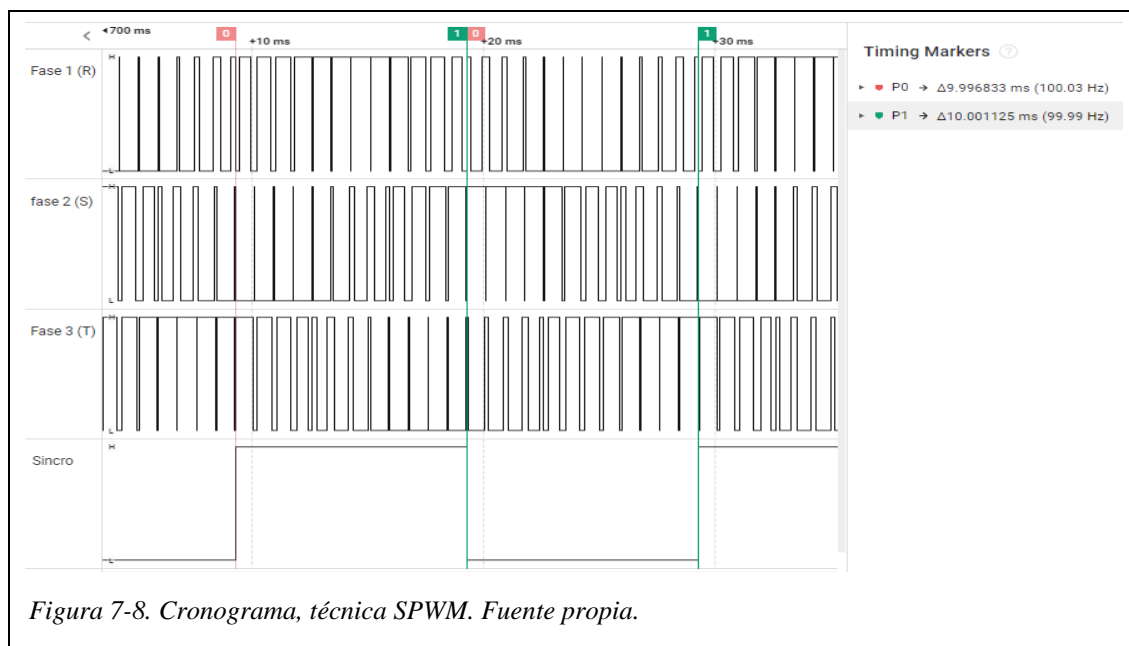


Figura 7-8. Cronograma, técnica SPWM. Fuente propia.

La figura 7 – 8 representa el cronograma el cual se obtiene mediante el analizador lógico *Analog Discovery*, la salida de las tres señales R, S, T, haciendo referencia a las etiquetas, Fase 1 (R), Fase 2 (S), Fase 3 (T) respectivamente, la señal *Sincro* define el inicio del periodo de la fase 1. La señal tiene un periodo de $9,997 \text{ ms} + 10,001 \text{ ms} = 19,998 \text{ ms}$ equivalente a $50,005 \text{ Hz}$, se tiene un error de $0,01 \%$. Siendo un error inferior al 1% el cual exige la normativa UNE – EN 50160.

Intervalo	Nivel	Valor (μs)		
		Teórico	Real	Error
1	L	181,22	182,5	0,707
	H	470,90	471,5	0,128
2	L	310,05	307,8	0,727
	H	575,66	576,58	0,160
3	L	210,71	210,16	0,255
	H	669,59	670,33	0,110
4	L	125,39	124,66	0,584
	H	746,29	747,29	0,135
5	L	59,93	59,7	0,371
	H	800,52	800,5	0,002
6	L	18,78	18,9	0,643
	H	828,59	830,8	0,267
7	L	4,74	4,708	0,746
	H	828,59	828,8	0,025
8	L	18,78	18,7	0,422
	H	800,52	800,45	0,008
9	L	59,93	60	0,116
	H	746,29	746,29	0,001
10	L	125,39	124,7	0,553
	H	669,59	670,1	0,076

11	L	210,71	210,2	0,240
	H	575,66	576,22	0,098
12	L	310,05	308,08	0,635
	H	470,90	470,87	0,005

Tabla 7-5. Tiempo de cada intervalo, SPWM. Fuente propia.

La tabla 7 – 5 se corresponde con la lectura de doce intervalos, entre 0° y 180° para la fase 1 (R), siendo un total de 24 intervalos, dicha medida se realiza a la salida del μ C. Cada intervalo tiene un tiempo a nivel bajo seguido de un tiempo a nivel alto. El pulso a nivel alto está centrado respecto del intervalo. Los valores de tiempo presentan un error inferior al 1 % con lo cual, cumple con el criterio establecido. Entre 180° y 360° los valores coinciden, de igual manera para la fase 2 (S) y fase 3 (T).

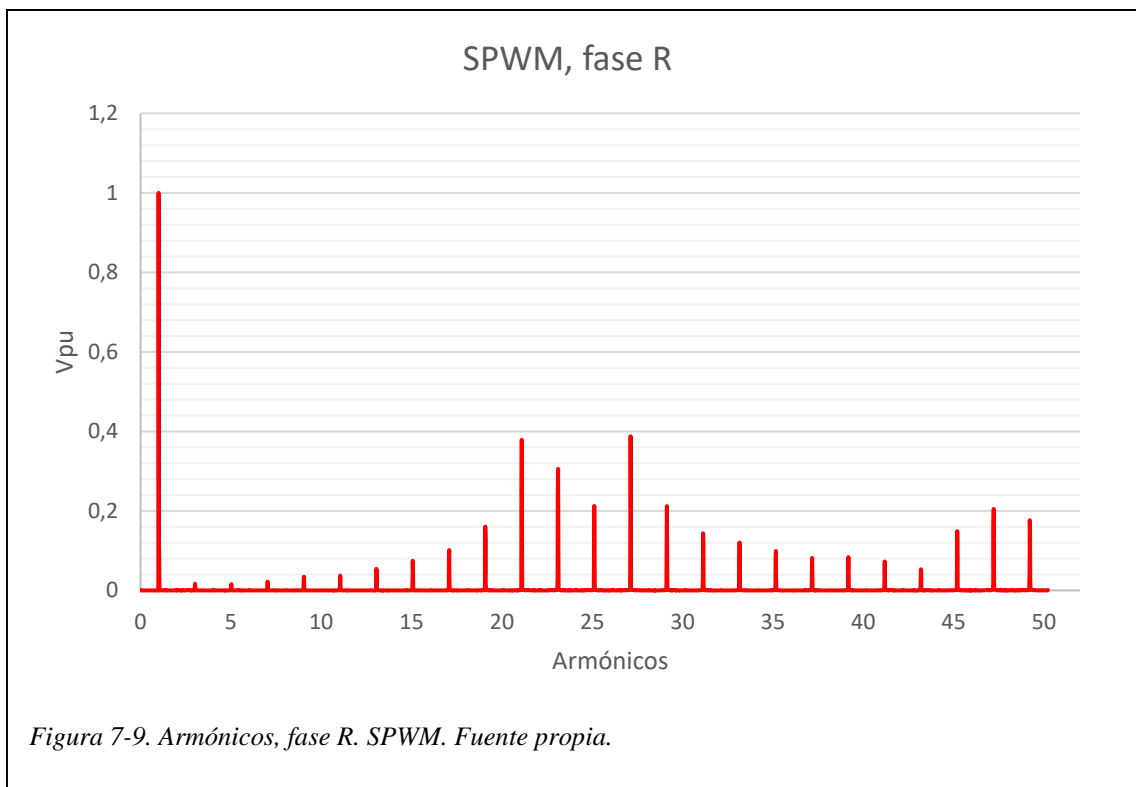


Figura 7-9. Armónicos, fase R. SPWM. Fuente propia.

La figura 7 – 9 representa los valores obtenidos en unidades Vpu para la fase 1 (R). Los armónicos se agrupan cerca del armónico 24, el cual, coincide con el índice de modulación en frecuencia ($M = 24$).

Para la fase 1 (R) se presentan un máximo en el armónico 21 y 27 de 0,38 %, seguido del armónico 23 con 0,3 %, armónico 25 y 29 con 0,21 %, respecto del armónico fundamental.

La tabla 7 – 6 muestra los parámetros de calidad para la fase 1 (R):

Parámetro de calidad	Resultado (%)
THD	53,39
WTHD	3,38
DF	0,29

Tabla 7-6. Resultados, fase R. SPWM. Fuente propia.

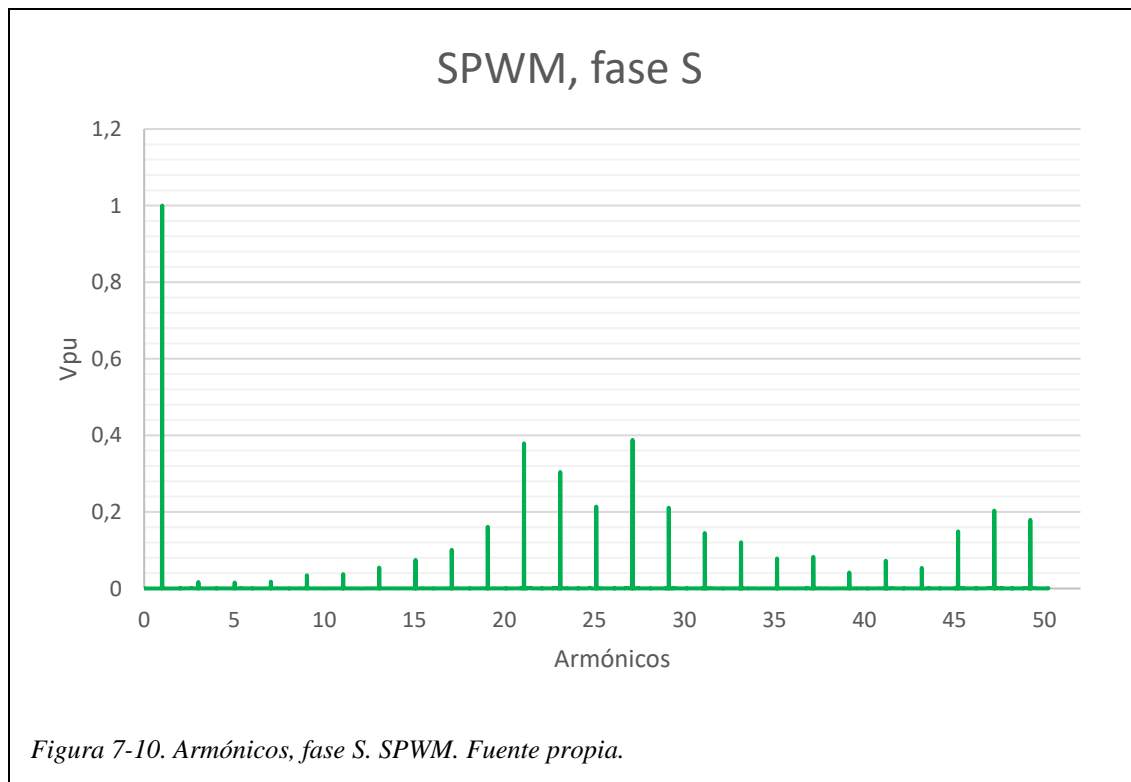


Figura 7-10. Armónicos, fase S. SPWM. Fuente propia.

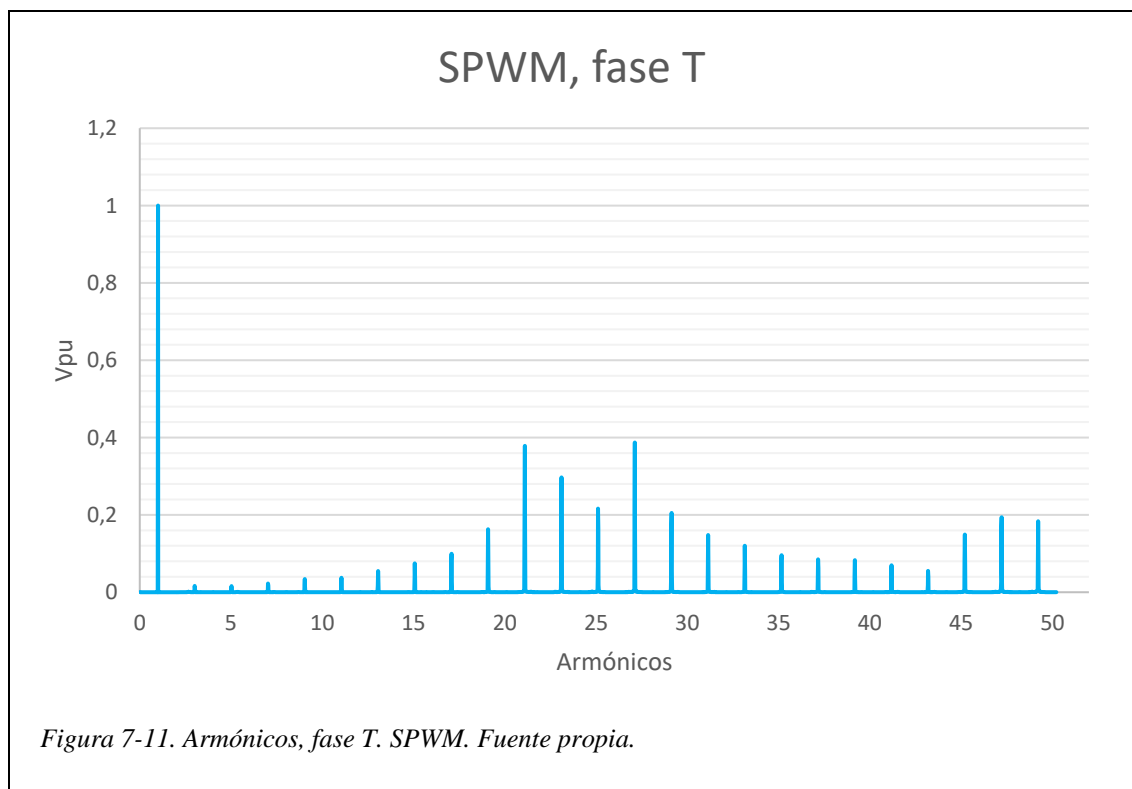
La figura 7 – 10 representa los valores obtenidos en unidades Vpu para la fase 2 (S). Los armónicos se concentran cerca del armónico 24, el cual, coincide con el índice de modulación en frecuencia ($M = 24$).

Para la fase 2 (S) se presentan un máximo en el armónico 27 de 0,39 %, seguido del armónico 21 con 0,38 %, armónico 23 con 0,3 %, armónico 25 y 29 con 0,21 %, respecto del armónico fundamental.

La tabla 7 – 7 muestra los parámetros de calidad para la fase 2 (S):

Parámetro de calidad	Resultado (%)
THD	53,31
WTHD	3,38
DF	0,33

Tabla 7-7. Resultados, fase S. SPWM. Fuente propia.



La figura 7 – 11 representa los valores obtenidos en unidades Vpu para la fase 3 (T). Los armónicos se concentran cerca del armónico 24, el cual, coincide con el índice de modulación en frecuencia ($M = 24$).

Para la fase 3 (T) se presentan un máximo en el armónico 27 de 0,39 %, seguido del armónico 21 con 0,38 %, armónico 23 con 0,29 %, armónico 25 y 29 con 0,21 %, respecto del armónico fundamental.

La tabla 7 – 8 muestra los parámetros de calidad para la fase 3 (T):

Parámetro de calidad	Resultado (%)
THD	52,89
WTHD	3,29
DF	0,31

Tabla 7-8. Resultados, fase T. SPWM. Fuente propia.

Se procede a realizar el análisis línea a línea, para ello se define cada línea, siendo el conjunto de dos fases.

- Línea R – S (U12).
- Línea S – T (U23).
- Línea T – R (U31).

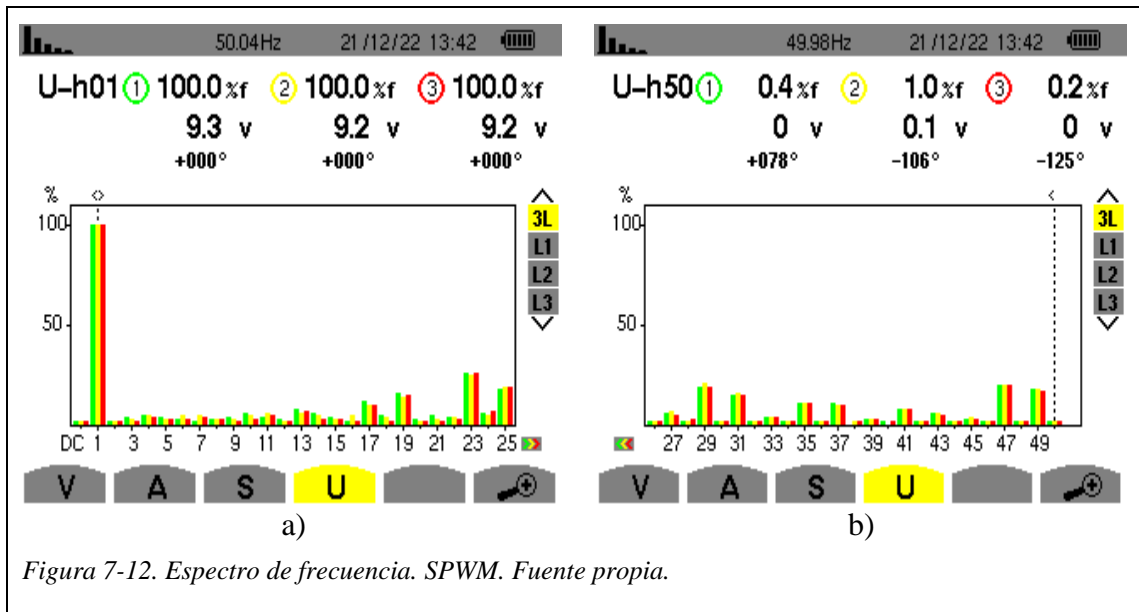


Figura 7-12. Espectro de frecuencia. SPWM. Fuente propia.

Las figura 7 – 12 a) y b) representan el espectro de frecuencia en su conjunto para la técnica *onda cuadrada* en valor porcentual de las tres líneas:

- 1.- Línea U12 (R – S).
- 2.- Línea U23 (S – T).
- 3.- Línea U31 (T – R).

Los armónicos múltiplos de 3 son reducidos. La frecuencia obtenida en esta medida es de 50,05 Hz .

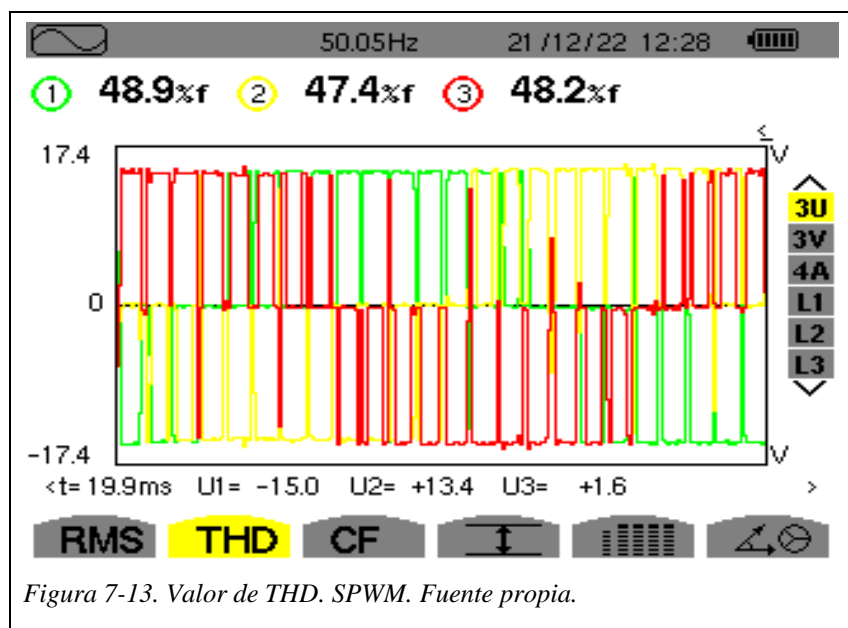
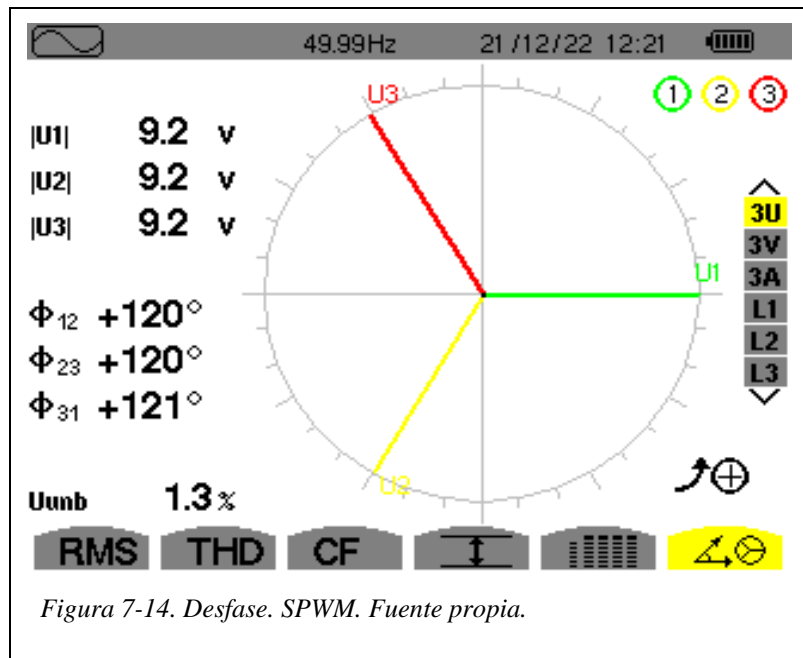


Figura 7-13. Valor de THD. SPWM. Fuente propia.

En la figura 7 – 13 se observa la señal de las tres líneas. De igual manera, el valor obtenido de THD en valor porcentual respecto del armónico fundamental para las tres líneas:

- 1.- Línea U12 (R – S), THD = 48,9 %.
- 2.- Línea U23 (S – T), THD = 47,4 %.
- 3.- Línea U31 (T – R), THD = 48,2 %.

De igual manera, se observa la señal de salida para cada una de las líneas con una frecuencia de 50,05 Hz.



La figura 7 – 14 representa el desfase entre las tensiones de línea, obteniendo:

- 1.- Línea U12 (R – S), $\phi_{12} = 120^\circ$.
- 2.- Línea U23 (S – T), $\phi_{23} = 120^\circ$.
- 3.- Línea U31 (T – R), $\phi_{13} = 121^\circ$.

La tabla 7 – 9 muestra los parámetros de calidad WTHD, DF:

Parámetro de calidad	Resultado (%)		
	U12	U23	U31
WTHD	2,09	2,05	2,09
DF	0,18	0,17	0,23

Tabla 7-9. Parámetros WTHD, DF. SPWM. Fuente propia.

7.3 Técnica MSPWM

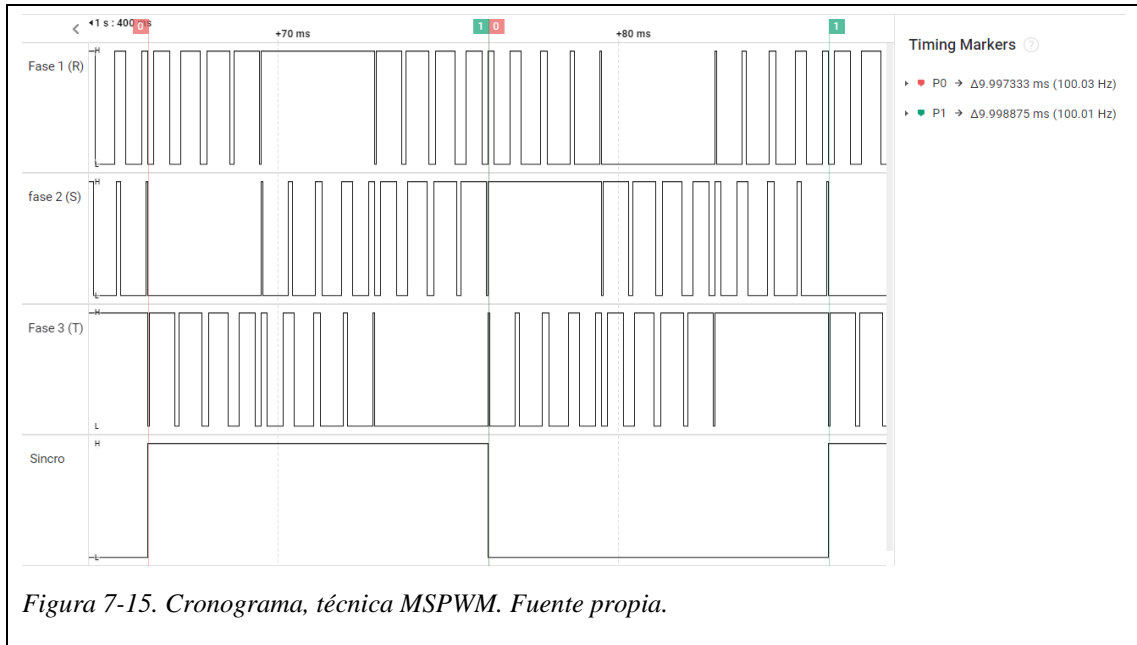


Figura 7-15. Cronograma, técnica MSPWM. Fuente propia.

La figura 7 – 15 representa el cronograma el cual se obtiene mediante el analizador lógico *Analog Discovery*. La salida de las tres señales R, S, T, haciendo referencia a Fase 1 (R), Fase 2 (S), Fase 3 (T) respectivamente, la señal *Sincro* define el inicio del periodo de la fase 1. La señal tiene un periodo de $9,9978 \text{ ms} + 9,9988 \text{ ms} = 19,9962 \text{ ms}$ equivalente a $50,009 \text{ Hz}$, se tiene un error de $0,019 \%$. Siendo un error inferior al 1% el cual exige la normativa UNE – EN 50160.

Intervalos	Nivel	Tiempo (μs)		Error (%)
		Teórico	Real	
1	L	181,218	179,8	0,78246515
	H	470,90	471,04	0,03070766
2	L	128,835	128,14	0,53720067
	H	575,66	575,75	0,0150909
3	L	81,870	81,642	0,27838268
	H	669,59	669,06	0,07863129
4	L	43,523	43,75	0,5215784
	H	746,29	745,29	0,13337308
5	H	833,33	833,41	0,00992
6	H	833,33	833,51	0,02144
7	H	833,33	833,41	0,01004
8	H	833,33	833,61	0,03356
9	L	43,523	43,29	0,53073892
	H	746,29	745,6	0,09210211

10	L	81,870	81,62	0,29914733
	H	669,59	669,08	0,07624178
11	L	128,835	127,94	0,69243787
	H	575,66	575,91	0,04410092
12	L	181,218	182,37	0,63847563
	H	470,90	471	0,02178852

Tabla 7-10. Tiempo de cada intervalo, MSPWM. Fuente propia.

La tabla 7 – 10 se corresponde con la lectura de doce intervalos, entre 0° y 180° para la fase 1 (R), siendo un total de 24 intervalos, dicha medida se realiza a la salida del μC . Cada intervalo tiene un tiempo a nivel bajo seguido de un tiempo a nivel alto. El pulso a nivel alto está centrado respecto del intervalo.

Los valores de tiempo presentan un error inferior al 1 % con lo cual cumple con el criterio establecido. Entre 180° y 360° los valores se repiten, de igual manera para la fase 2 (S) y fase 3 (T).

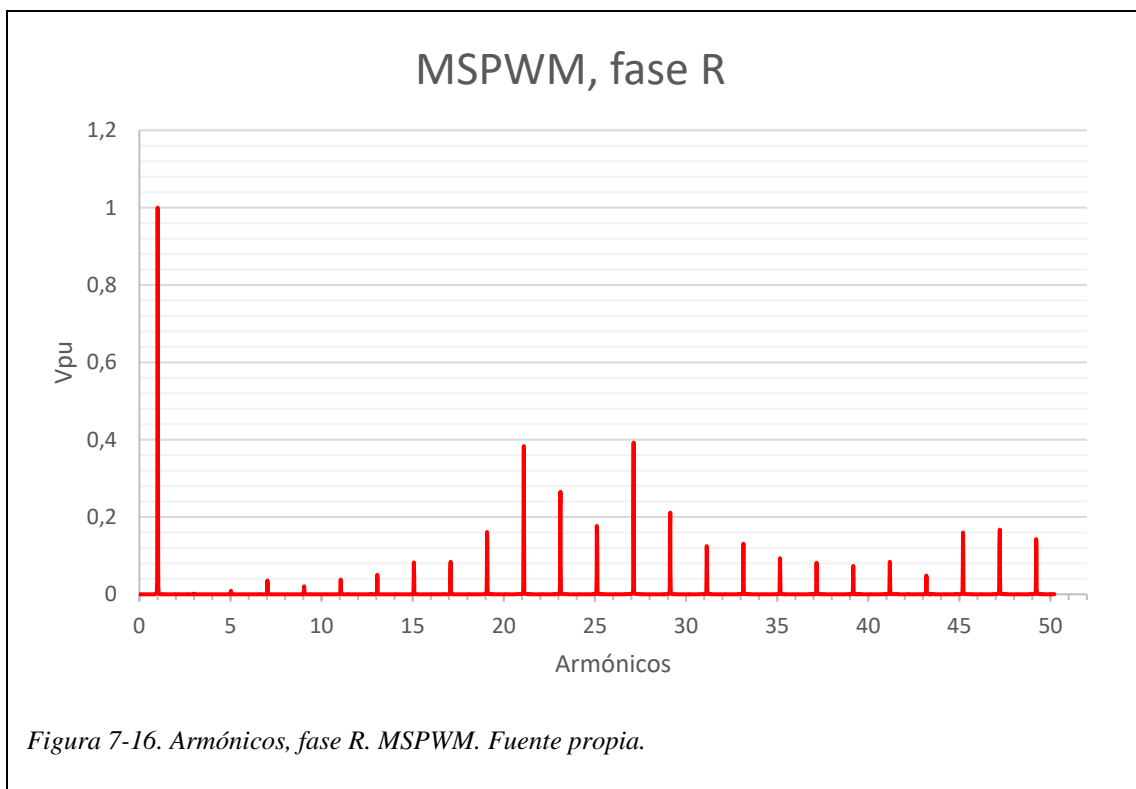


Figura 7-16. Armónicos, fase R. MSPWM. Fuente propia.

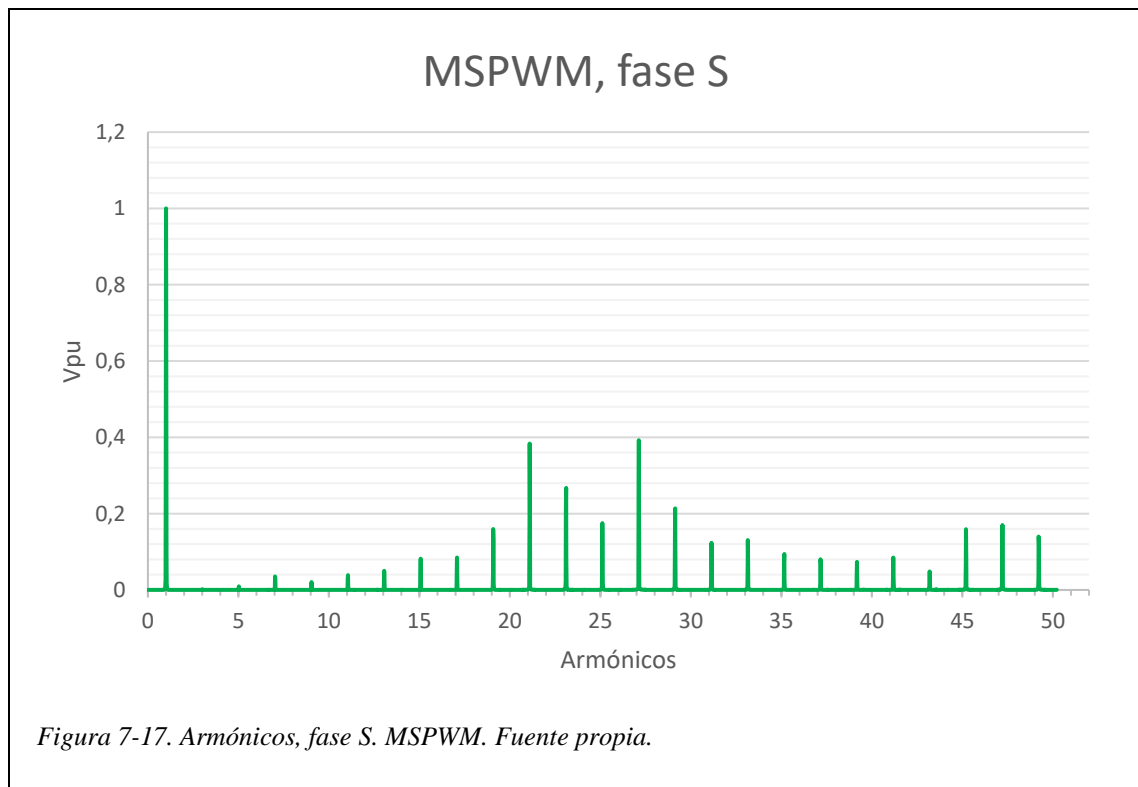
La figura 7 – 16 representa los valores obtenidos en unidades Vpu para la fase 1 (R). Los armónicos se concentran cerca del armónico 24, el cual, coincide con el índice de modulación en frecuencia ($M = 24$).

Para la fase 1 (R) se presentan un máximo en el armónico 27 de 0,39 %, seguido del armónico 21 con 0,38 %, armónico 23 con 0,26 %, armónico 29 con 0,21 %, respecto del armónico fundamental.

La tabla 7 – 11 muestra los parámetros de calidad para la fase 1 (R):

Parámetro de calidad	Resultado (%)
THD	51,27
WTHD	3,23
DF	0,25

Tabla 7-11. Resultados, fase R. MSPWM. Fuente propia.



La figura 7 – 17 representa los valores obtenidos en unidades Vpu para la fase 2 (S). Los armónicos se concentran cerca del armónico 24, el cual, coincide con el índice de modulación en frecuencia ($M = 24$).

Para la fase 2 (S) se presentan un máximo en el armónico 27 de 0,39 %, seguido del armónico 21 con 0,38 %, armónico 23 con 0,27 %, armónico 29 con 0,21 %, respecto del armónico fundamental.

La tabla 7 – 12 muestra los parámetros de calidad para la fase 2 (S):

Parámetro de calidad	Resultado (%)
THD	51,37
WTHD	3,24
DF	0,24

Tabla 7-12. Resultados, fase S. MSPWM. Fuente propia.

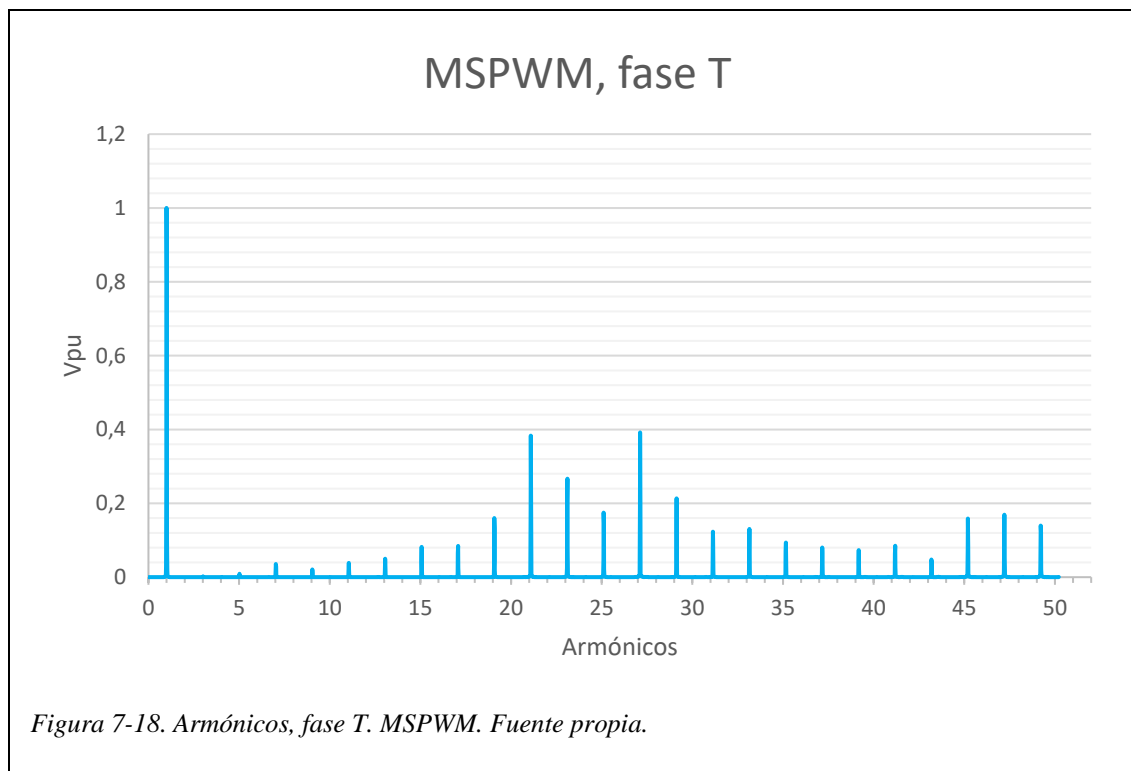


Figura 7-18. Armónicos, fase T. MSPWM. Fuente propia.

La figura 7 – 18 representa los valores obtenidos en unidades Vpu para la fase 3 (T) . Los armónicos se concentran cerca del armónico 24, el cual, coincide con el índice de modulación en frecuencia ($M = 24$).

Para la fase 3 (T) se presentan un máximo en el armónico 27 de 0,39 %, seguido del armónico 21 con 0,38 %, armónico 23 y 29 con 0,21 %, respecto del armónico fundamental.

La tabla 7 – 13 muestra los parámetros de calidad para la fase 3 (T):

Parámetro de calidad	Resultado (%)
THD	51,32
WTHD	3,23
DF	0,23

Tabla 7-13. Resultados, fase T. MSPWM. Fuente propia.

Se procede a realizar el análisis línea a línea, para ello se define cada línea, siendo el conjunto de dos fases.

- Línea R – S (U12).
- Línea S – T (U23).
- Línea T – R (U31).

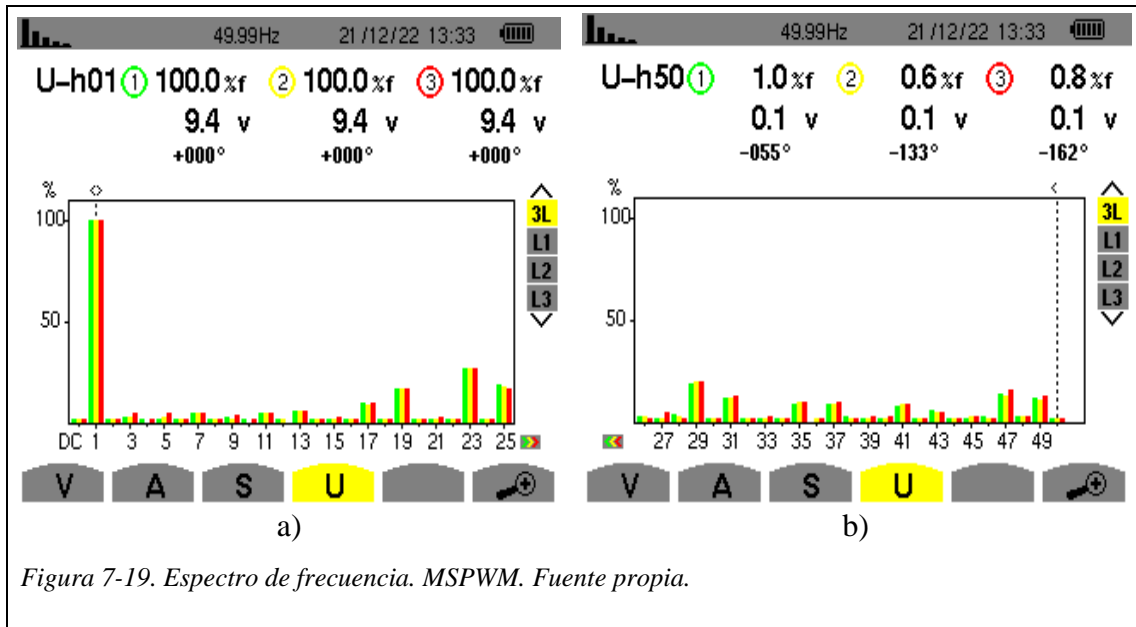


Figura 7-19. Espectro de frecuencia. MSPWM. Fuente propia.

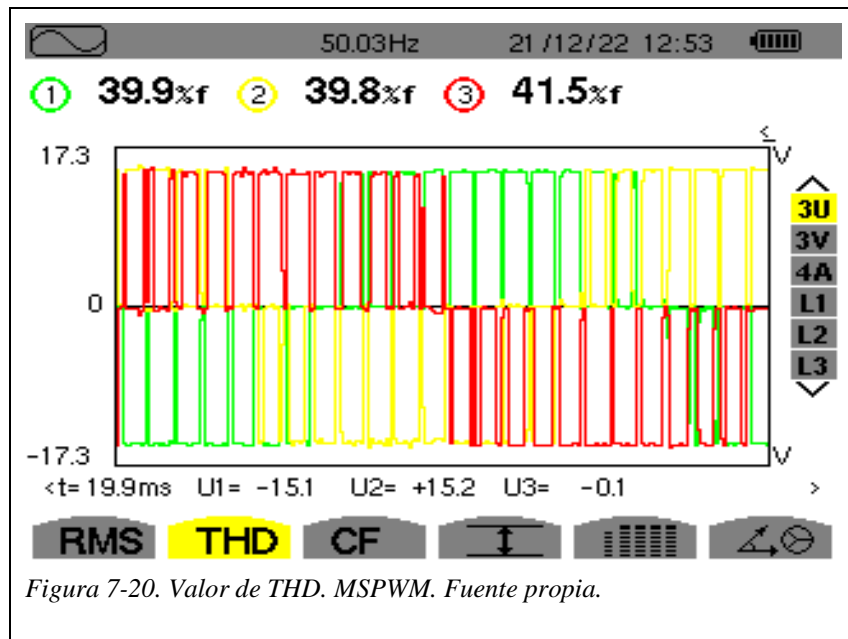
Las figura 7 – 19 a) y b) representan el espectro de frecuencia en su conjunto para la técnica *onda cuadrada* en valor porcentual de las tres líneas:

- 1.- Línea U12 (R – S).
- 2.- Línea U23 (S – T).
- 3.- Línea U31 (T – R).

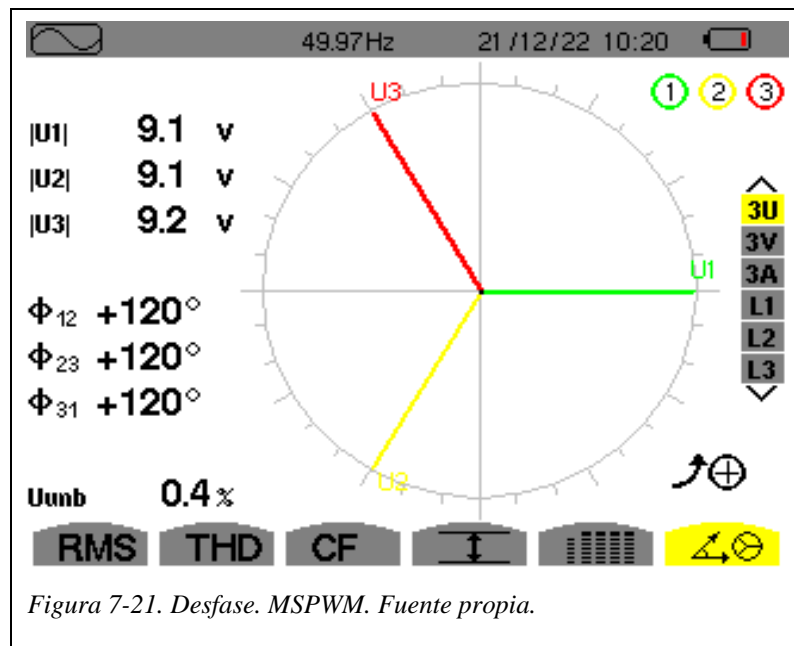
Los armónicos múltiplos de 3 son reducidos. La frecuencia obtenida en esta medida es de 49,99 Hz .

En la figura 7 – 20 se observa el valor obtenido de THD en valor porcentual respecto del armónico fundamental para las tres líneas:

- 1.- Línea U12 (R – S), THD = 39,9 %.
- 2.- Línea U23 (S – T), THD = 39,8 %.
- 3.- Línea U31 (T – R), THD = 41,5 %.



De igual manera, se observa la señal de salida para cada una de las líneas con una frecuencia de 50,03 Hz.



La figura 7 – 21 representa el desfase entre las tres fases, obteniendo:

- 1.- Línea U12 (R - S), $\phi_{12} = 120^\circ$.
- 2.- Línea U23 (S - T), $\phi_{23} = 120^\circ$.
- 3.- Línea U31 (R - T), $\phi_{13} = 120^\circ$.

La tabla 7 – 14 muestra los parámetros de calidad WTHD, DF:

Parámetro de calidad	Resultado (%)		
	U12	U23	U31
WTHD	1,90	1,94	1,89
DF	0,24	0,28	0,26

Tabla 7-14. Parámetros WTHD, DF. MSPWM. Fuente propia.

7.4 Resultados

Se realiza una comparativa con los datos obtenidos. Aporta una mayor claridad para analizar los parámetros adquiridos.

Técnicas	THD (%)						
	Salida de inversor						Simulación
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Línea U12	Línea U23	Línea U31	Línea U12, U23,U31.
Onda Cuadrada	51,28	51,21	51,2	30	30,1	29,7	29,92
SPWM	53,39	53,31	52,89	48,9	48,2	47,4	48,66
MSPWM	51,27	51,37	51,32	39,9	41,5	39,8	---

Tabla 7-15. Comparativa THD. Fuente propia.

La tabla 7 – 15 detalla los resultados finales para el parámetro de calidad THD:

- En el método *onda cuadrada*, el parámetro THD para cada una de las líneas, no es un valor alto pero los armónicos están cerca de la frecuencia fundamental, con lo cual incrementa la dificultad para ser eliminados [5]. Los valores de línea U12, U23, U31, son muy parecidos al valor obtenido en la simulación.
- En la técnica SPWM, el parámetro THD para cada una de las líneas es el peor entre todas las técnicas. De igual manera, esta técnica desplaza los armónicos al rango de altas frecuencias alrededor del índice de modulación de frecuencia y sus múltiplos [7], es decir, los armónicos de mayor amplitud distintos del fundamental se encuentran sobre el armónico 24. Los valores de línea U12, U23, U31, son muy parecidos al valor obtenido en la simulación.
- En la técnica MSPWM, el parámetro THD para cada una de las líneas es alto pero inferior a la técnica SPWM. La técnica MSPWM realiza una disminución en el número de conmutaciones, con lo cual, se ve disminuido el parámetro THD [9] en referencia a la técnica SPWM.

Técnicas	WTHD (%)						
	Salida de inversor						Simulación
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Línea U12	Línea U23	Línea U31	Línea U12, U23,U31.
Onda Cuadrada	13,25	13,25	13,25	4,65	4,65	4,59	4,63
SPWM	3,38	3,38	3,29	2,09	2,09	2,05	1,94
MSPWM	3,23	3,24	3,23	1,90	1,89	1,94	---

Tabla 7-16. Comparativa WTHD. Fuente propia.

La tabla 7 – 16 detalla los resultados finales para el parámetro de calidad WTHD:

- En el método *onda cuadrada*, el parámetro WTHD para cada una de las líneas es un valor alto. Las componentes armónicas existentes en la técnica afectan en gran medida por su peso, es decir, se encuentran cerca del armónico fundamental. Los valores de línea U12, U23, U31, son muy parecidos al valor obtenido en la simulación.
- En la técnica SPWM, el parámetro WTHD para cada una de las líneas presenta un valor inferior a la técnica *onda cuadrada*. Gracias a que las componentes armónicas de mayor amplitud se encuentran sobre el índice de modulación de frecuencia. Los valores de línea U12, U23, U31, son muy parecidos al valor obtenido en la simulación.
- En la técnica MSPWM, el parámetro WTHD para cada una de las líneas es el mejor entre las tres técnicas.

Técnicas	DF (%)						
	Salida de inversor						Simulación
	Fase 1	Fase 2	Fase 3	Línea U12	Línea U23	Línea U31	Línea U12, U23,U31.
Onda Cuadrada	4,21	4,22	4,21	0,86	0,86	0,85	0,85
SPWM	0,29	0,33	0,31	0,18	0,23	0,17	0,1
MSPWM	0,25	0,24	0,23	0,24	0,26	0,28	---

Tabla 7-17. Comparativa DF. Fuente propia.

La tabla 7 – 17 detalla los resultados finales para el parámetro de calidad DF:

- En el método *onda cuadrada*, el parámetro DF para cada una de las líneas, es el valor más alto entre las tres técnicas. Los valores de línea U12, U23, U31, son muy parecidos al valor obtenido en la simulación.

- En la técnica SPWM, el parámetro DF para cada una de las líneas es el mejor de las tres técnicas. Con lo cual, indica la cantidad de THD que queda al aplicar un filtro de segundo orden [7]. Los valores de línea U12, U23, U31, son alrededor del doble del valor obtenido en la simulación.
- En la técnica MSPWM, el parámetro DF es el segundo mejor valor, con lo cual, al aplicar un filtro de segundo orden seguirá existiendo componentes armónicas no deseadas.

Capítulo 8

8 Presupuesto

8.1 Presupuesto componentes

Descripción	Cantidad	Precio unitario (€)	%	Precio total (€)
Launchpad MCU Devkit, MSP-EXP430FR2355	1	19,85		19,85
Cable de acoplamiento. Tipo enchufe. 40 hilos, 20 cm, Ø 2.54 mm.	1	0,99		0,99
Total, sin IVA				20,84
IVA			21	4,3764
Total				25,2164

8.2 Mano de obra

Descripción	Horas	Precio (€)	%	Precio total (€)
Diseño, desarrollo y montaje	120	35,124		4.214,88
Total, sin IVA				4.214,88
IVA			21	885,12
Total				5.100,00

8.3 Presupuesto total

Descripción	Precio total (€)
Presupuesto componentes	25,22
Mano de obra	5.100,00
Total	5.125,22

Capítulo 9

9 Conclusiones

9.1 Técnicas

Mediante el método *onda cuadrada* solo se pretendía tener un punto de partida y observar con claridad la diferencia al aplicar una de las técnicas de modulación. El desarrollo de las técnicas de modulación SPWM y MSPWM presentan gran similitud, pero teniendo presente la reducción en el parámetro de calidad THD de técnica MSPWM.

9.2 Implementación

Realizar la implementación por tablas es, en gran medida un método cómodo de trabajar. Hace que el μC trabaje con pocos recursos y el código a implementar no presente gran dificultad.

9.3 Resultados

Los resultados obtenidos en cada una de las técnicas han sido mejor de lo esperado. Gracias al método *onda cuadrada* se observa un gran salto de mejoría en los parámetros de calidad al implementar cualquiera de las técnicas de modulación. El realizar la simulación, brinda claridad en los resultados obtenidos, ya que, confirma la correcta implantación de las técnicas.

Las técnicas SPWM y MSPWM presentan un alto valor de THD, pero se debe tener presente que los armónicos están situados sobre el armónico 24, con lo cual, el implementar un filtro hace que se cumpla con la normativa UNE – EN 50160.

Capítulo 10

10 Bibliografía

- [1] Fuentes de energía renovable <https://escandinavaelectricidad.es>. Última consulta 21/12/2022
- [2] Johnny Posada Contreras. Una introducción a las técnicas de modulación. Revista, ISSN: 0121 – 0777.
- [3] Schönung, A. y Stemmler, H. (1964). Static frequency changers with subharmonic control in conjunction with reversable variable speed AC drives. Brown Boveri Review.
- [4] Guillermo Camacho M. Diana López M . Jaime Díaz C. Carlos Gaviria L. Caracterización de las técnicas de modulación Pulse Width Modulation (PWM) aplicadas a inversores trifásicos. Revista épsilon, nº 19, ISSN 1692 – 1259. Octubre 2012.
- [5] Wohler Gonzales Saenz. Modulador por anchura de pulso sinusoidal SPWM para un inversor monofásico de 60 Hz de bajo costo. Universidad nacional de Huancavelica, mayo 2021.
- [6] AHMET M. HAVA, et. all: Carrier-Based PWM – VSI Overmodulation Strategies: Analysis, Comparison, and Design. IEEE Transactions on Power Electronics. Vol 13, No 4 July 1998.
- [7] MUHAMMAD H. RASHID. ELECTRÓNICA DE POTENCIA. Segunda edición, ISBN: 968 – 880 – 586 – 6.
- [8] Daniel W. Hart. Electrónica de Potencia Pearson Educación, S. A., Madrid, 2001 ISBN: 84 – 205 – 3179 – 0.
- [9] William Manuel Gonzáles Gallegos. TFG, Análisis de las técnicas modernas de modulación aplicada a los sistemas CD/CA. 2012.
- [10] AENOR UNE-EN50160, “Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución”, marzo 2011.
- [11] Pedro J. Sotorrío Ruiz. Modulador SPWM realizado por medio de un microcontrolador. Septiembre 2013.
- [12] TEXAS INSTRUMENT. Hoja de característica para los modelos MSP430FR2XX. SLAU445I. octubre 2014, Rev. marzo 2019.
<https://www.ti.com/lit/ug/slau445i/slau445i.pdf>. Última consulta 21/12/2022
- [13] TEXAS INSTRUMENT. Hoja de característica del modelo MSP430FR2355. SLASEC4D, mayo 2018. Rev. diciembre 2019.

<https://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fr2355.pdf>. Última consulta 21/12/2022

[14] TEXAS INSTRUMENT. Placa de desarrollo MSP-EXP430FR2355. SLAU680, mayo 2018. <https://www.ti.com/lit/ug/slau680/slau680.pdf>. Última consulta 21/12/2022

[15] TEXAS INSTRUMENT. Herramienta Lenguaje ensamblador V21.6.0.LTS. SLAU131Y, octubre 2004, Rev. junio 2021. <https://www.ti.com/lit/ug/slau131y>. Última consulta 21/12/2022

Capítulo 11

11 Anexo

11.1 Programación del μ C

Este anexo contiene toda la programación empleada para realizar el correcto funcionamiento de las técnicas trabajadas en el capítulo 3.

```

main.asm                                viernes, 23 de diciembre de 2022 16:31
;*****
3 ; MSP430FR2355
4 ; Carlos Andrés Ospina Franco
5 ; Texas Instruments Inc.
6 ; Dic. 2022
7 ; Built with Code Composer Studio v12
8 ;*****
9
10     .cdecls C,LIST,"msp430.h"          ; Se incluye encabezado. Dispositivo
11 ;-----
12     .def RESET                          ; Punto de entrada del programa.
13 ;-----
14     .global __STACK_END
15     .sect .stack                        ; Dirección de la pila
16     .global _main
17     .text                               ; Ensamblar a la memoria Flash
18     .retain                             ; Confirmar. Vincular sección
19     .retainrefs
20 ;-----
21 ;=====Variables=====
22     CERO                                .word 0x0000
23     UNO                                 .word 0x0001
24     DOS                                 .word 0x0002
25     TRES                                .word 0x0003
26     CUATRO                              .word 0x0004
27     LLENO                               .byte 0xFF
28     MH                                  .byte 0xF0
29     ML                                  .byte 0x0F
30     BASE1_T                             .word 0xD031
31     BASE2_T                             .word 0x3407
32
33 ;=====Valores Modulación ONDA CUADRADA=====
34     .global tablaOC1
35     tablaOC1 .word 0x4571,0x4571,0x4571,0x4571,0x4571,0x4571
36     .word 0x4571,0x4571,0x4571,0x4571,0x4571,0x4571,0x0000
37
38     .global tablaOC2
39     tablaOC2 .word 0x4571,0x4571,0x4571,0x4571,0x4571,0x4571
40     .word 0x4571,0x4571,0x4571,0x4571,0x4571,0x4571
41
42     .global tablaOC3
43     tablaOC3 .word 0x4571,0x4571,0x4571,0x4571,0x4571,0x4571
44     .word 0x4571,0x4571,0x4571,0x4571,0x4571,0x4571
45
46 ;=====Valores Modulación Onda cuadrada. Activación patillas=====
47     .global tablaOCP1
48     tablaOCP1 .word 0x1111,0x1111,0x1111,0x1111,0x1011,0x0000
49     .word 0x0000,0x0000,0x0000
50

```

```

51      .global tablaOCP2
52 tablaOCP2 .word 0x0000,0x0000,0x0000,0x0101,0x0101,0x0101
53      .word 0x0101,0x0001,0x0000
54
55      .global tablaOCP3
56 tablaOCP3 .word 0x0101,0x0001,0x0000,0x0000,0x0000,0x0000
57      .word 0x0101,0x0101,0x0101
58
59 ;=====Valores Modulación SPWM=====
60      .global tablaS1
61 tablaS1  .word 0x0B97,0x2908,0x083A,0x2C37,0x0545,0x2F13,0x02E7,0x318B,0x0141
62      .word 0x333C,0x0030,0x3404,0x0030,0x3404,0x0141,0x333C,0x02E7,0x318B
63      .word 0x0545,0x2F13,0x083A,0x2C37,0x0B97,0x2908;semiperiodo
64      .word 0x0B97,0x2908,0x083A,0x2C37,0x0545,0x2F13,0x02E7,0x318B,0x0141
65      .word 0x333C,0x0030,0x3404,0x0030,0x3404,0x0141,0x333C,0x02E7,0x318B
66      .word 0x0545,0x2F13,0x083A,0x2C37,0x0B97,0x2908,0x0000
67      ;final
68
69      .global tablaS2
70 tablaS2  .word 0x0141,0x333C,0x0030,0x33F4,0x0030,0x33F4,0x0141,0x333C,0x02E7
71      .word 0x318B,0x0545,0x2F13,0x083A,0x2C37,0x0B97,0x2908,0x0B97,0x2908
72      .word 0x083A,0x2C37,0x0545,0x2F13,0x02E7,0x318B,0x0141,0x333C,0x0030
73      .word 0x3404,0x0030,0x3404,0x0141,0x333C,0x02E7,0x318B,0x0545,0x2F13
74      .word 0x083A,0x2C37,0x0B97,0x2908,0x0B97,0x2908,0x083A,0x2C37,0x0545
75      .word 0x2F13,0x02E7,0x318B
76
77      .global tablaS3
78 tablaS3  .word 0x02E7,0x318B,0x0545,0x2F13,0x083A,0x2C37,0x0B97,0x2908,0x0B97
79      .word 0x2908,0x083A,0x2C37,0x0545,0x2F13,0x02E7,0x318B,0x0141,0x333C
80      .word 0x0030,0x33F0,0x0030,0x33F0,0x0141,0x333C,0x02E7,0x318B,0x0545
81      .word 0x2F13,0x083A,0x2C37,0x0B97,0x2908,0x0B97,0x2908,0x083A,0x2C37
82      .word 0x0545,0x2F13,0x02E7,0x318B,0x0141,0x333C,0x0030,0x3404,0x0030
83      .word 0x3404,0x0141,0x333C,0x02E7,0x318B,0x054F
84
85
86 ;=====Valores Modulación SPWM. Activación patillas=====
87      .global tablaSP1
88 tablaSP1 .word 0x1110,0x1010,0x1011,0x1110,0x1010,0x1011,0x1110,0x1010,0x1011
89      .word 0x1110,0x1010,0x1011,0x1110,0x1010,0x1011,0x1110,0x1010,0x1011
90      ;fin de semiperiodo
91      .word 0x0001,0x0101,0x0100,0x0001,0x0101,0x0100,0x0001,0x0101,0x0100
92      .word 0x0001,0x0101,0x0100,0x0001,0x0101,0x0100,0x0001,0x0101,0x0100
93      ;fin del periodo
94
95      .global tablaSP2
96 tablaSP2 .word 0x0001,0x0101,0x0100,0x0001,0x0101,0x0100,0x0001,0x0101,0x0100
97      .word 0x0001,0x0101,0x0100,0x0100,0x0000,0x0001,0x0100,0x0000,0x0001
98      .word 0x0100,0x0000,0x0001,0x0100,0x0000,0x0001,0x0100,0x0000,0x0001
99      .word 0x0100,0x0000,0x0001,0x0001,0x0101,0x0100,0x0001,0x0101,0x0100
100
101      .global tablaSP3
102 tablaSP3 .word 0x0100,0x0000,0x0001,0x0100,0x0000,0x0001,0x0001,0x0101,0x0100
103      .word 0x0001,0x0101,0x0100,0x0001,0x0101,0x0100,0x0001,0x0101,0x0100
104      .word 0x0001,0x0101,0x0100,0x0001,0x0101,0x0100,0x0100,0x0000,0x0001
105      .word 0x0100,0x0000,0x0001,0x0100,0x0000,0x0001,0x0100,0x0000,0x0001
106
107 ;=====Valores Modulación MSPWM=====
108      .global tablaMS1
109 tablaMS1 .word 0x0B5C,0x28B4,0x0815,0x2C06,0x0545,0x2F13,0x02E0,0x3170,0x1153
110      .word 0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x02D5,0x316B
111      .word 0x0545,0x2F13,0x0815,0x2C06,0x0B5C,0x28B4 ;semiperiodo
112      .word 0x0B5C,0x28B5,0x0815,0x2C06,0x0545,0x2F13,0x02E0,0x3170,0x1153
113      .word 0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x02D0,0x316B
114      .word 0x0545,0x2F13,0x080B,0x2BFC,0x0B5C,0x28BE,0x0000 ;fin
115
116      .global tablaMS2
117 tablaMS2 .word 0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x02D5

```

```

118      .word 0x3168,0x0545,0x2F13,0x080B,0x2BFC,0x0B5C,0x28BE,0x0B5C,0x28B4
119      .word 0x080B,0x2BFC,0x0545,0x2F13,0x02E0,0x3170,0x1153,0x1153,0x1153
120      .word 0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x02E0,0x3170,0x0545,0x2F13
121      .word 0x080B,0x2BFC,0x0B5C,0x28B4,0x0B5C,0x28B5,0x080B,0x2BFC,0x0545
122      .word 0x2F13,0x02E0,0x317A
123
124      .global tablaMS3
125 tablaMS3 .word 0x02E0,0x3170,0x0545,0x2F13,0x080B,0x2BFC,0x0B5C,0x28B4,0x0B5C
126      .word 0x28B5,0x080B,0x2BFC,0x0545,0x2F13,0x02E0,0x3170,0x1153,0x1153
127      .word 0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x02E0,0x3170,0x0545
128      .word 0x2F13,0x080B,0x2BFC,0x0B5C,0x28BE,0x0B5C,0x28B4,0x080B,0x2BFC
129      .word 0x0545,0x2F13,0x02E0,0x3170,0x1153,0x1153,0x1153,0x1153,0x1153
130      .word 0x1153,0x1153,0x1153
131
132
133 ;=====Valores Modulación MSPWM. Activación patillas=====
134      .global tablaMSP1
135 tablaMSP1 .word 0x1110,0x1010,0x1011,0x1110,0x1010,0x1011,0x1111,0x1111,0x1111
136      .word 0x1111,0x1111,0x1111,0x1110,0x1010,0x1011,0x1110,0x1010,0x1011
137      ;semiperiodo
138      .word 0x0001,0x0101,0x0100,0x0001,0x0101,0x0100,0x0000,0x0000,0x0000
139      .word 0x0000,0x0000,0x0000,0x0001,0x0101,0x0100,0x0001,0x0101,0x0100
140      ;fin
141
142      .global tablaMSP2
143 tablaMSP2 .word 0x0000,0x0000,0x0000,0x0000,0x0000,0x0000,0x0001,0x0101,0x0100
144      .word 0x0001,0x0101,0x0100,0x0100,0x0000,0x0001,0x0100,0x0000,0x0001
145      .word 0x0101,0x0101,0x0101,0x0101,0x0101,0x0101,0x0100,0x0000,0x0001
146      .word 0x0100,0x0000,0x0001,0x0001,0x0101,0x0100,0x0001,0x0101,0x0100
147
148      .global tablaMSP3
149 tablaMSP3 .word 0x0100,0x0000,0x0001,0x0100,0x0000,0x0001,0x0001,0x0101,0x0100
150      .word 0x0001,0x0101,0x0100,0x0000,0x0000,0x0000,0x0000,0x0000,0x0000
151      .word 0x0001,0x0101,0x0100,0x0001,0x0101,0x0100,0x0100,0x0000,0x0001
152      .word 0x0100,0x0000,0x0001,0x0101,0x0101,0x0101,0x0101,0x0101,0x0101
153
154
155 ;-----
156
157 _main
158
159 RESET      mov.w #__STACK_END,SP                ; Inicializar puntero
                                                    ; de pila
160 StopWDT    mov.w #WDTPW|WDTHOLD,&WDTCTL        ; Parar WDT
161
162 ;=====
163
164      mov.w #FRCTLPW+NWAITS_1,&FRCTL0          ; Configura FRAM
165      bis.w #SCG0,SR                            ; Deshabilitar FLL
166      bis.w #SELREF__REFOCLK,&CSCTL3          ; Establecer REFO
                                                    ; como FLL
167      mov.w #DCOFTRIMEN_1+DCOFTRIM0,&CSCTL1    ; DCOFTRIM=3
168      mov.w &CERO,&CSCTL0                    ; Limpiar DCO,
                                                    ; registros MOD
169      bic.w #DCORSEL_7,&CSCTL1                ; Limpiar DCO
                                                    ; frecuencia
170      mov.w #DCOFTRIM1+DCORSEL_5,&CSCTL1
171                                                    ; DCO Range = 16MHz
172      mov.w #FLLD_0+487,&CSCTL2              ; DCODIV = 16MHz
173      nop
174      nop
175      nop
176      bic.w #SCG0,SR                            ; Habilitar FLL
177 Unlock     mov.w &CSCTL7,R3
178      and.w #FLLUNLOCK0|FLLUNLOCK1,R3
179      jnz      Unlock                          ; FLL bloqueado?
180      mov.w #SELMS__DCOCLKDIV,&CSCTL4

```



```

181 ;-----
182
183     mov.B  &LLENO,&P1DIR                ; P1=salida
184     mov.B  &LLENO,&P2DIR                ; P2=salida
185     mov.B  &LLENO,&P3DIR                ; P3=salida
186     mov.B  &LLENO,&P4DIR                ; P4=salida
187     mov.B  &MH,&P5DIR                   ; P5(.0-.3)=entrada
188     mov.B  &ML,&P5OUT                   ; R.polariz.H
                                           ; P5(0.0-0.3)

189     mov.B  &ML,&P5REN
190
191     bic.B  &CERO,&P1OUT                 ; P1=L
192     bic.B  &CERO,&P2OUT                 ; P2=L
193     bic.B  &CERO,&P3OUT                 ; P3=L
194     bic.B  &CERO,&P4OUT                 ; P4=L
195
196
197
198
199     bic.w  #LOCKLPM5,&PM5CTL0           ; Desbloquear I/O
200
201     bis.w  #CM_1|CCIS_1|CCIE|SCS,&TB3CCTL0 ; Capt flanco subida
202     bis.w  #CM_1|CCIS_1|CCIE|SCS,&TB3CCTL1 ; CCI0B=SMCLK,
203     bis.w  #CM_1|CCIS_1|CCIE|SCS,&TB3CCTL2 ; Síncrono
204     bis.w  #CM_1|CCIS_1|CCIE|SCS,&TB3CCTL3 ; Habilitar comparar
205     bis.w  #CM_1|CCIS_1|CCIE|SCS,&TB3CCTL4 ; Habilitar Int.
206     bis.w  #CM_1|CCIS_1|CCIE|SCS,&TB3CCTL5
207     bis.w  #CM_1|CCIS_1|CCIE|SCS,&TB3CCTL6
208
209     mov.w  #TBSEL_2|MC_1|TBCLR|TBIE,&TB3CTL ; SMCLK, modo UP
210                                           ; TBR=0, habilitar
                                           ; int.
                                           ; R4=0

211     clr   R4
212
213     nop
214 Mainloop bis.w  #GIE,SR                 ; Habilitar int.
215     nop                                   ; Para el depurador
216     bit.b #BIT0|BIT1|BIT2|BIT3,&P5IN    ; P5(.0-.3)==L?
217     jnz   OC                             ; Z=0, salta si !=
218     mov.B &CERO,&P1OUT                   ; Inicializa P1
219     mov.B &CERO,&P2OUT                   ; Inicializa P2
220     mov.B &CERO,&P3OUT                   ; Inicializa P3
221     mov.B &CERO,&P4OUT                   ; Inicializa P4
222     clr   R4                             ; R4=0
223     clr   R5                             ; R5=0
224     clr   R6                             ; R6=0
225     clr   R7                             ; R7=0
226     clr   R8                             ; R8=0
227     clr   R9                             ; R9=0
228     clr   R10                            ; R10=0
229     clr   TB3R                            ; TB3R=0
230     jmp   Mainloop
231 ;-----
232
233 OC   bit.b #BIT0,&P5IN                   ; P5.1==H ?
234     jz    SPWM                            ; Z=0, salta si es df
235     bit.b #BIT1,&P5IN                   ; P5.1==H ?
236     jnz   SPWM                            ; Z=1, salta si !=
237     bit.b #BIT2,&P5IN                   ; P5.1==L ?
238     jnz   SPWM                            ; Z=1, salta si !=
239     cmp.w &UNO, R4                       ; R4=0x01 ?
240     jz    SPWM                            ; Z=1, salta si ==
241     mov.w &UNO,R4                         ; R4=0x01
242     mov.w #__STACK_END,SP                 ; Inicializar puntero
243     mov.w &BASE1_T,&TB3CCR0             ; T=intervalo(3,33ms)
244 ;-----Fase1-----
245     mov.w #tablaOC1,R5                   ; R5=tablaOC1

```

TÉCNICAS DE MODULACIÓN PARA INVERSOR DE POTENCIA

```

246      push   #tablaOC1                ; SP=tablaOC1
247      mov.w  @R5+,&TB3CCR1            ; TB3CCR1=(R5)
248      mov.w  @R5+,&TB3CCR2            ; TB3CCR2=(R5)
249 ;-----Fase2-----
250      mov.w  #tablaOC2,R6            ; R6=tablaOC2
251      push   #tablaOC2                ; SP=tablaOC2
252      mov.w  @R6+,&TB3CCR3            ; TB3CCR3=(R6)
253      mov.w  @R6+,&TB3CCR4            ; TB3CCR4=(R6)
254 ;-----Fase3-----
255      mov.w  #tablaOC3,R7            ; R7=tablaOC3
256      push   #tablaOC3                ; SP=tablaOC3
257      mov.w  @R7+,&TB3CCR5            ; TB3CCR5=(R7)
258      mov.w  @R7+,&TB3CCR6            ; TB3CCR6=(R7)
259 ;-----Salida Fase1-----
260      mov.w  #tablaOCP1,R8           ; R8=tablaOCP1
261      push   #tablaOCP1                ; SP=tablaOCP1
262      mov.B  @R8+,&P1OUT              ; P1OUT=(R8)
263 ;-----Salida Fase2-----
264      mov.w  #tablaOCP2,R9           ; R9=tablaOCP2
265      push   #tablaOCP2                ; SP=tablaOCP2
266      mov.B  @R9+,&P2OUT              ; P2OUT=(R9)
267 ;-----Salida Fase3-----
268      mov.w  #tablaOCP3,R10          ; R10=tablaOCP3
269      push   #tablaOCP3                ; SP=tablaOCP4
270      mov.B  @R10+,&P3OUT             ; P3OUT=(R10)
271      jmp    Mainloop                 ; Salta Mainloop
272 ;-----
273
274 SPWM   bit.b  #BIT0,&P5IN            ; P5.1==L ?
275        jnz   MSPWM                  ; Z=1, salta si !=
276        bit.b #BIT1,&P5IN            ; P5.1==H ?
277        jz    MSPWM                  ; Z=0, salta si !=
278        bit.b #BIT2,&P5IN            ; P5.1==L ?
279        jnz   MSPWM                  ; Z=1, salta si !=
280        cmp.w &DOS,R4                ; R4=0x02 ?
281        jz    MSPWM                  ; Z=1, salta si ==
282        mov.w &DOS,R4                ; R4=0x02
283        mov.w #__STACK_END,SP        ; Inicializar puntero
284        mov.w &BASE2_T,&TB3CCR0      ; T=intervalo(833us)
285 ;-----Fase1-----
286      mov.w  #tablaS1,R5              ; R5=tablaS1
287      push   #tablaS1                ; SP=tablaS1
288      mov.w  @R5+,&TB3CCR1            ; TB3CCR1=(R5)
289      mov.w  @R5+,&TB3CCR2            ; TB3CCR2=(R5)
290 ;-----Fase2-----
291      mov.w  #tablaS2,R6              ; R6=tablaS2
292      push   #tablaS2                ; SP=tablaS2
293      mov.w  @R6+,&TB3CCR3            ; TB3CCR3=(R6)
294      mov.w  @R6+,&TB3CCR4            ; TB3CCR4=(R6)
295 ;-----Fase3-----
296      mov.w  #tablaS3,R7              ; R7=tablaS3
297      push   #tablaS3                ; SP=tablaS3
298      mov.w  @R7+,&TB3CCR5            ; TB3CCR5=(R7)
299      mov.w  @R7+,&TB3CCR6            ; TB3CCR6=(R7)
300 ;-----Salida Fase1-----
301      mov.w  #tablaSP1,R8            ; R8=tablaSP1
302      push   #tablaSP1                ; SP=tablaSP1
303      mov.B  @R8+,&P1OUT              ; P1OUT=(R8)
304 ;-----Salida Fase2-----
305      mov.w  #tablaSP2,R9            ; R9=tablaSP2
306      push   #tablaSP2                ; SP=tablaSP2
307      mov.B  @R9+,&P2OUT              ; P2OUT=(R9)
308 ;-----Salida Fase3-----
309      mov.w  #tablaSP3,R10           ; R10=tablaSP3
310      push   #tablaSP3                ; SP=tablaSP4
311      mov.B  @R10+,&P3OUT             ; P3OUT=(R10)
312      jmp    Mainloop                 ; Salta Mainloop

```

```

313 ;-----
314
315 MSPWM      bit.b #BIT0,&P5IN                ; P5.1==H ?
316           jz      Mainloop                  ; Z=0, salta si !=
317           bit.b #BIT1,&P5IN                ; P5.2==H ?
318           jz      Mainloop                  ; Z=0, salta si !=
319           bit.b #BIT2,&P5IN                ; P5.1==L ?
320           jnz     Mainloop                  ; Z=1, salta si !=
321           cmp.w  &TRES,R4                  ; R4=0x03 ?
322           jz      Mainloop                  ; Z=1, salta si es ==
323           mov.w  &TRES,R4                  ; R4=0x03
324           mov.w  #__STACK_END,SP          ; Inicializar puntero
325           mov.w  &BASE2_T,&TB3CCR0        ; T=intervalo(833us)
326 ;-----Fase1-----
327           mov.w  #tablaMS1,R5              ; R5=tablaMS1
328           push   #tablaMS1                ; SP=tablaMS1
329           mov.w  @R5+,&TB3CCR1            ; TB3CCR1=(R5)
330           mov.w  @R5+,&TB3CCR2            ; TB3CCR2=(R5)
331 ;-----Fase2-----
332           mov.w  #tablaMS2,R6              ; R6=tablaMS2
333           push   #tablaMS2                ; SP=tablaMS2
334           mov.w  @R6+,&TB3CCR3            ; TB3CCR3=(R6)
335           mov.w  @R6+,&TB3CCR4            ; TB3CCR4=(R6)
336 ;-----Fase3-----
337           mov.w  #tablaMS3,R7              ; R7=tablaMS3
338           push   #tablaMS3                ; SP=tablaMS3
339           mov.w  @R7+,&TB3CCR5            ; TB3CCR5=(R7)
340           mov.w  @R7+,&TB3CCR6            ; TB3CCR6=(R7)
341 ;-----Salida Fase1-----
342           mov.w  #tablaMSP1,R8            ; R8=tablaMSP1
343           push   #tablaMSP1                ; SP=tablaMSP1
344           mov.B  @R8+,&P1OUT              ; P1OUT=(R8)
345 ;-----Salida Fase2-----
346           mov.w  #tablaMSP2,R9            ; R9=tablaMSP2
347           push   #tablaMSP2                ; SP=tablaMSP2
348           mov.B  @R9+,&P2OUT              ; P2OUT=(R9)
349 ;-----Salida Fase3-----
350           mov.w  #tablaMSP3,R10           ; R10=tablaMSP3
351           push   #tablaMSP3                ; SP=tablaMSP3
352           mov.B  @R10+,&P3OUT             ; P3OUT=(R10)
353           jmp    Mainloop                  ; Salta Mainloop
354 ;-----
355
356
357 ;-----ISR for TB0CCR0-----
358 TIMER3_B0  cmp.w  #0,0(R5)                ; ¿Es final de tabla?
359           jne     T1                        ; NO-> salta a T1
360           mov.w  4(SP),R10                 ; R10=SP(tablaP3)
361           mov.w  6(SP),R9                  ; R9=SP(tablaP2)
362           mov.w  8(SP),R8                  ; R8=SP(tablaP1)
363           mov.w  10(SP),R7                ; R7=SP(tablaF3)
364           mov.w  12(SP),R6                ; R6=SP(tablaF2)
365           mov.w  14(SP),R5                ; R5=SP(tablaF1)
366
367 T1         mov.w  @R5+,&TB3CCR1            ; TB3CCR1=(R5)
368           mov.w  @R5+,&TB3CCR2            ; TB3CCR2=(R5)
369           mov.w  @R6+,&TB3CCR3            ; TB3CCR3=(R6)
370           mov.w  @R6+,&TB3CCR4            ; TB3CCR4=(R6)
371           mov.w  @R7+,&TB3CCR5            ; TB3CCR5=(R7)
372           mov.w  @R7+,&TB3CCR6            ; TB3CCR6=(R7)
373           mov.B  @R8+,&P1OUT              ; P1OUT=(R8)
374           mov.B  @R9+,&P2OUT              ; P2OUT=(R9)
375           mov.B  @R10+,&P3OUT             ; P3OUT=(R10)
376           xor.b  #BIT0,&P4OUT             ; T intervalo
377           reti                               ; Salir de Int.
378 ;-----
379 ;-----ISR por desbordamiento-----

```

```

380 TIMER3_B1 add &TB3IV,PC ; Agregar a PC
381          reti           ; No int.
382          jmp CCR1       ; TB3IV_TB3CCR1
383          jmp CCR2       ; TB3IV_TB3CCR2
384          jmp CCR3       ; TB3IV_TB3CCR3
385          jmp CCR4       ; TB3IV_TB3CCR4
386          jmp CCR5       ; TB3IV_TB3CCR5
387          jmp CCR6       ; TB3IV_TB3CCR6
388 TB3IFG   reti         ; Salir de Int.
389 ;-----
390 CCR6     mov.B @R10+,&P3OUT ; P3OUT=(R10)
391          reti           ; Salir de Int.
392
393 CCR5     mov.B @R10+,&P3OUT ; P3OUT=(R10)
394          reti           ; Salir de Int.
395
396 CCR4     mov.B @R9+,&P2OUT  ; P2OUT=(R9)
397          reti           ; Salir de Int.
398
399 CCR3     mov.B @R9+,&P2OUT  ; P2OUT=(R9)
400          reti           ; Salir de Int.
401
402 CCR2     mov.B @R8+,&P1OUT  ; P1OUT=(R8)
403          reti           ; Salir de Int.
404
405 CCR1     mov.B @R8+,&P1OUT  ; P1OUT=(R8)
406          reti           ; Salir de Int.
407 ;-----
408 ;-----Vectores de Interrupción-----
409          .sect RESET_VECTOR ; MSP430 RESET Vector
410          .short RESET
411          .sect TIMER3_B1_VECTOR ; Timer_B1 Vector
412          .short TIMER3_B1
413          .sect TIMER3_B0_VECTOR ; Timer_B1 Vector
414          .short TIMER3_B0
415          .end
416

```