

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL



Tesis Doctoral

MODULACIÓN TPWM-DM PARA INVERSORES DE POTENCIA

Autor: Pedro Juan Sotorrío Ruiz

Directores: Dr. Francisco M. Pérez Hidalgo
Dr. Juan Ramón Heredia Larrubia

Programa de doctorado: Ingeniería y gestión de proyectos

Málaga, 2015



Publicaciones y
Divulgación Científica

AUTOR: Pedro Juan Sotorrío Ruiz

 <http://orcid.org/0000-0002-2850-2817>

EDITA: Publicaciones y Divulgación Científica. Universidad de Málaga



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode>

Cualquier parte de esta obra se puede reproducir sin autorización pero con el reconocimiento y atribución de los autores.

No se puede hacer uso comercial de la obra y no se puede alterar, transformar o hacer obras derivadas.

Esta Tesis Doctoral está depositada en el Repositorio Institucional de la Universidad de Málaga (RIUMA): riuma.uma.es

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍA INDUSTRIAL

Departamento de Ingeniería Eléctrica
Área de conocimiento de Ingeniería Eléctrica

TESIS DOCTORAL

Modulación TPWM-DM para
inversores de potencia

Autor: Pedro Juan Sotorrío Ruiz
Ingeniero en Electrónica

Directores:

Dr. Francisco M. Pérez Hidalgo
Dr. Juan Ramón Heredia Larrubia

Málaga, Julio de 2015

Dr. Francisco M. Pérez Hidalgo, Profesor Titular del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Málaga

CERTIFICO:

Que **D. Pedro Juan Sotorrío Ruiz**, ha realizado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Málaga, bajo mi dirección, el trabajo de investigación correspondiente a la Tesis Doctoral titulada: “**Modulación TPWM-DM para inversores de potencia**”.

Revisado el presente trabajo, estimo que puede ser presentado al Tribunal que ha de juzgarlo.

Y para que así conste a los efectos oportunos, **AUTORIZO** la presentación de la Tesis en la Universidad de Málaga.

Málaga, a 20 de Julio de 2015.



Fdo. Francisco M. Pérez Hidalgo.

Dr. Juan Ramón Heredia Larrubia, Profesor Titular del Departamento de Tecnología Electrónica de la Universidad de Málaga

CERTIFICO:

Que **D. Pedro Juan Sotorrío Ruiz**, ha realizado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Málaga, bajo mi dirección, el trabajo de investigación correspondiente a la Tesis Doctoral titulada: **“Modulación TPWM-DM para inversores de potencia”**.

Revisado el presente trabajo, estimo que puede ser presentado al Tribunal que ha de juzgarlo.

Y para que así conste a los efectos oportunos, **AUTORIZO** la presentación de la Tesis en la Universidad de Málaga.

Málaga, a *20 de Julio* de 2015.



Fdo. Juan Ramón Heredia Larrubia.

Agradecimientos

Agradecimientos

A mis directores de tesis, por los consejos y las ayudas que me han ofrecido a lo largo del desarrollo de la misma.

A las personas que componen el Departamento de Ingeniería Eléctrica y a las del Departamento de Tecnología Electrónica por su apoyo y ayuda durante la elaboración de esta tesis. En particular a los Doctores D. Francisco David Trujillo Aguilera y D. Francisco José Sánchez Pacheco, por su apoyo incondicional y empuje, mucho más allá de la tesis en sí misma.

A mi familia, que ha soportado un largo periodo de ausencias para la preparación y redacción de esta tesis, en la confianza de que sea recuperable. Y, especialmente, a mi hija Gloria que ha leído y releído este documento en busca de todo tipo de defectos, y ha aportado importantes sugerencias gracias a las cuales ha sido posible su depuración.

Resumen (Abstract)

Resumen

Las características de una forma de onda modulada PWM, como la amplitud de la frecuencia fundamental o su perfil de armónicos, dependen de la técnica utilizada para su obtención. Cada técnica persigue y alcanza determinados objetivos.

En general, los objetivos de un sistema inversor son que la señal de salida del inversor tenga una calidad del 100 %, es decir que sea una señal sinusoidal perfecta, que la amplitud de la señal sea máxima y que no haya pérdidas en el proceso de conversión. A esto hay que añadir que el sistema ha de ser simple, en cuanto a los circuitos y su programación, y con el coste mínimo. Hasta hoy, estos objetivos no han sido alcanzados totalmente. Sin embargo, a lo largo del tiempo se han desarrollado diferentes técnicas que han ido mejorando la calidad de la señal de salida. Para ello se ha propuesto que a la salida haya distintas formas de onda tales como sinusoidal, sinusoidal con armónicos adicionales, trapezoidal o cuadrada, entre otras. Por su parte, las distintas formas de obtener estas señales tienen una gran influencia en la calidad de la señal obtenida. Teniendo en cuenta que el objetivo es disponer de una señal sinusoidal sobre la que se pueda controlar sus parámetros de amplitud, frecuencia y contenido de armónicos, ninguna de las técnicas de modulación actuales logra una señal con la calidad ideal.

En esta tesis se desarrolla un método de modulación denominada TPWM-DM (Trapezoidal PWM with Direct Modulation), que utiliza la técnica de modulación directa y una forma de onda específica como objetivo a la salida del inversor, una señal trapezoidal, mejora de forma notable los resultados de muchas otras técnicas, obteniendo una gran amplitud de la frecuencia fundamental, pocas componentes armónicas, control de la amplitud y de la frecuencia de la señal obtenida. Además, es una técnica que sintetiza la forma de onda en el propio modulador (técnica de señal generada), lo cual hace que el sistema inversor pueda responder en directo a los requerimientos de la carga.

La técnica de modulación directa se diferencia de las técnicas clásicas de modulación PWM en que no necesita de señales portadora y moduladora, lo cual simplifica el procedimiento de obtención de la señal modulada.

La utilización de una señal trapezoidal, como objetivo a la salida del inversor, se debe a tres características importantes de esta señal: la frecuencia fundamental tiene una gran amplitud, las componentes armónicas que la forman no tienen gran amplitud y las ecuaciones que la definen son lineales. Las dos primeras aportan una mejora notable en cuanto a la calidad de la señal de salida del inversor, mientras que la tercera hace que el proceso de modulación se rija por ecuaciones lineales fácilmente implementable con medios digitales de bajo costo. Esta linealidad en el proceso de modulación hace que no sea necesario utilizar las ecuaciones propiamente ya que los distintos patrones de conmutación de la modulación se obtienen a partir de un único **vector-semilla** por medio de una simple multiplicación. Esto minimiza los requerimientos computacionales del modulador, permitiendo que se pueda utilizar un microcontrolador comercial de bajo costo. Esta solución no ha sido encontrada en la documentación técnica sobre el tema.

El resultado de este desarrollo es que, aparte de las mejoras ya citadas respecto a otros métodos de modulación, estableciendo determinados valores paramétricos en la modulación se logra que la señal de salida tenga calidad más que suficiente como para poder eliminar los filtros de salida del inversor para aplicaciones que tengan que estar de acuerdo con la norma UNE-EN 50160, “Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución”, sobre la calidad de la señal en la red de suministro eléctrico. Este es un ahorro económico adicional importante en cuanto a los costes directos del sistema, el mantenimiento del mismo y también en el ahorro energético, ya que se reducen las pérdidas en el conjunto.

Las características finales de la señal que se consigue con esta técnica de modulación se han obtenido inicialmente por medio de simulación (Capítulo 4), para luego realizar la implementación de la misma utilizando diferentes dispositivos microcontroladores (Capítulo 5), corroborando que los resultados obtenidos de la simulación se corresponden con los medidos en el banco de pruebas (Capítulo 6). En este mismo capítulo se comparan los resultados con los equivalentes obtenidos con otras técnicas de modulación, de donde se deducen las mejoras que aporta.

En el Capítulo 7 se hace un resumen de las conclusiones obtenidas de las experiencias realizadas, tanto en simulación como en experimentación.

Vistos los resultados anteriores, se proponen diferentes líneas futuras de investigación (Capítulo 8).

Abstract

Characteristics of a PWM modulated waveform such as the amplitude of the fundamental frequency or harmonic components profile, depend on the technique used to obtain the waveform. Each technique aims and reaches certain goals.

Generally speaking, the main objective of an inverter system is to obtain a perfect sinusoidal signal with the highest possible amplitude, without harmonics components and minimum losses in the generation process. Furthermore, the system must be simple, in terms of hardware and software, and with the minimum cost. Until now, these objectives have not been achieved all together. However, over time have been developed various techniques which have improved the quality of the output signal. To achieve this, various waveforms for the output signal have been proposed, such as pure sinusoidal, sinusoidal with additional harmonics, trapezoidal or square waveform, among others. The modulation technique used to obtain the output signal have a close influence on the quality of the waveform finally obtained. Taking into account that the objective is to have a sinusoidal signal whose amplitude, frequency and harmonics profile can be controlled, none of the current modulation techniques achieves the signal with an ideal quality.

In this thesis, a PWM modulation technique (direct modulation) is developed which, together with a specific waveform as objective at the inverter output (a trapezoidal signal), significantly improves the results of many other modulation techniques, obtaining a large amplitude for the fundamental frequency, a very good harmonics profile, and allowing control over amplitude and frequency of the obtained signal (fundamental frequency).

Moreover, it is a technique that allows synthesize the waveform inside the modulator (signal generated technique), which makes the inverter system can respond on line to the requirements of the load.

The direct modulation technique does not need a carrier signal and a modulator signal, as in conventional PWM techniques. This is an important difference because it simplifies the PWM modulation process.

Using a trapezoidal waveform as objective at the inverter output is due to three important characteristics of this signal: the fundamental frequency has a large amplitude, the harmonic components are not of great amplitude and the equations which define the waveform are linear. The first two characteristics make a significant improvement in the quality of the inverter output signal, while the third one makes the modulation process is easily implemented with low-cost digital devices.

The result of this development is that, apart from the already mentioned improvements over other modulation techniques, setting specific modulation parameter, the output signal has more than enough quality to eliminate the inverter output filters, for applications that must fulfil the EN 50160 standard, “Voltage Characteristics in Public Distribution Systems”. This means an additional significant cost savings in terms of direct costs of the system, maintenance, and energy savings, as the system losses are reduced.

The final characteristics of the obtained signal by using this modulation technique were initially obtained by simulation (Chapter 4), and then it was implemented by using different microcontroller devices (Chapter 5), corroborating that the obtained results by simulation correspond to those measured in the experimental test benches (Chapter 6). After obtaining the actual results, these have been contrasted with their counterparts obtained with other modulation techniques (Chapter 6).

Chapter 7 summarizes the conclusions drawn from the experiences in both simulation and experimentation.

Having regard to the above results, various future research are proposed in Chapter 8.

Índice general

Índice de contenido

Capítulo 1. Introducción	1-1
1.1 Objetivos	1-1
1.2 Bases	1-4
1.3 Metodología	1-5
1.4 Contenido	1-6
Referencias	1-7
Capítulo 2. Inversores de potencia	2-1
2.1 Topologías	2-1
2.1.1 Clasificación	2-1
2.1.2 Inversor monofásico de medio puente	2-2
2.1.3 Inversor monofásico de puente completo	2-3
2.1.4 Inversor trifásico	2-7
2.2 Tiempos muertos	2-10
2.3 Aplicaciones de los inversores	2-10
2.4 Técnicas de modulación PWM	2-11
2.4.1 Modulación PWM	2-12
2.4.2 PWM por modulación directa	2-18
2.4.3 Otras formas de modulación PWM	2-19
2.4.4 Clasificación de las técnicas PWM	2-20
Referencias	2-23
Capítulo 3. La técnica TPWM-DM	3-1
3.1 Introducción	3-1
3.2 Modulación directa	3-1
3.3 La señal trapezoidal	3-2

3.3.1 Límites de la forma de onda	3-3
3.3.2 Espectro de frecuencias de la señal trapezoidal	3-4
3.3.3 Amplitud de la frecuencia fundamental	3-6
3.3.4 Simetrías en la señal trapezoidal	3-8
3.3.4.1 Efectos de la falta de simetría	3-9
3.3.5 Simetría en la señal modulada	3-13
3.4 Modulación de la señal trapezoidal	3-14
3.4.1 Metodología	3-14
3.4.2 Sobre los pulsos	3-16
3.4.3 Modulación de la señal en el caso de alimentación simple	3-17
3.4.3.1 Modulación de la señal durante el tiempo de subida	3-19
3.4.3.2 Modulación de la señal durante el tiempo de bajada	3-25
3.4.4 Modulación de la señal en el caso de alimentación doble	3-35
3.5 Construcción de la señal modulada	3-39
3.5.1 El vector-semilla	3-46
3.6 Control de la frecuencia	3-47
3.7 Control de la amplitud	3-50
3.7.1 Control de la amplitud por cambio del tiempo de subida	3-50
3.7.2 Control de la amplitud por modulación de t_H y t_L	3-50
Referencias	3-51
 Capítulo 4. Simulación	 4-1
4.1 Objetivos	4-1
4.2 Generador de un periodo de señal	4-2
4.2.1 Modulación de t_r y t_f	4-4
4.2.1.1 Cálculo de los vectores “Vr” y “Vf”	4-5

4.2.1.2	La señal durante t_r y t_f	4-6
4.2.1.3	La señal durante t_H y t_L	4-7
4.2.2	Generador de la señal modulada	4-9
4.3	Medidor de características	4-10
4.3.1	Preparación de la señal	4-10
4.4.1	Medida de los indicadores THD , $WTHD$, DF , V_1 pu y f_1 . . .	4-14
4.4.2	Medida del indicador LOH	4-15
4.4.3	Medida del indicador $PF50160$	4-16
4.5	Automatización de las medidas	4-18
	Referencias	4-22
Capítulo 5.	Implementación	5-1
5.1	Implementación 1. Por tablas	5-1
5.1.1	Requerimientos del sistema	5-2
5.1.2	Esquema del sistema	5-11
5.1.3	Programación	5-13
5.1.3.1	Funcionamiento de la rutina de interrupción de la modulación	5-13
5.2	Implementación 2. Bajo control de un ordenador personal	5-17
5.3	Implementación 3. Autónoma	5-26
5.4	Implementación 4. Trifásica completa	5-27
	Referencias	5-30
Capítulo 6.	Resultados	6-1
6.1	Resultados de la simulación	6-1
6.2	Resultados de la implementación	6-19
6.2.1	Formas de onda obtenidas	6-19
6.2.2	Medidas de tiempos	6-24
6.2.3	Medidas de frecuencia y armónicos	6-25
6.3	Comparativas de calidad de la señal	6-30

6.3.1 Caso de estudio 1: Análisis para $M = 7$	6-33
6.3.2 Caso de estudio 2: Análisis para $M = 11$	6-34
6.3.3 Caso de estudio 3: Análisis para $M = 15$	6-35
6.3.4 Caso de estudio 4: Análisis para $M = 21$	6-36
6.3.5 Caso de estudio 5: Análisis para $M = 27$	6-37
Referencias	6-38
Capítulo 7. Conclusiones	7-1
7.1 La modulación TPWM-DM	7-1
7.2 Simulación	7-1
7.3 Implementaciones	7-1
7.4 Las señales trapezoidales	7-2
7.5 El vector-semilla	7-2
7.6 Frecuencia de la señal	7-3
7.7 Calidad de la señal	7-3
7.8 Resumen de conclusiones	7-3
Capítulo 8. Futuras líneas de investigación	8-1
Anexo A1. Indicadores de calidad	A1-1
A1.1 Distorsión armónica total	A1-1
A1.2 Distorsión armónica total ponderada	A1-2
A1.3 Factor de distorsión	A1-3
A1.4 Amplitud fundamental pu	A1-4
A1.5 Indicador LOH	A1-5
A1.6 Indicador $PF50160$	A1-5
A1.7 Frecuencia fundamental	A1-6
Referencias	A1-7

Anexo A2. Resultados de la simulación	A2-1
Anexo A3. Programación del μC	A3-1
A3.1 Definiciones	A3-1
A3.2 Rutina de interrupción del temporizador 1	A3-3
A3.3 Programa de inicio de funcionamiento	A3-4
A3.4 Programa principal	A3-7
A3.5 Rutina de arranque suave	A3-9
A3.6 Rutina de tratamiento del ADC	A3-11
A3.7 Tablas de modulación	A3-13
A3.8 Tamaño del programa	A3-15
Anexo A4. Medidas de armónicos en la señal modulada	A4-1

Índice de figuras

Figura 1.1. Esquema de bloques de un inversor.	1-2
Figura 2.1. Inversor en medio puente.	2-2
Figura 2.2. Inversor monofásico en puente completo. Esquema básico con interruptores.	2-3
Figura 2.3. Funcionamiento del inversor monofásico en puente completo.	2-4
Figura 2.4. Forma de onda de la señal de salida del inversor de puente completo.	2-4
Figura 2.5. Esquema básico de un inversor monofásico en puente completo realizado con transistores IGBT.	2-5
Figura 2.6. Esquema básico de inversor trifásico.	2-7
Figura 2.7. Formas de onda a la salida de un inversor trifásico,	2-8
Figura 2.8. Espectros de frecuencias de las señales de salida.	2-9
Figura 2.9. Definiciones de tiempos en una señal no alterna.	2-12
Figura 2.10. Definiciones de tiempos en una señal alterna.	2-14
Figura 2.11. Formas de onda conmutadas no alternas.	2-16
Figura 2.12. Formas de onda conmutadas alternas.	2-17
Figura 2.13. Modulación PWM directa de una señal sinusoidal.	2-18
Figura 2.14. Modulación PWM por comparación.	2-20
Figura 3.1. Forma de onda de una señal trapezoidal	3-2
Figura 3.2. Forma de onda de una señal trapezoidal cuando $t_r = t_f = 0$	3-4
Figura 3.3. Forma de onda de una señal trapezoidal cuando $t_r = t_f = T/2$	3-4
Figura 3.4. Espectros de frecuencias de tres formas de onda monofásicas.	3-5
Figura 3.5. Espectros de frecuencias de tres formas de onda trifásicas (línea - línea).	3-6
Figura 3.6. Amplitud de la frecuencia fundamental de la señal trapezoidal en función de t_r y t_f	3-7

Figura 3.7. Simetría impar de una señal trapezoidal. 3-9

Figura 3.8. Simetría par de la señal a modular. 3-9

Figura 3.9. Señal trapezoidal simétrica y su espectro de frecuencias. 3-9

Figura 3.10. Señal trapezoidal asimétrica en t_r y t_f y su espectro de frecuencias.
 3-10

Figura 3.11. Señal trapezoidal asimétrica en t_H y t_L y su espectro de frecuencias.
 3-13

Figura 3.12. Esquema de inversor trifásico con alimentación simple. 3-18

Figura 3.13. Formas de onda en un inversor con alimentación simple. 3-18

Figura 3.14. División de la señal trapezoidal durante el tiempo de subida en N
 intervalos iguales. 3-19

Figura 3.15. Detalle de la señal trapezoidal, a), y la señal modulada, b), durante un
 intervalo del tiempo de subida. 3-21

Figura 3.16. Forma de onda de la señal modulada durante el tiempo de subida para
 $t_r = 4.000 \mu\text{s}$, $N = 5$ y $V_o/V_i = 1$ 3-23

Figura 3.17. División de la señal trapezoidal durante el tiempo de bajada en N
 intervalos iguales. 3-26

Figura 3.18. Detalle de la señal trapezoidal, a), y la señal modulada, b), durante un
 intervalo del tiempo de bajada. 3-27

Figura 3.19. Forma de onda durante el tiempo de bajada para $t_f = 4.000 \mu\text{s}$,
 $N = 5$ y $V_o/V_i = 1$ 3-31

Figura 3.20. Formas de onda de la señal modulada TPWM-DM con alimentación
 simple para $N = 5$, $t_r = 2.000 \mu\text{s}$ y $V_o/V_i = 1$ 3-33

Figura 3.21. Formas de onda de la señal modulada TPWM-DM con alimentación
 simple para $N = 5$, $t_r = 6.000 \mu\text{s}$ y $V_o/V_i = 1$ 3-34

Figura 3.22. Esquema de inversor trifásico con alimentación doble. 3-35

Figura 3.23. Generación de TPWM-DM. a) Alimentación en continua del
 inversor. b) Señal objetivo. c) Señal modulada. 3-35

Figura 3.24. Formas de onda de la señal modulada TPWM-DM con alimentación
 doble para $N = 5$, $t_r = 2.000 \mu\text{s}$ y $V_o/V_i = 1$ 3-36

Figura 3.25. Formas de onda de la señal modulada TPWM-DM con alimentación
 doble para $N = 5$, $t_r = 6.000 \mu\text{s}$ y $V_o/V_i = 1$ 3-38

Figura 4.1. Pantalla de usuario del generador de un periodo TPWM-DM para el caso de un inversor con alimentación doble.	4-3
Figura 4.2. Módulo de cálculo del tamaño y posición de los pulsos.	4-4
Figura 4.3. Valores de tiempos (μs) obtenidos del simulador.	4-4
Figura 4.4. Cálculo de los vectores V_r y V_f	4-5
Figura 4.5. Salida del bloque generador de los vectores V_r y V_f	4-6
Figura 4.6. Generador de la señal durante t_r y t_f	4-7
Figura 4.7. Generador de la señal durante t_H y t_L	4-8
Figura 4.8. Generador de un periodo de señal modulada.	4-9
Figura 4.9. Formas de onda TPWM-DM obtenidas a la salida “WF1T” para $f = 50$ Hz, $t_r = t_f = 3.500 \mu\text{s}$, $V_o/V_i = 1$ y $N = 4$	4-9
Figura 4.10. Conformación de la señal para las medidas de características. .	4-11
Figura 4.11. Formas de onda TPWM-DM obtenida por el bloque de conformado de la señal para $f = 50$ Hz, $t_r = t_f = 3.500 \mu\text{s}$, $V_o/V_i = 1$ y $N = 4$ y alimentación simple.	4-12
Figura 4.12. Formas de onda TPWM-DM obtenida por el bloque de conformado de la señal para $f = 50$ Hz, $t_r = t_f = 3.500 \mu\text{s}$, $V_o/V_i = 1$ y $N = 4$ y alimentación doble.	4-13
Figura 4.13. Módulo para la medida de los indicadores THD , $WTHD$, DF , V_1 pu y f_1	4-14
Figura 4.14. Módulo para la detección de LOH	4-15
Figura 4.15. Módulo PF50160 para la verificación de la norma EN 50160. .	4-16
Figura 4.16. Conexión del módulo PF50160 en la aplicación.	4-17
Figura 4.17. Pantalla principal con el módulo PF50160.	4-17
Figura 4.18. Automatización de las medidas.	4-18
Figura 4.19. Recopilación de todos los resultados en una única matriz de datos.	4-19
Figura 4.20. Panel de usuario de la aplicación de medida de indicadores. ...	4-21
Figura 5.1. Funcionamiento de las instrucciones de manejo de tablas	5-3
Figura 5.2. Temporizador 1 del microcontrolador	5-5
Figura 5.3. Bloque comparador digital CCP	5-7

Figura 5.4. Arquitectura de las interrupciones 5-8

Figura 5.5. Esquema básico del modulador. 5-11

Figura 5.6. Montaje real del modulador. 5-12

Figura 5.7. Flujograma de la rutina de interrupción INTMOD. 5-13

Figura 5.8. Esquema de bloques de la implementación 2. 5-18

Figura 5.9. Arquitectura de los temporizadores de la familia PIC24F 5-18

Figura 5.10. Arquitectura del módulo CCP en la familia PIC24F 5-19

Figura 5.11. Funcionamiento del módulo CCP en la familia de microcontroladores PIC24F 5-21

Figura 5.12. Placa utilizada para el prototipo de la implementación 2. 5-23

Figura 5.13. Banco de pruebas de la implementación 2. 5-25

Figura 5.14. Pantalla de control de LabVIEW. 5-26

Figura 5.15. Placa de desarrollo de la implementación 4. 5-28

Figura 5.16. Banco de pruebas utilizado en la implementación 4. 5-29

Figura 6.1. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 10$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$ 6-4

Figura 6.2. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 25$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$ 6-5

Figura 6.3. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$ 6-6

Figura 6.4. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 75$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$ 6-7

Figura 6.5. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 100$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$ 6-8

Figura 6.6. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 150$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$ 6-9

Figura 6.7. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 200$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$ 6-10

Figura 6.8. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 10$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$ 6-12

Figura 6.9. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 25$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$ 6-13

Figura 6.10. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$ 6-14

Figura 6.11. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 75$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$ 6-15

Figura 6.12. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 100$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$ 6-16

Figura 6.13. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 150$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$ 6-17

Figura 6.14. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 200$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$ 6-18

Figura 6.15. Formas de onda de la señal TPWM-DM para $f = 50$ Hz, $N = 5$.
a) $t_r = t_f = 2$ ms. b) $t_r = t_f = 3$ ms. 6-20

Figura 6.16. Formas de onda de la señal TPWM-DM para $f = 50$ Hz, $N = 5$.
a) $t_r = t_f = 4$ ms. b) $t_r = t_f = 5$ ms. 6-21

Figura 6.17. Formas de onda de la señal TPWM-DM para $f = 50$ Hz, $N = 5$.
a) $t_r = t_f = 6$ ms. b) $t_r = t_f = 7$ ms. 6-22

Figura 6.18. Formas de onda de la señal TPWM-DM para $f = 50$ Hz, $N = 5$.
a) $t_r = t_f = 8$ ms. b) $t_r = t_f = 9$ ms. 6-23

Figura 6.19. Analizador de espectro HP 3588A. 6-25

Figura 6.20. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 2$ ms. . . 6-27

Figura 6.21. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 3$ ms. . . 6-28

Figura 6.22. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 4$ ms. . . 6-28

Figura 6.23. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 5$ ms. . . 6-28

Figura 6.24. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 6$ ms. . . 6-29

Figura 6.25. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 7$ ms. . . 6-29

Figura 6.26. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 8$ ms. . . 6-29

Figura 6.27. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 9$ ms. . . 6-30

Figura A2.1. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 3$ A2-3

Figura A2.2. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 4$ A2-5

Figura A2.3. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 5$ A2-7

Figura A2.4. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 6$ A2-9

Figura A2.5. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 7$ A2-11

Figura A2.6. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 8$ A2-13

Figura A2.7. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 9$ A2-15

Figura A2.8. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 10$ A2-17

Figura A2.9. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 11$ A2-19

Figura A2.10. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 12$ A2-21

Figura A2.11. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 13$ A2-23

Figura A2.12. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 14$ A2-25

Figura A2.13. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 15$ A2-27

Figura A2.14. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 16$ A2-29

Figura A2.15. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 17$ A2-31

Figura A2.16. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 18$ A2-33

Figura A2.17. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 19$ A2-35

Figura A2.18. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 20$ A2-37

Figura A2.19. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 3$ A2-39

Figura A2.20. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 4$ A2-41

Figura A2.21. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 5$ A2-43

Figura A2.22. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida
 TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 6$ A2-45

Figura A2.23. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida
 TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 7$ A2-47

Figura A2.24. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida
 TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 8$ A2-49

Figura A2.25. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida
 TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 9$ A2-51

Figura A2.26. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida
 TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 10$ A2-53

Figura A2.27. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida
 TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 11$ A2-55

Figura A2.28. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida
 TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 12$ A2-57

Figura A2.29. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida
 TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 13$ A2-59

Figura A2.30. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida
 TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 14$ A2-61

Figura A2.31. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida
 TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 15$ A2-63

Figura A2.32. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida
 TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 16$ A2-65

Figura A2.33. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida
 TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 17$ A2-67

Figura A2.34. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida
 TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 18$ A2-69

Figura A2.35. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida
 TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 19$ A2-71

Figura A2.36. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida
 TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 20$ A2-73

Figura A4.1. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 6$, $t_r = 2$ ms y $V_o/V_i = 1$.
 A4-2

Figura A4.2. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 7$, $t_r = 2,4$ ms y $V_o/V_i = 1$.
 A4-3

Figura A4.3. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 8$, $t_r = 2,8$ ms y $V_o/V_i = 1$.
 A4-4

Figura A4.4. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 9$, $t_r = 3,1$ ms y $V_o/V_i = 1$.
 A4-5

Figura A4.5. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 10$, $t_r = 3,5$ ms y $V_o/V_i = 1$.
 A4-6

Índice de tablas

Tabla 2.1. Valores de la tensión media de una señal conmutada no alterna (V_{mc}) y de una señal conmutada alterna (V_{ma}) en función del ciclo de trabajo (D).	2-15
Tabla 3.1. Valores máximos de la amplitud de la frecuencia fundamental en tres formas de onda.	3-7
Tabla 3.2. Amplitud de las componentes armónicas de orden par en la forma de onda monofásica de la figura 3.10.	3-10
Tabla 3.3. Amplitud de las componentes armónicas de orden par en la forma de onda trifásica de la figura 3.10.	3-12
Tabla 3.4. Amplitud de las componentes armónicas de orden par en la forma de onda monofásica de la figura 3.11.	3-12
Tabla 3.5. Amplitud de las componentes armónicas de orden par en la forma de onda trifásica de la figura 3.11.	3-12
Tabla 3.6. Valores de tiempos durante t_r para $N = 5$, $V_o/V_i = 1$ y varios valores de t_r	3-23
Tabla 3.7. Valores de tiempos durante t_r para $N = 6$, $V_o/V_i = 1$ y varios valores de t_r	3-25
Tabla 3.8. Valores de tiempos durante t_f para $N = 5$, $V_o/V_i = 1$ y varios valores de t_f	3-30
Tabla 3.9. Valores de tiempos durante t_f para $N = 6$, $V_o/V_i = 1$ y varios valores de t_f	3-32
Tabla 3.10. Valores de tiempo de cada uno de los niveles que forman cada intervalo de modulación de una señal TPWM-DM para $N = 5$, $f = 50$ Hz y varios valores de $t_r = t_f$	3-40
Tabla 3.11. Vectores HL $N = 5$, $f = 50$ Hz y varios valores de t_r y t_f , desde 1.000 μ s hasta 10.000 μ s.	3-41
Tabla 3.12. Valores finales de los vectores HL para una señal TPWM-DM con $N = 5$, $f = 50$ Hz y varios valores de t_r y t_f , desde 1.000 μ s hasta 10.000 μ s.	3-42
Tabla 3.13. Valores de tiempo de cada uno de los niveles que forman cada intervalo de modulación de una señal TPWM-DM para $N = 6$, $f = 50$ Hz y varios valores de $t_r = t_f$	3-43

Tabla 3.14. Tabla de vectores HL para $N = 6$, $f = 50$ Hz y valores de t_r y t_f , desde 1.000 μ s a 10.000 μ s.	3-44
Tabla 3.15. Valores finales de los vectores HL para una señal modulada TPWM-DM de 50 Hz, $N = 6$ y $t_r = 1.000$ μ s a $t_r = 10.000$ μ s.	3-45
Tabla 3.16. Valores máximos de la frecuencia de la señal TPWM-DM en función de t_r y t_f	3-48
Tabla 3.17. Error en frecuencia debido al redondeo de los tiempos en caso peor.	3-49
Tabla 5.1. Instrucciones específicas del microcontrolador PIC19F425 para el manejo de tablas	5-2
Tabla 5.2. Tamaño necesario de memoria por tabla de modulación según el valor de N	5-4
Tabla 5.3. Ejemplos de tamaños de la tabla de modulación (en bytes) para distintos valores de pasos de t_r y N	5-4
Tabla 5.4. Frecuencia máxima y mínima de la señal en función de N	5-6
Tabla 5.5. Valores mínimos de tiempos de modulación.	5-10
Tabla 5.6. Reorganización de la tabla de modulación para $N = 5$	5-21
Tabla 6.1. Resumen de los valores obtenidos en la simulación para $N = 6$ y $N = 9$	6-3
Tabla 6.2. Valores de tiempos medidos en la señal modulada.	6-24
Tabla 6.3. Medidas de la frecuencia de la señal modulada.	6-25
Tabla 6.4. Medidas de armónicos en una señal modulada TPWM-DM de 50 Hz para $N = 5$ y $t_r = t_f$ de 2 a 9 ms.	6-26
Tabla 6.5. Comparativa de valores medidos y simulados de THD y $WTHD$ para una señal TPWM-DM de 50 Hz para $N = 5$ y $t_r = t_f$ de 2 a 9 ms.	6-27
Tabla 6.6. Comparativa de indicadores de calidad para varias técnicas de modulación.	6-31
Tabla 6.7. Comparativa de indicadores de calidad para $M = 7$	6-33
Tabla 6.8. Comparativa de indicadores de calidad para $M = 11$	6-34
Tabla 6.9. Comparativa de indicadores de calidad para $M = 15$	6-35
Tabla 6.10. Comparativa de indicadores de calidad para $M = 21$	6-36

Tabla 6.11. Comparativa de indicadores de calidad para $M = 27$	6-38
Tabla A1.1. Perfil de frecuencias establecido en la norma EN 50160.	A1-6
Tabla A2.1. Valores numéricos de la figura A2.1.	A2-4
Tabla A2.2. Valores numéricos de la figura A2.2.	A2-6
Tabla A2.3. Valores numéricos de la figura A2.3.	A2-8
Tabla A2.4. Valores numéricos de la figura A2.4.	A2-10
Tabla A2.5. Valores numéricos de la figura A2.5.	A2-12
Tabla A2.6. Valores numéricos de la figura A2.6.	A2-14
Tabla A2.7. Valores numéricos de la figura A2.7.	A2-16
Tabla A2.8. Valores numéricos de la figura A2.8.	A2-18
Tabla A2.9. Valores numéricos de la figura A2.9.	A2-20
Tabla A2.10. Valores numéricos de la figura A2.10.	A2-22
Tabla A2.11. Valores numéricos de la figura A2.11.	A2-24
Tabla A2.12. Valores numéricos de la figura A2.12.	A2-26
Tabla A2.13. Valores numéricos de la figura A2.13.	A2-28
Tabla A2.14. Valores numéricos de la figura A2.14.	A2-30
Tabla A2.15. Valores numéricos de la figura A2.15.	A2-32
Tabla A2.16. Valores numéricos de la figura A2.16.	A2-34
Tabla A2.17. Valores numéricos de la figura A2.17.	A2-36
Tabla A2.18. Valores numéricos de la figura A2.18.	A2-38
Tabla A2.19. Valores numéricos de la figura A2.19.	A2-40
Tabla A2.20. Valores numéricos de la figura A2.20.	A2-42
Tabla A2.21. Valores numéricos de la figura A2.21.	A2-44
Tabla A2.22. Valores numéricos de la figura A2.22.	A2-46
Tabla A2.23. Valores numéricos de la figura A2.23.	A2-48
Tabla A2.24. Valores numéricos de la figura A2.24.	A2-50
Tabla A2.25. Valores numéricos de la figura A2.25.	A2-52
Tabla A2.26. Valores numéricos de la figura A2.26.	A2-54

Tabla A2.27. Valores numéricos de la figura A2.27.	A2-56
Tabla A2.28. Valores numéricos de la figura A2.28.	A2-58
Tabla A2.29. Valores numéricos de la figura A2.29.	A2-60
Tabla A2.30. Valores numéricos de la figura A2.30.	A2-62
Tabla A2.31. Valores numéricos de la figura A2.31.	A2-64
Tabla A2.32. Valores numéricos de la figura A2.32.	A2-66
Tabla A2.33. Valores numéricos de la figura A2.33.	A2-68
Tabla A2.34. Valores numéricos de la figura A2.34.	A2-70
Tabla A2.35. Valores numéricos de la figura A2.35.	A2-72
Tabla A2.36. Valores numéricos de la figura A2.36.	A2-74
Tabla A3.1a. Nombre, descripción y localización de los registros, variables y constantes utilizados en el programa.	A3-1
Tabla A3.1b. Nombre, descripción y localización de los registros, variables y constantes utilizados en el programa (continuación).	A3-2
Tabla A3.1c. Nombre y descripción de los registros, variables y constantes utilizados en el programa (continuación).	A3-3
Tabla A4.1. Medidas de armónicos para $f = 50$ Hz, $N = 6$, $t_r = 2$ ms y $V_o/V_i = 1$	A4-2
Tabla A4.2. Medidas de armónicos para $f = 50$ Hz, $N = 7$, $t_r = 2,4$ ms y $V_o/V_i = 1$	A4-3
Tabla A4.3. Medidas de armónicos para $f = 50$ Hz, $N = 8$, $t_r = 2,8$ ms y $V_o/V_i = 1$	A4-4
Tabla A4.4. Medidas de armónicos para $f = 50$ Hz, $N = 9$, $t_r = 3,1$ ms y $V_o/V_i = 1$	A4-5
Tabla A4.5. Medidas de armónicos para $f = 50$ Hz, $N = 10$, $t_r = 3,5$ ms y $V_o/V_i = 1$	A4-6

Índice de listados

Listado 5.1. Rutina de interrupción de modulación.	5-15
Listado A3.1. Rutina de interrupción del temporizador 1.	A3-4
Listado A3.2a. Programa de inicio del sistema.	A3-4
Listado A3.2b. Programa de inicio del sistema (continuación).	A3-4
Listado A3.2c. Programa de inicio del sistema (continuación).	A3-6
Listado A3.3a. Programa principal del sistema.	A3-8
Listado A3.3b. Programa principal del sistema (continuación).	A3-9
Listado A3.4a. Rutina de arranque suave.	A3-9
Listado A3.4b. Rutina de arranque suave (continuación).	A3-11
Listado A3.5. Rutina de tratamiento del ADC.	A3-12
Listado A3.6a. Tablas de modulación TPWM-DM.	A3-13
Listado A3.6b. Tablas de modulación TPWM-DM (continuación).	A3-14

Capítulo 1

Introducción

Índice

Capítulo 1. Introducción	1-1
1.1 Objetivos	1-1
1.2 Bases	1-4
1.3 Metodología	1-5
1.4 Contenido	1-6
Referencias	1-7

Índice de figuras

Figura 1.1. Esquema de bloques de un inversor. 1-2

Capítulo 1. Introducción

El elevado número de aplicaciones de los inversores electrónicos de potencia hacen que sea un área en permanente evolución tanto desde el punto de vista de su arquitectura física (circuitos) como de su funcionamiento (técnicas de modulación y de control) realizados estos últimos por medio de sistemas programables (microcontroladores, FPGAs, sistemas empotrados, etc.).

La creciente preocupación general por el deterioro del medio ambiente debido a la producción de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles, ha hecho volver la vista hacia técnicas de generación energéticas conocidas desde hace mucho tiempo como la eólica, la fotovoltaica o la mareomotriz, por ejemplo. Así mismo ha propiciado el desarrollo de nuevas técnicas como las pilas de combustibles. De todas estas alternativas de generación se obtiene energía eléctrica en corriente continua (fotovoltaica) o alterna de frecuencia variable con un bajo índice de contaminación. Sin embargo, la red de distribución eléctrica requiere, en muchos casos, que la energía eléctrica sea de corriente alterna y frecuencia constante. Esto mismo sucede con las redes de suministro industriales y urbanas.

Los inversores electrónicos de potencia tienen muchas aplicaciones en esta conversión de la energía eléctrica, tanto para la conversión CC-CA como para la adaptación de frecuencia CA-CA.

1.1 Objetivos

Una de las partes que hacen que un inversor funcione con unas determinadas prestaciones es la técnica de modulación que utiliza. Según sea esta técnica, los resultados son diferentes. Las primeras técnicas desarrolladas se implementaron por medios analógicos y son la base de muchas de las técnicas utilizadas hoy día en su versión digitalizada. La técnica que se desarrolla en esta tesis es directamente digital.

Sus principios son conocidos pero su realización con dispositivos no digitales es muy complicada. Las diferencias entre las distintas técnicas de modulación repercuten en la calidad de la forma de onda final obtenida.

Un inversor se puede ver como un sistema formado por cuatro partes principales (figura 1.1): el bloque de alimentación, que suministra tensión y corriente continua al bloque inversor; el bloque inversor propiamente dicho, que obtiene la señal de salida como respuesta al patrón de conmutaciones generado por el bloque modulador; el bloque de control, que genera las contraseñas necesarias para que el bloque modulador modifique el patrón de conmutaciones del bloque inversor; y el bloque modulador que, en respuesta al bloque de control, genera el patrón de conmutaciones de la señal modulada de salida para el bloque inversor.

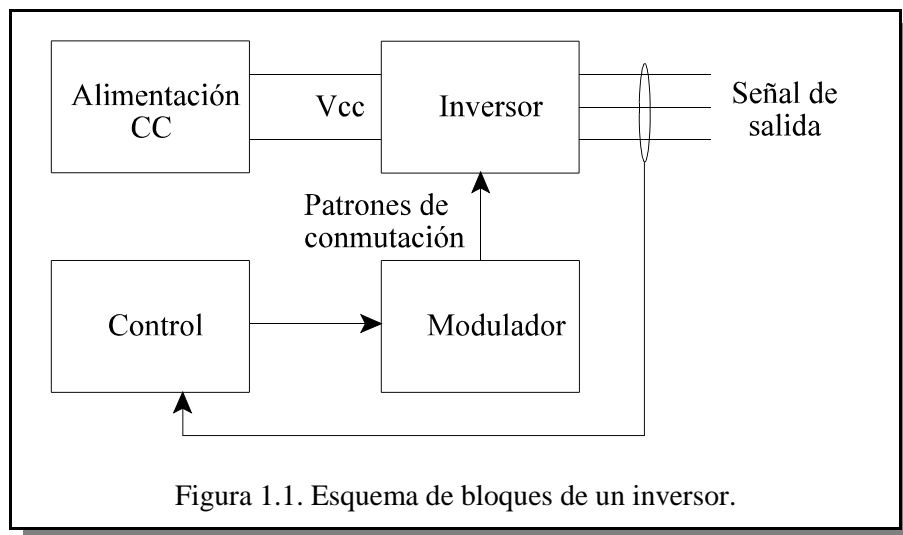


Figura 1.1. Esquema de bloques de un inversor.

Idealmente, la parte de potencia de un inversor (bloque inversor) “traduce” las señales de control que la gobierna, que son señales de baja tensión y baja corriente, en señales de alta tensión y alta corriente con las mismas características temporales. Es decir que se comporta como un fiel convertidor de nivel de las señales de control. Como las señales de control son conmutadas, la salida del bloque inversor es una señal conmutada.

Es importante saber que las señales que genera el bloque modulador deben de ser fielmente reproducidas por el bloque inversor. De no ser así, las características de la señal de salida obtenida son diferentes a las esperadas a partir de las señales del modulador. En esta tesis se parte del supuesto en el que el bloque inversor responde

fielmente a las señales generadas por el bloque modulador, es decir que no deforma estas señales, simplemente las cambia de nivel.

Si el bloque inversor se comporta adecuadamente, las características obtenidas en las señales del bloque modulador se reflejan automáticamente en la señal de salida del inversor. Dado que estas características son medidas porcentualmente (descritas en el Anexo A1), los valores de estos parámetros se deben de mantener a la entrada del bloque inversor y a la salida de este.

Esta tesis no trata sobre el bloque inversor en sí mismo, sino del bloque modulador que genera las señales que actúan sobre el bloque inversor. Es por ello que, si bien se hace una pequeña introducción a los inversores de potencia (Capítulo 2), este no es el núcleo de la tesis.

Esta tesis se centra en la modulación de la señal a la salida del inversor. Dado que el bloque inversor se comporta como amplificador de las señales que lo gobiernan, esta tesis se basa en un sistema microcontrolador para desarrollar un método específico (Capítulo 3) que genera las señales patrones de conmutación para el bloque inversor. Este método tiene unas características concretas que mejoran en algunos aspectos a otros métodos de modulación.

Los objetivos que se persiguen en esta tesis son los siguientes:

- **Mejorar el perfil de armónicos (reducir las componentes armónicas) de la señal modulada.** Para ello se utiliza una señal trapezoidal como objetivo a alcanzar a la salida del inversor, que permite mejorar (reducir o incrementar, según corresponda) los indicadores de calidad *THD*, *WTHD*, *DF*, *LOH* y *PF50160*, descritos en el Anexo A1.
- **Reducir el coste del bloque modulador.** La modulación directa elimina la necesidad de las señales moduladora y portadora, lo cual simplifica el algoritmo de generación de las señales de control del inversor (patrones de conmutación). Además, la forma de onda trapezoidal, objetivo de la modulación, minimiza los recursos computacionales necesarios, pudiéndose implementar el bloque modulador por medio de microcontroladores comerciales de bajo costo.

- **Reducir el coste de los filtros de salida.** Como consecuencia de la mejora del perfil de armónicos en la señal de salida, bajo determinadas circunstancias es posible minimizar los filtros de salida, llegando incluso a su eliminación.
- **Reducir las pérdidas en el sistema inversor.** Este método de modulación permite que la amplitud del armónico fundamental de la señal de salida sea grande respecto a otros métodos (indicador de calidad V_1 pu del Anexo A1), lo que incrementa el rendimiento del sistema.

Como consecuencia de los puntos anteriores, el método desarrollado mejora, en general, las características de los convertidores CC - CA.

1.2 Bases

El trabajo que se desarrolla en esta tesis se basa en el principio de igualdad del producto tensión \times tiempo ($V \times s$) de la señal objetivo a alcanzar y de la señal modulada PWM. Este principio da nombre al método de modulación que lo utiliza como “modulación directa”, ya que obtiene la señal PWM sin utilizar medios indirectos como señales portadora y moduladora. D. Grahame Holmes y Thomas A. Lipo [1, pág. 146], describen este método como sigue: “*El concepto es hacer conmutar el inversor para conseguir un intervalo de pulso activo por cada intervalo de la portadora que tenga exactamente el mismo valor medio tensión \times tiempo que la forma de onda original*”. En esta descripción se utiliza la palabra “portadora” con el significado “señal objetivo a conseguir a la salida del inversor”, y no tiene el significado habitual en otras técnicas de modulación.

Anteriormente, en 1987, Yoone Ho Kim y Mehrdad Ehsani presentaron un trabajo [2] que proponía la utilización de este método para señales sinusoidales. Sin embargo, el método es complicado de implementar ya que requiere realizar en directo integrales de funciones trigonométricas en cada intervalo de modulación y esto necesita una potencia computacional elevada.

Un trabajo sobre la técnica de modulación SLPWM (SLope PWM) [3] hizo pensar en la posibilidad de aplicar la técnica de modulación directa a una señal

trapezoidal, por lo que después de analizar las propiedades de las señales trapezoidales, se comenzó a trabajar en ello ya que simplifica mucho los cálculos por ser esta una señal lineal por tramos.

El hecho de que las ecuaciones que definen la señal trapezoidal sean lineales, elimina, el problema de la integración en directo de funciones trigonométricas, reduciendo drásticamente los requisitos computacionales del sistema modulador. Esta reducción es tanta que sólo es necesario disponer de un multiplicador, como se justifica en el Capítulo 3, para generar todos los patrones de modulación a partir de un **vector-semilla** de pocos elementos.

De las primeas simulaciones realizadas bajo LabVIEW se obtuvieron resultados interesantes que han llevado a la realización de numerosos PFC, que han confirmado, una y otra vez, los resultados de las simulaciones.

1.3 Metodología

Para el desarrollo de este método de modulación se parte de la forma de onda ideal objetivo que se desea obtener a la salida del inversor. En este caso se trata de una señal trapezoidal. El análisis de esta forma de onda y el planteamiento de la técnica de modulación TPWM-DM (Trapezoidal PWM with Direct Modulation) se realiza en el Capítulo 3. En él se desarrollan las ecuaciones con las que se obtienen los valores de los distintos pulsos que forman la señal modulada.

En una etapa posterior (Capítulo 4), estas ecuaciones se someten a una simulación bajo entorno LabVIEW que permite visualizar las características de la señal modulada obtenida. La simulación permite, además, evaluar distintos indicadores de calidad como *THD*, *WTHD*, *DF*, V_{1pu} , *LOH*, *EN50150* y la frecuencia del armónico fundamental, f_1 . Todos estos indicadores están definidos en el Anexo A1.

La simulación de la señal modulada TPWM-DM se hace de forma que representa tanto al desarrollo teórico, dado por las ecuaciones, como a la implementación real con sus limitaciones. De esta forma, la simulación se aproxima tanto a la implementación realizada que apenas hay diferencias entre las medidas en

un caso y en otro, como se discute en el Capítulo 5.

Tras este análisis en simulación se realiza la implementación por medio de un dispositivo microcontrolador (Capítulo 5). Realmente se realizan cuatro implementaciones, que mejoran progresivamente las prestaciones de entorno del modulador, aunque no las de la señal modulada, que se rige siempre por las mismas ecuaciones.

1.4 Contenido

El trabajo que se desarrolla en este texto consta de ocho capítulos acompañados de 4 anexos. El contenido de cada una de estas partes es como sigue:

- En el presente Capítulo 1 se hace una introducción al trabajo realizado.
- En el Capítulo 2 se describen, a modo de introducción, algunas topologías de inversores y se citan diferentes técnicas de modulación PWM.
- En el Capítulo 3 se plantea y desarrolla la técnica TPWM-DM.
- En el Capítulo 4 se utiliza el desarrollo del Capítulo 3 para realizar la simulación de la técnica de modulación partiendo de las ecuaciones obtenidas, sintetizando la forma de onda TPWM-DM y midiendo sus características.
- En el Capítulo 5 se describen las implementaciones realizadas y los principios en los que se basan cada una de ellas. Este capítulo está complementado con el Anexo A3.
- En el Capítulo 6 se presentan las medidas de los resultados obtenidos por medio de la simulación y de los prototipos, y se comparan ambos. Estos resultados se comparan con los obtenidos en las mismas condiciones por medio de otras técnicas de modulación, pudiéndose observar las mejoras que aporta. El Anexo A2 y el Anexo A4 complementan este capítulo, aportando resultados adicionales obtenidos de la simulación y de las implementaciones, respectivamente.

- El Capítulo 7 presenta las conclusiones a las que se llegan de lo expuesto y experimentado a lo largo del trabajo
- En el Capítulo 8 se proponen futuras líneas de investigación utilizando esta técnica.
- En el Anexo A1 se introducen los criterios de calidad de la señal que se han utilizado en esta tesis.
- El Anexo A2 trata sobre las medidas realizadas en simulación. Amplía el Capítulo 6.
- El Anexo A3 desarrolla la parte de programación del microcontrolador que, no siendo la modulación de la señal en sí misma, es necesaria para el funcionamiento del modulador. Complementa el Capítulo 4.
- El Anexo A4 contiene una colección de medidas realizadas sobre los prototipos, comparándose éstas con las obtenidas en simulación. Este anexo amplía el Capítulo 6.

Tanto en los distintos capítulos como en los anexos, las referencias a documentos externos, cuando las hay, se han organizado por cada documento y se encuentran al final de cada uno de ellos.

Todas las figuras, tablas y listados son originales del autor salvo excepciones. Solamente siete figuras y una tabla no son originales (en el Capítulo 5). En estos casos se cita la fuente de ellas junto al texto del pie de la figura o tabla.

Referencias

- [1] D. Grahame Holmes and Thomas A. Lipo, “Pulse Width Modulation For Power Converters”, IEEE Press, Wiley Interscience 2003, ISBN: 0-471-20814-0. Pag. 146.
- [2] Yoone Ho Kim and Mehrdad Ehsani, “An Algebraic Algorithm for Microcomputer-Based (Direct) Inverter Pulse Width Modulation”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. Ia-23, No. 4, July/August 1987.
- [3] Francisco Vargas-Merino, Mario J. Meco-Gutiérrez, Juan R. Heredia-Larrubia, and Antonio Ruiz-Gonzalez, “Low Switching PWM Strategy Using a Carrier Wave Regulated by the Slope of a Trapezoidal Modulator Wave”. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 56, No. 6, June 2009.

Capítulo 2

Inversores de potencia

Índice

Capítulo 2. Inversores de potencia	2-1
2.1 Topologías	2-1
2.1.1 Clasificación	2-1
2.1.2 Inversor monofásico de medio puente	2-2
2.1.3 Inversor monofásico de puente completo	2-3
2.1.4 Inversor trifásico	2-7
2.2 Tiempos muertos	2-10
2.3 Aplicaciones de los inversores	2-10
2.4 Técnicas de modulación PWM	2-11
2.4.1 Modulación PWM	2-12
2.4.2 PWM por modulación directa	2-18
2.4.3 Otras formas de modulación PWM	2-19
2.4.4 Clasificación de las técnicas PWM	2-20
Referencias	2-23

Índice de figuras

Figura 2.1. Inversor en medio puente.	2-2
Figura 2.2. Inversor monofásico en puente completo. Esquema básico con interruptores.	2-3
Figura 2.3. Funcionamiento del inversor monofásico en puente completo. ...	2-4
Figura 2.4. Forma de onda de la señal de salida del inversor de puente completo.	2-4
Figura 2.5. Esquema básico de un inversor monofásico en puente completo realizado con transistores IGBT.	2-5
Figura 2.6. Esquema básico de inversor trifásico.	2-7
Figura 2.7. Formas de onda a la salida de un inversor trifásico,	2-8
Figura 2.8. Espectros de frecuencias de las señales de salida.	2-9
Figura 2.9. Definiciones de tiempos en una señal no alterna.	2-12
Figura 2.10. Definiciones de tiempos en una señal alterna.	2-14
Figura 2.11. Formas de onda conmutadas no alternas.	2-16
Figura 2.12. Formas de onda conmutadas alternas.	2-17
Figura 2.13. Modulación PWM directa de una señal sinusoidal.	2-18
Figura 2.14. Modulación PWM por comparación.	2-20

Índice de tablas

Tabla 2.1. Valores de la tensión media de una señal conmutada no alterna (V_{mc}) y de una señal conmutada alterna (V_{ma}) en función del ciclo de trabajo (D).
..... 2-15

Capítulo 2. Inversores de potencia

Los inversores de potencia son sistemas electrónicos que se encuentran dentro del grupo de los convertidores de tensión y corriente continua a alterna (cc-ca) que permiten obtener tensiones y corrientes alternas a partir de tensiones y corrientes continuas. Además, es posible modificar la amplitud y la frecuencia de la señal de salida del inversor.

2.1 Topologías

La utilidad de los inversores ha provocado la dedicación de muchos investigadores a estudiarlos y plantear posibles soluciones. Es por eso por lo que hay una gran variedad de posibilidades en cuanto a su topología. En lo que sigue se citan algunas de ellas. Dado que este trabajo está orientado a los inversores fuente de tensión (VSI), no se hace referencia a los inversores fuente de corriente (CSI).

2.1.1 Clasificación

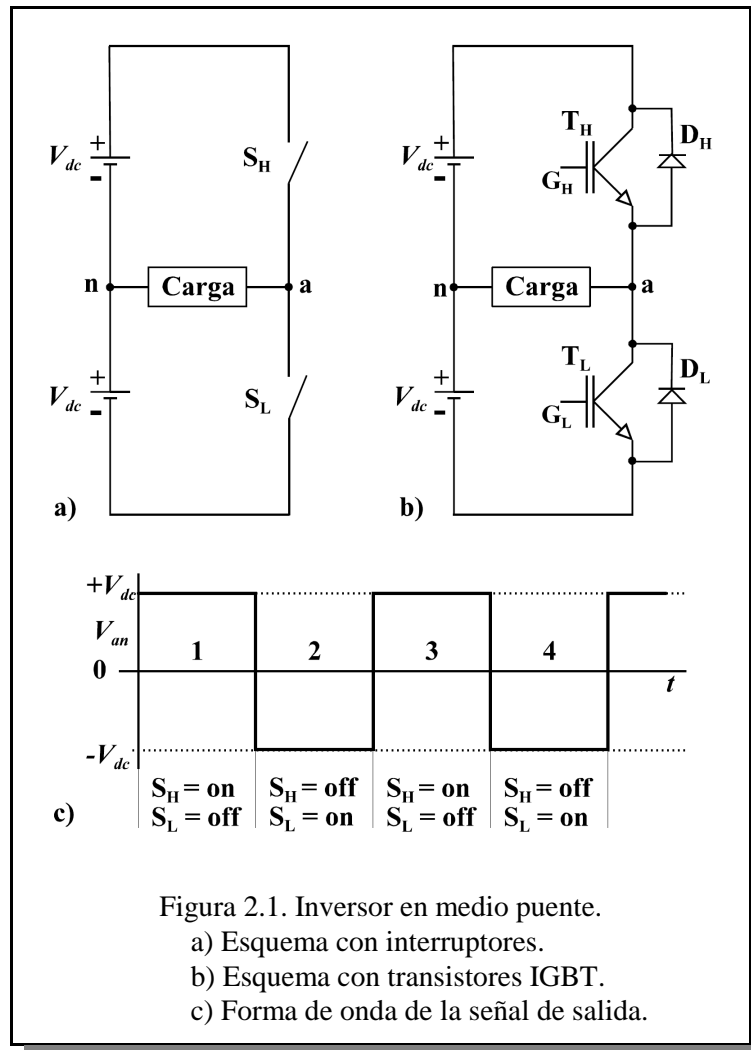
Los inversores pueden ser clasificados según diferentes criterios como el número de fases, su topología, el número de niveles de la señal obtenida, etc.

- Según el número de fases: Monofásicos y polifásicos.
- Según su topología: Medio puente, puente completo, push-pull, etc.
- Según el número de niveles de la señal de salida: Dos niveles y más de dos niveles o multinivel.

Distintas combinaciones de estos criterios dan lugar a un gran número de realizaciones de inversores. En lo que sigue se describen algunas de ellas.

2.1.2 Inversor monofásico de medio puente

Esta es la topología más simple [1] [2]. La figura 2.1a) muestra su esquema realizado con interruptores mientras que en b) se muestra la realización con transistores IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). La figura 2.1c) muestra una de las formas de onda que es posible obtener. La tensión de salida se obtiene entre los puntos a y n. El funcionamiento de los interruptores es alternativo. En ningún caso los interruptores S_H y S_L (T_H y T_L) pueden estar cerrados en el mismo instante. En la figura 2.1c) puede verse que la tensión de salida es positiva, $+V_{dc}$, durante todo el tiempo que S_H (T_H) está cerrado y S_L (T_L) está abierto (intervalos 1 y 3 en la figura 2.1c). La tensión de salida es negativa, $-V_{dc}$, durante todo el tiempo que S_H (T_H) está abierto y S_L (T_L) está cerrado (intervalos 2 y 4 en la figura 2.1c).



2.1.3 Inversor monofásico de puente completo

Un inversor monofásico de puente completo se construye en base a la topología descrita anteriormente [1] [2], como se muestra en la figura 2.2, que representa el esquema básico de un inversor monofásico de dos niveles y consta de dos ramas denominadas A y B. En cada una de ellas hay dos interruptores (S_{AH} y S_{AL} en la rama A y S_{BH} y S_{BL} en la rama B). La salida se toma entre los puntos medios de cada rama (puntos a y b, en la figura). De esta forma, haciendo que los interruptores estén cerrados o abiertos en un determinado orden, la tensión en los terminales de salida, a y b, toma valores de diferente polaridad.

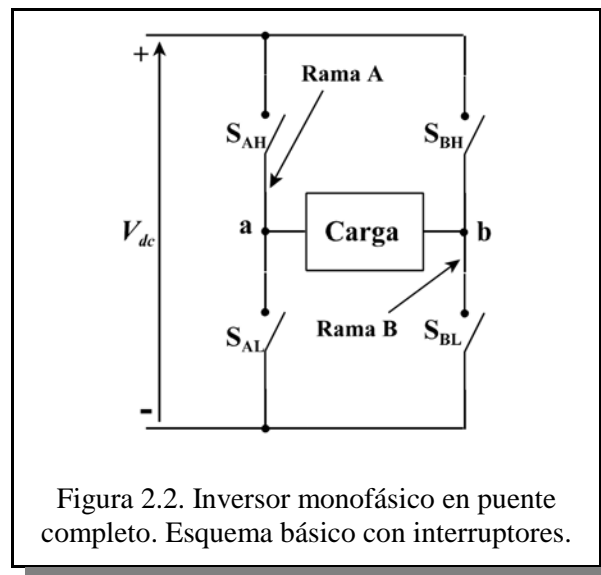


Figura 2.2. Inversor monofásico en puente completo. Esquema básico con interruptores.

Cuando el inversor se alimenta con una tensión continua V_{dc} (bus de continua o DC-link), el valor de la tensión entre los punto a y b es como sigue (figura 2.3):

- $V_{ab} = +V_{dc}$ cuando los interruptores S_{AH} y S_{BL} están cerrados (en conducción) y los interruptores S_{AL} y S_{BH} están abiertos (sin conducir). La corriente circula en el sentido de $a \rightarrow b$, representada por la línea roja discontinua en la figura 2.3a).
- $V_{ab} = -V_{dc}$ cuando los interruptores S_{AL} y S_{BH} están cerrados y los interruptores S_{AH} y S_{BL} están abiertos. En este caso la corriente circula en el sentido de $b \rightarrow a$, representada por la línea roja discontinua en la figura 2.3b).

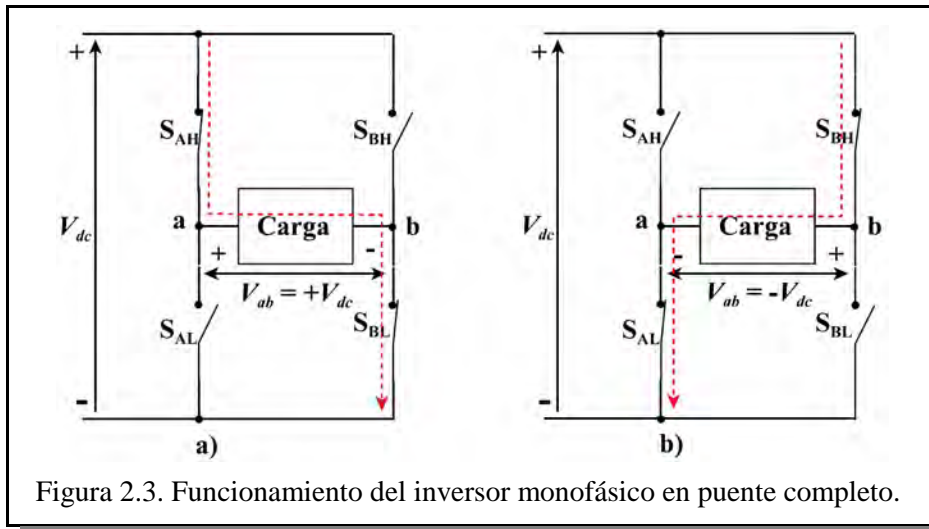


Figura 2.3. Funcionamiento del inversor monofásico en puente completo.

La figura 2.4 muestra la forma de onda que se obtiene en la carga y los estados de cada interruptor en cada intervalo de tiempo.

Dada la estructura de las ramas, los interruptores de una misma rama nunca pueden estar en conducción simultáneamente. Si esto sucediera, el bus de alimentación V_{dc} sería cortocircuitado con las correspondientes consecuencias de posible destrucción de los interruptores y/o de la fuente de alimentación.

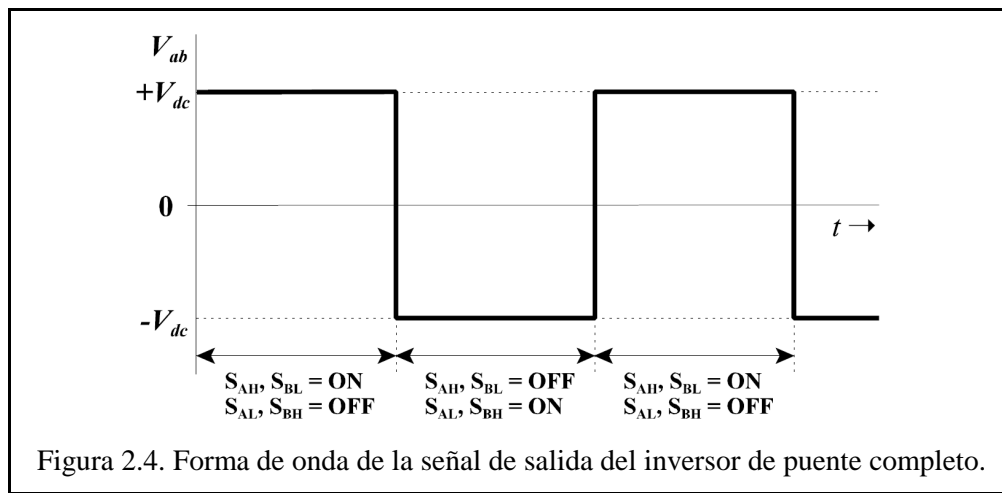
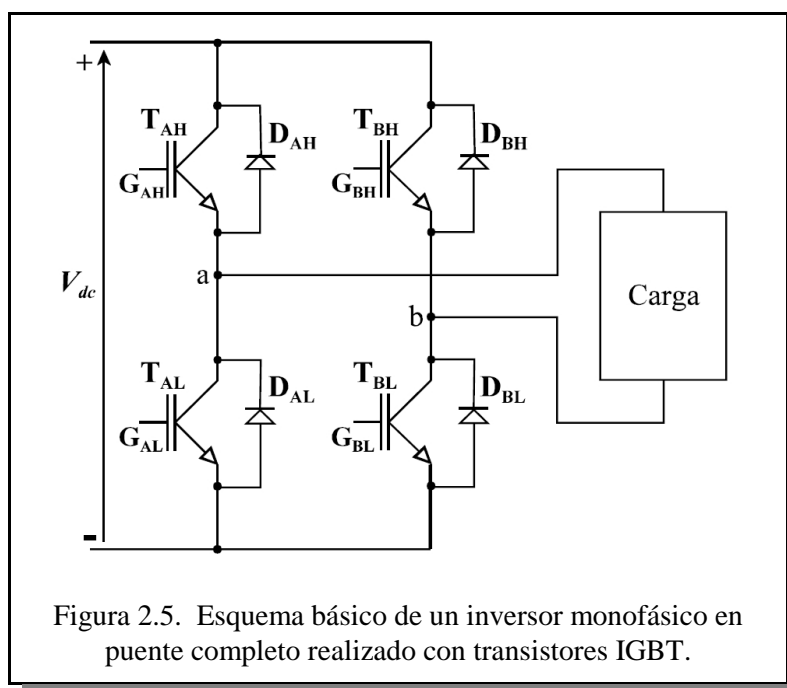


Figura 2.4. Forma de onda de la señal de salida del inversor de puente completo.

Las figuras 2.2 y 2.3 son esquemas genéricos realizados con interruptores. En la práctica se utilizan interruptores electrónicos (transistores) haciéndolos trabajar en la zona de corte (equivalente a un interruptor abierto) y en la de saturación



(equivalente a un interruptor cerrado). La figura 2.5 muestra el esquema correspondiente a un inversor monofásico en puente completo realizado con transistores IGBT. Estos interruptores electrónicos permiten conmutaciones a una frecuencia relativamente alta (algunas decenas de kHz), lo cual es imposible realizar con interruptores electromecánicos. Los transistores de la figura 2.5 conducen cuando se aplica una tensión positiva a las entradas G_{XY} (G_{AH} , G_{AL} , etc.) respecto a sus respectivos emisores y se apagan cuando se aplica 0V o tensión negativa a estas mismas entradas, también respecto a sus correspondientes emisores.

Sin embargo, los interruptores electrónicos no son interruptores ideales (resistencia nula cuando conducen y resistencia infinita cuando no conducen) presentando algunos inconvenientes, como son los siguientes:

1. Existe una corriente de fuga en los transistores cuando están en corte. Sin embargo, es una corriente de valor pequeño y en la práctica no supone una pérdida importante, por lo que no se suele tener en cuenta.
2. Presentan una caída de tensión residual cuando están en conducción, V_{CEsat} en los BJT (Bipolar Junction Transistor) e IGBT, y V_{DSon} en los MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor). En el caso de transistores bipolares (BJT e IGBT), esta caída de tensión tiene un valor

máximo especificado por el fabricante que no suele ser superior a 2 V. Aunque este valor pueda parecer pequeño, la potencia disipada por el dispositivo, que es el resultado del producto $V_{CEsat} \times I_C$, puede resultar ser alta. Si el transistor trabaja con corriente de colector de 10 A, la potencia disipada en conducción es de 20 W, que no es despreciable. Pero si trabaja con corriente de 100 A, la potencia disipada en el dispositivo es de 200 W, lo cual puede ser un problema serio por lo que respecta a la disipación del calor generado en el interior del dispositivo y la pérdida energética que implica. En el caso de transistores MOSFET, no hay tensión residual máxima como característica del dispositivo, sino una resistencia drenador-surtidor mínima en conducción (R_{DSon}). Ésta causa una caída de tensión entre drenador y surtidor que es dependiente de la corriente que circula por el drenador. En el mercado hay disponibles transistores MOSFET con una resistencia drenador-surtidor en conducción tan pequeña como algunos $m\Omega$, lo que le permite tener una caída de tensión entre drenador y surtidor muy pequeña para una corriente de drenador elevada (una corriente de drenador de 50 A genera una caída de tensión de 2,5 V para una resistencia drenador-surtidor de 50 $m\Omega$, lo cual significa una pérdida de potencia de 125 W). El inconveniente de estos dispositivos es que conforme la característica de tensión máxima entre drenador y surtidor se incrementa, también lo hace la resistencia residual R_{DSon} , lo cual hace que no sean utilizables en muchas aplicaciones industriales de potencia.

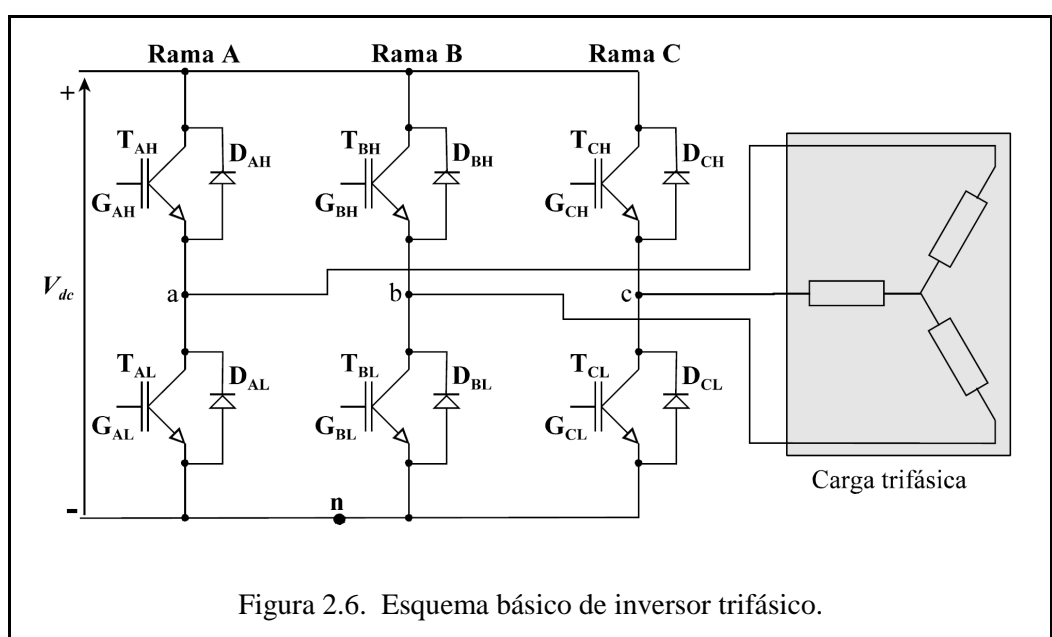
3. Tiempos de conmutación diferentes en el paso a ON (cerrado, en conducción o encendido) y en el paso a OFF (abierto, sin conducir o apagado). Esto hace que no sea posible actuar sobre los dos transistores de una misma rama con una única señal y su invertida. Si se hiciera así, existe un tiempo durante el cual ambos transistores se encuentran en conducción simultáneamente ya que el tiempo de paso a OFF es más largo (hasta 10 veces más en los IGBT, según modelos) que el tiempo de paso a ON. O, dicho de otra forma, el transistor que se enciende lo hace más rápido que el que se apaga. Durante el intervalo de tiempo diferencia entre ambos tiempos, se produce un cortocircuito que si no resulta siempre nefasto en un plazo corto de tiempo (algunos milisegundos), sí deteriora progresivamente los dispositivos llevando a la avería asegurada. En cualquier caso, siempre depende de la frecuencia de conmutación. Por ejemplo, a una frecuencia de

conmutación de 500 Hz, se producen mil cortocircuitos por segundo.

Por lo tanto, las señales de control de los transistores han de asegurar que un transistor no se enciende hasta que el otro transistor de la misma rama esté totalmente apagado. Esto es, hay que esperar a que el transistor que se encuentra en conducción se corte para poner en conducción al otro transistor de la misma rama. Este tiempo de espera se obtiene de las hojas de características de los transistores, suministradas por los fabricantes, y se denomina tiempo muerto (dead-time). Con la introducción de los tiempos muertos se eliminan los cortocircuitos en la misma rama. Estos tiempos muertos se introducen por medio de circuitos auxiliares analógicos o digitales diseñados específicamente para esta misión. En el apartado 2.2 se discute sobre este asunto.

2.1.4 Inversor trifásico

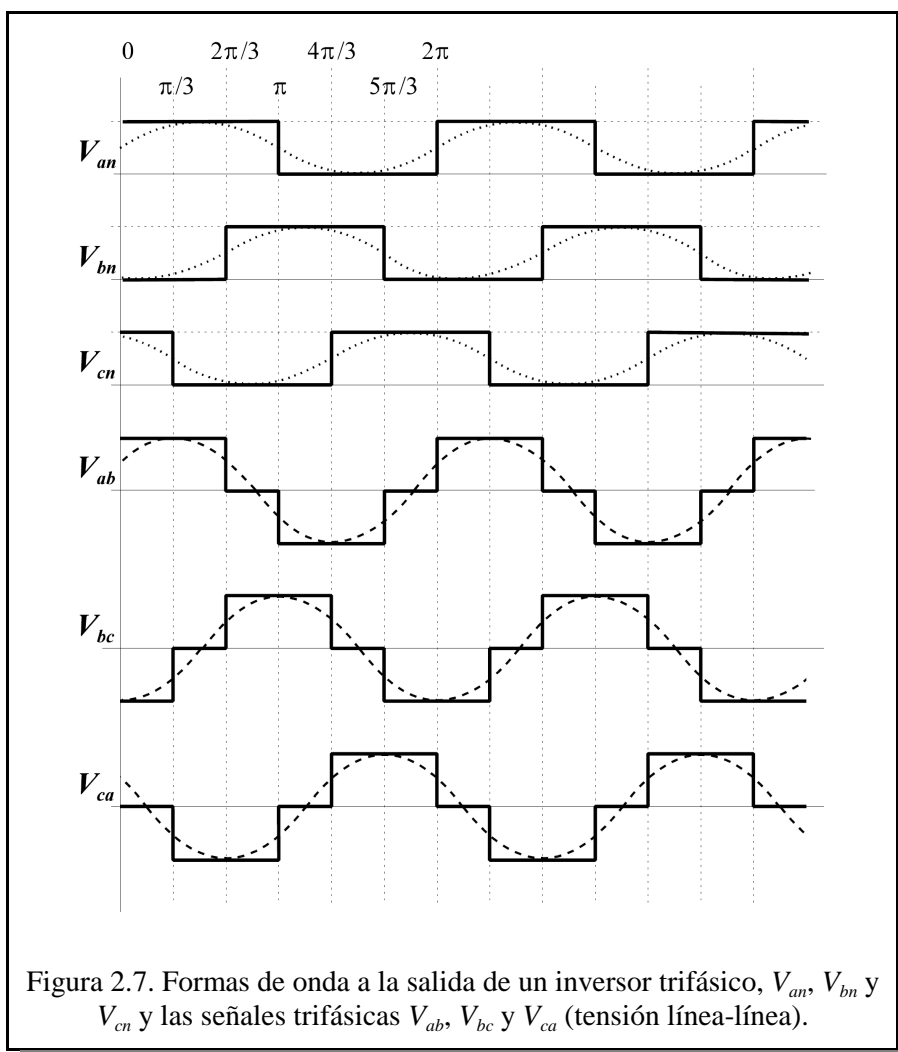
La topología básica de un inversor trifásico se parece a la de un inversor monofásico y es como se muestra en la figura 2.6. En ella se puede ver que se compone de tres ramas (A, B y C) con dos interruptores en cada una de ellas; T_{AH} , T_{BH} y T_{CH} en la parte alta de las ramas y T_{AL} , T_{BL} y T_{CL} en la parte baja de las ramas.

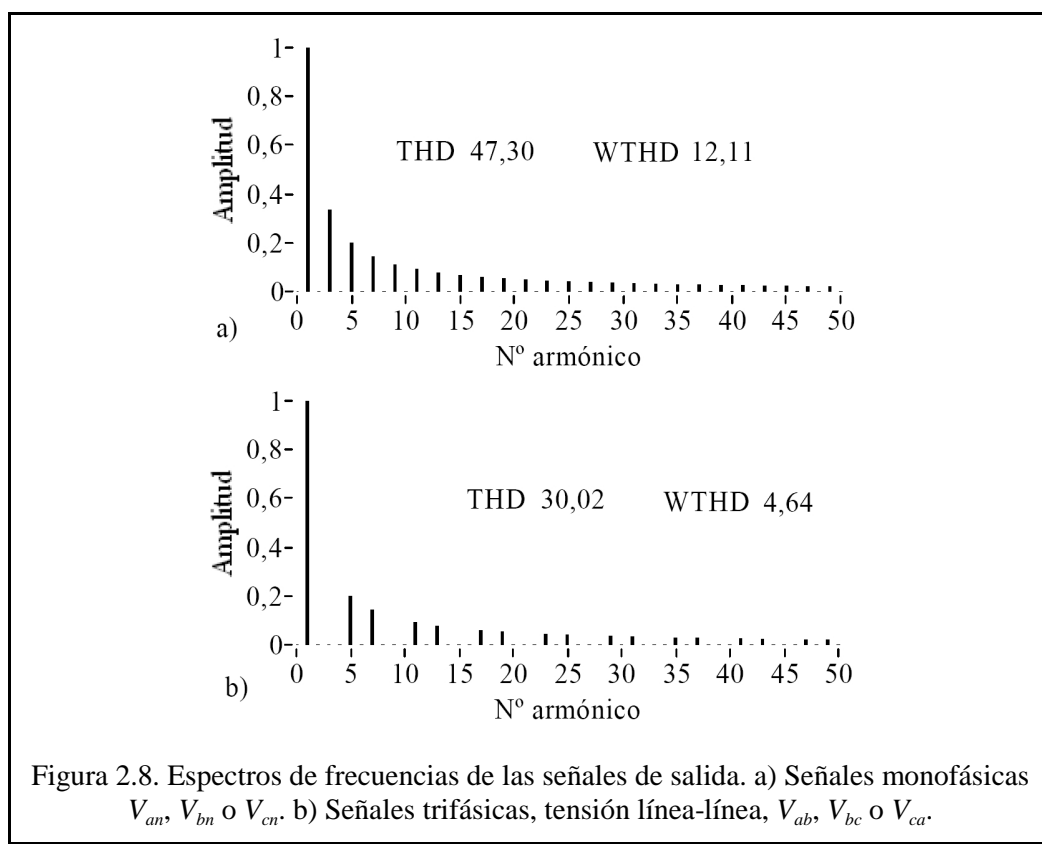


La salida trifásica se toma, en el punto medio de cada rama; a, b y c. Como puede verse en la figura 2.6, los problemas funcionales descritos en el caso del inversor monofásico en cuanto al orden de conmutación de los transistores de una misma rama son aplicables a este caso y a todos los que tengan una estructura similar.

La figura 2.7 muestra la forma de onda a la salida del inversor de la figura 2.6 cuando el control se hace con señales cuadradas (sin modulación) con ciclo de trabajo del 50%. La forma de onda de las tensiones línea a línea, resultantes de la composición de las señales de dos fases, V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} , presentan un aspecto más parecido a una sinusoidal que una señal cuadrada simple. Esto lo refrenda su espectro de frecuencias (figura 2.8 b).

La figura 2.8 permite comparar los espectros de frecuencias de las señales





monofásicas (2.8 a) y trifásicas (2.8 b, tensión línea-línea) de la figura 2.7. Observar que en esta figura las escalas verticales (amplitud) está normalizada a la unidad respecto a la frecuencia fundamental (o armónico de orden uno), es decir, no representan valores absolutos. En el espectro de la señal trifásica se puede ver el efecto de la composición de las señales monofásicas, en él no existen las componentes armónicas múltiplos de tres (armónicos de orden 3, 9, 15, etc.), con lo cual mejora notablemente la calidad de la señal. Esta mejora se refleja en los valores de los indicadores de calidad de la señal (ver el Anexo A1). Así, el valor de *THD*, pasa de ser 47,30 % en la señal monofásica a 30,03 % en la señal trifásica, lo que significa una mejora del 36,5 %. También el valor del indicador *WTHD* mejora pasando del valor 12,11 % para la señal monofásica al valor 4,64 % para la señal trifásica, lo que significa una reducción del 61,68 %. La composición de señales de dos niveles monofásicas desfasadas 120° da lugar a señales de tres niveles (figura 2.7) con la mejora de calidad descrita en el párrafo anterior.

2.2 Tiempos muertos

La necesidad de los tiempos muertos vista en el apartado 2.1.3, es común a todos los inversores en los que en la misma rama hay más de un conmutador. La imposibilidad de conocer exactamente los valores de tiempo de encendido y apagado de cada transistor, que dependen de los procesos de fabricación del dispositivo, de la temperatura de funcionamiento en cada instante y de otros parámetros, hace que los tiempos muertos se dimensionen con holgura suficiente según las características máximas de los dispositivos, lo que, a su vez, hace que existan intervalos de tiempo en los que no hay en conducción ninguno de los dos transistores de la misma rama. En el caso frecuente de que el inversor esté alimentando una carga inductiva, esta situación de circuito abierto brusco genera picos de tensión que son proporcionales a la energía electromagnética existente en la bobina.

La existencia necesaria de los tiempos muertos tiene efectos sobre la calidad de la señal de salida del inversor y otros parámetros, por lo que se han realizado muchos trabajos estudiando estos efectos [3 - 10].

2.3 Aplicaciones de los inversores

Así como la electricidad está presente en todas las actuaciones industriales, militares, aeroespaciales, médicas, del hogar, transportes de mercancías, docentes, transporte de energía eléctrica, mejora en la calidad de la energía eléctrica, etc., los inversores se usan allí donde es necesario hacer un control preciso del valor de la tensión alterna y/o de su frecuencia y su calidad. Algunas de las aplicaciones comunes hoy día se encuentran enmarcadas bajo los siguientes títulos:

- Conexión a red de sistemas generadores [11 - 15].
- Vehículos, tanto híbridos, HEV (Hybrid Electric Vehicle) como eléctricos, EV (Electric Vehicles) [12, 16 - 18].
- Instalaciones fotovoltaicas, tanto autónomas como conectadas a red [12, 13, 15, 19].

- Rectificadores síncronos de potencia [20 - 26].
- Sistema para la corrección del factor de potencia, PFC (Power Factor Correction) [27, 28].
- Filtros activos de potencia, APF (Active Power Filter) [25, 29 - 35].
- Control de motores [36 - 41]
- Otros.

2.4 Técnicas de modulación PWM

Como se ha visto en los apartados anteriores, los inversores son capaces de producir una señal alterna a partir de una alimentación de corriente continua. Para conseguir esto basta con disponer de las señales de control adecuadas para los transistores de las distintas ramas del inversor. Estas señales han de estar organizadas en la secuencia correcta para obtener el objetivo final. También se ha visto que por medio de unas señales simples de control se obtienen formas de onda con un espectro de frecuencias diferente según sean inversores monofásicos o trifásicos (ver la figura 2.8). En los casos expuestos, para obtener una buena calidad de la señal a la salida del inversor es necesario aumentar el número de niveles de la señal de salida, con lo que se complica la circuitería de la etapa de potencia y la correspondiente de control.

Por otro lado, en muchas aplicaciones no son válidas las formas de onda obtenidas utilizando señales de control simples, como las descritas en los apartados anteriores, ya que los armónicos que contienen las señales obtenidas son la causa de vibraciones, ruidos y sobrecalentamiento en los motores [42, 43] y en general dañan los equipos que las utilizan produciendo pérdidas adicionales [44 - 48]. Es por eso por lo que es necesario disponer de sistemas inversores cuyas salidas tengan la calidad necesaria en cada caso [49, 50], concretamente los inversores orientados a la inyección a red desde centros de generación alternativa de energía eléctrica, como centrales fotovoltaicas, eólicas u otras, y todos los relacionados con maniobras eléctricas en la red de suministro eléctrico. La calidad de la señal a la salida de un inversor se puede mejorar de diferentes formas:

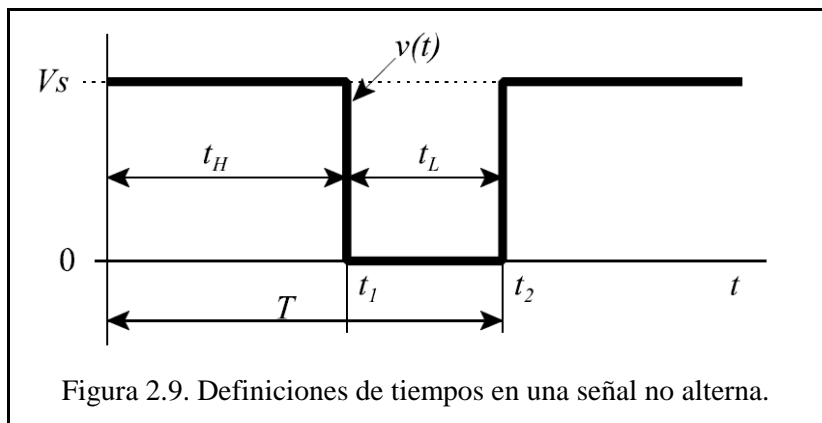
- a) Utilizando filtros a la salida del inversor que eliminan los armónicos no deseados [11, 21].
- b) Utilizando técnicas de modulación como PWM que aproximan la señal resultante a la sinusoidal que se pretende, como se describe más adelante.
- c) Por medio de inversores multinivel (señal escalonada).
- d) Utilizando inversores multinivel junto con modulación PWM.

La opción b) se utiliza muy frecuentemente en inversores de baja tensión pero casi siempre requieren filtros de salida (opción a) que eliminen parte de los armónicos. Las opciones c) y d) se utilizan principalmente para media y alta tensión, aunque últimamente también se aplican a inversores de baja tensión ya que, en algunos casos, minimizan y hasta eliminan los filtros de salida.

2.4.1 Modulación PWM

Las siglas PWM (Pulse Width Modulation) identifican una colección de técnicas orientadas a modificar la duración de los pulsos de una señal conmutada con el objetivo de obtener diferentes efectos como codificación de la información o regulación de potencia. Esto último es para lo que se utiliza en los inversores de potencia.

La figura 2.9 muestra una señal conmutada no alterna de periodo T , parte del cual la señal se encuentra al valor de tensión más alta, V_s . Este tiempo comprendido entre 0 y t_1 se denomina t_H . El resto del tiempo del periodo, entre t_1 y t_2 , la señal se



encuentra en el valor de tensión más bajo (0V en este caso). Este tiempo se denomina t_L .

Se define el ciclo de trabajo de una señal conmutada, D (duty cycle), como la relación del tiempo que la señal se encuentra en el nivel de tensión más alto respecto al periodo de la señal [2]. Es decir:

$$D = \frac{t_H}{T} \quad (2.1)$$

Teniendo en cuenta que:

$$T = t_H + t_L \quad (2.2)$$

se tiene:

$$t_L = T - t_H \quad (2.3)$$

Sustituyendo la ecuación (2.2) en la ecuación (2.1) se tiene:

$$D = \frac{t_H}{t_H + t_L} \quad (2.4)$$

De las ecuaciones (2.3) y (2.4) se obtiene:

$$\frac{t_L}{T} = \frac{T}{T} - \frac{t_H}{T} = 1 - D \quad (2.5)$$

Cuando la señal no es alterna, que es el caso que se muestra en la figura 2.9, el valor medio de la tensión en un periodo de la señal, V_{mc} , es:

$$\begin{aligned} V_{mc} &= \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{t_1} v(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \right] = \\ &= \frac{1}{T} [V_s \cdot t_1 + 0 \cdot (t_2 - t_1)] \end{aligned} \quad (2.6)$$

Como es $t_1 = t_H$, se tiene:

$$V_{mc} = V_s \frac{t_1}{T} = V_s \cdot D \quad (2.7)$$

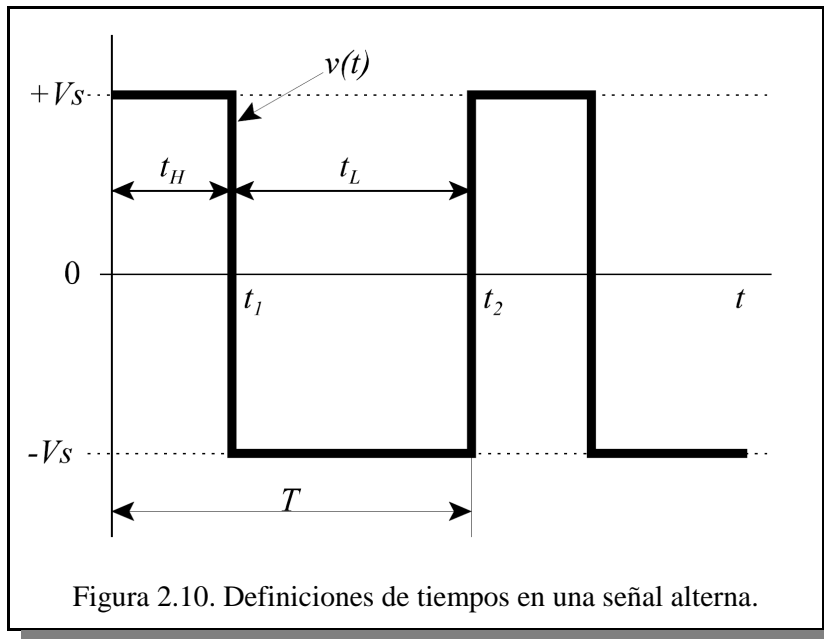
donde se ha tenido en cuenta la ecuación (2.1).

En el caso de una señal conmutada alterna, como la que se muestra en la figura 2.10, la definición de ciclo de trabajo es la misma pero ahora el valor de la tensión más baja es $-V_s$. En este caso, el valor medio de la tensión, V_{ma} , en un periodo de la señal es:

$$\begin{aligned} V_{ma} &= \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt = \frac{1}{T} \left[\int_0^{t_1} v(t) dt + \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt \right] \\ &= \frac{1}{T} [V_s(t_1 - 0) + (-V_s)(t_2 - t_1)] \end{aligned} \quad (2.8)$$

Es decir:

$$V_{ma} = V_s \left[\frac{t_1}{T} - \frac{t_2 - t_1}{T} \right] \quad (2.9)$$



Teniendo en cuenta que $t_1 = t_H$ y que $(t_2 - t_1) = t_L$, la ecuación (2.9) puede ser reescrita como sigue:

$$V_{ma} = V_s \left(\frac{t_H}{T} - \frac{t_L}{T} \right) = V_s [D - (1 - D)] \quad (2.10)$$

De donde:

$$V_{ma} = V_s (2D - 1) \quad (2.11)$$

La tabla 2.1 muestra los valores de la tensión media que se obtienen en función del ciclo de trabajo utilizando las ecuaciones (2.7) y (2.11). En ella puede verse que el valor de la tensión media puede ser modificado desde el valor mínimo (0 o $-V_s$) hasta el valor máximo ($+V_s$) controlando el ciclo de trabajo, es decir, ajustando la duración de los pulsos.

Las figuras 2.11 y 2.12 muestran varias señales conmutadas a modo de ejemplos ilustrativos. En la figura 2.11 b) c) y d), los valores de los niveles de las señales conmutadas son:

$$\text{Nivel alto (H)} = +V_s$$

$$\text{Nivel bajo (L)} = 0V$$

D (%)	V_{mc}	V_{ma}
0	0,00	$-V_s$
10	$0,10 V_s$	$-0,80 V_s$
20	$0,20 V_s$	$-0,60 V_s$
30	$0,30 V_s$	$-0,40 V_s$
40	$0,40 V_s$	$-0,20 V_s$
50	$0,50 V_s$	$0,00 V_s$
60	$0,60 V_s$	$0,20 V_s$
70	$0,70 V_s$	$0,40 V_s$
80	$0,80 V_s$	$0,60 V_s$
90	$0,90 V_s$	$0,80 V_s$
100	V_s	V_s

Tabla 2.1. Valores de la tensión media de una señal conmutada no alterna (V_{mc}) y de una señal conmutada alterna (V_{ma}) en función del ciclo de trabajo (D).

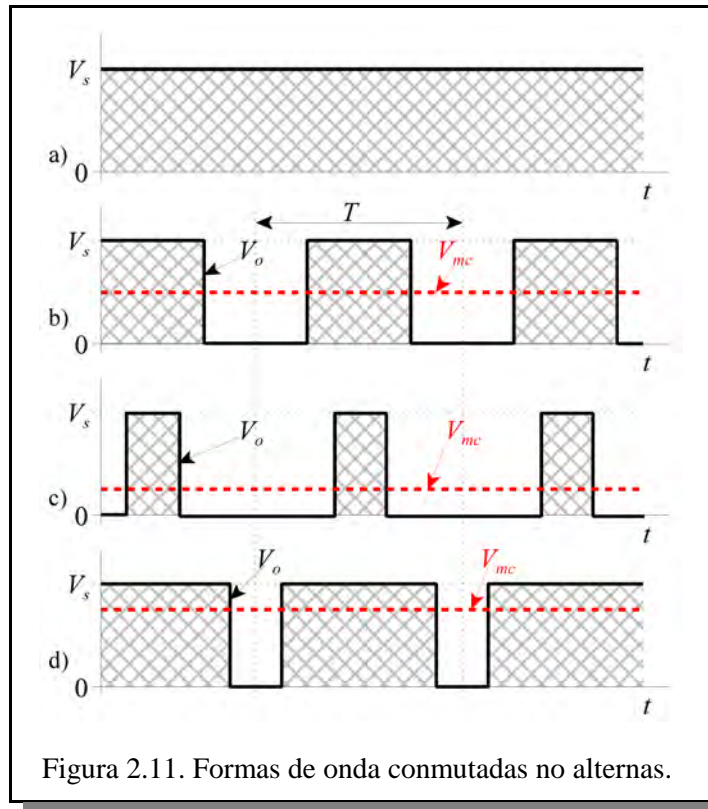


Figura 2.11. Formas de onda conmutadas no alternas.

En la figura 2.12 a), b) y c), los valores de los niveles de las señales conmutadas son:

$$\text{Nivel alto (H)} = +V_s$$

$$\text{Nivel bajo (L)} = -V_s$$

Partiendo de una alimentación de tensión continua V_s (figura 2.11 a), en la figura 2.11 b) se tiene una señal conmutada de periodo T con ciclo de trabajo 0,5. En este caso, el valor de la tensión media de la señal es $V_m = V_s/2$. En la figura 2.11 c), el ciclo de trabajo es 0,25, resultando ser $V_m = V_s/4$. En la figura 2.11 d), el valor de D es 0,75, por lo que $V_m = 3V_s/4$.

En el caso de una señal alterna, figura 2.12, cuando el ciclo de trabajo es 0,5, el valor medio de la tensión es 0V, como se puede comprobar en la figura 2.12 a). En la figura 2.12 b) se ha representado el caso en el que el ciclo de trabajo es 0,25. En este caso, la tensión media de la señal es $V_o = -V_s/2$. Por último, en la figura 2.12 c) se ha representado el caso en el que el ciclo de trabajo es 0,75. En esta situación, la

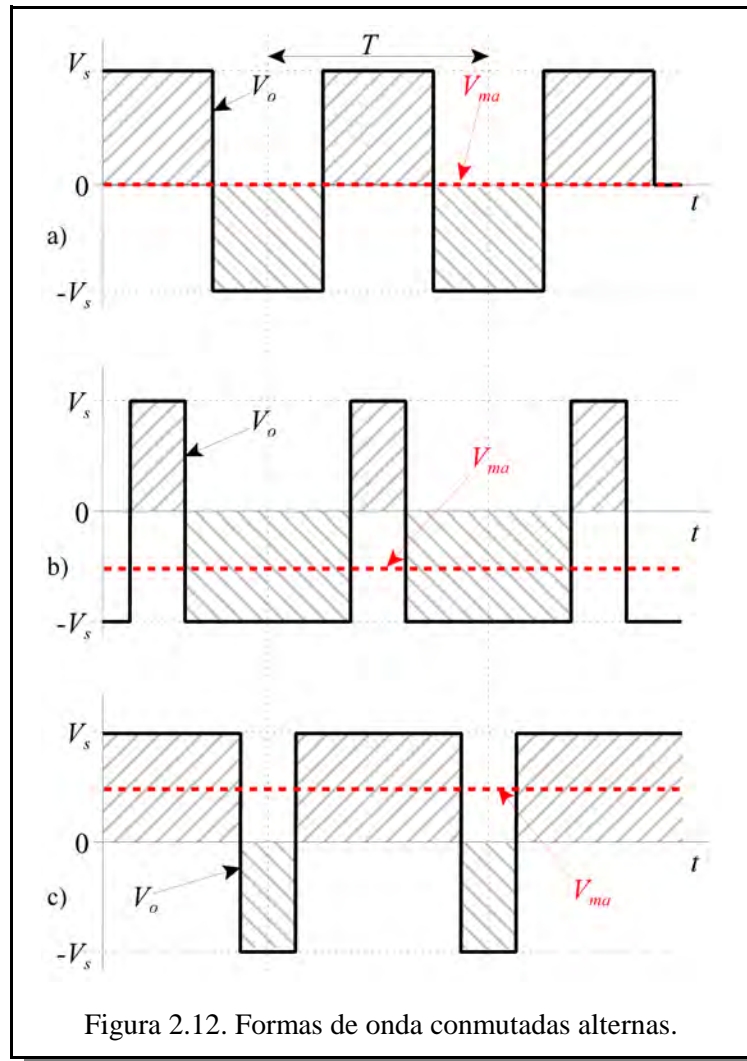


Figura 2.12. Formas de onda conmutadas alternas.

tensión media tiene el valor $V_o = +V_s/2$. Cualquier otro valor de la tensión media de la señal se logra modificando correspondientemente el ciclo de trabajo.

Dado que PWM permite modificar el valor de la amplitud media en un intervalo de tiempo, también se utiliza esta técnica para obtener cualquier forma de onda. Esta utilización es la que se aplica en el caso de inversores de potencia controlados por PWM.

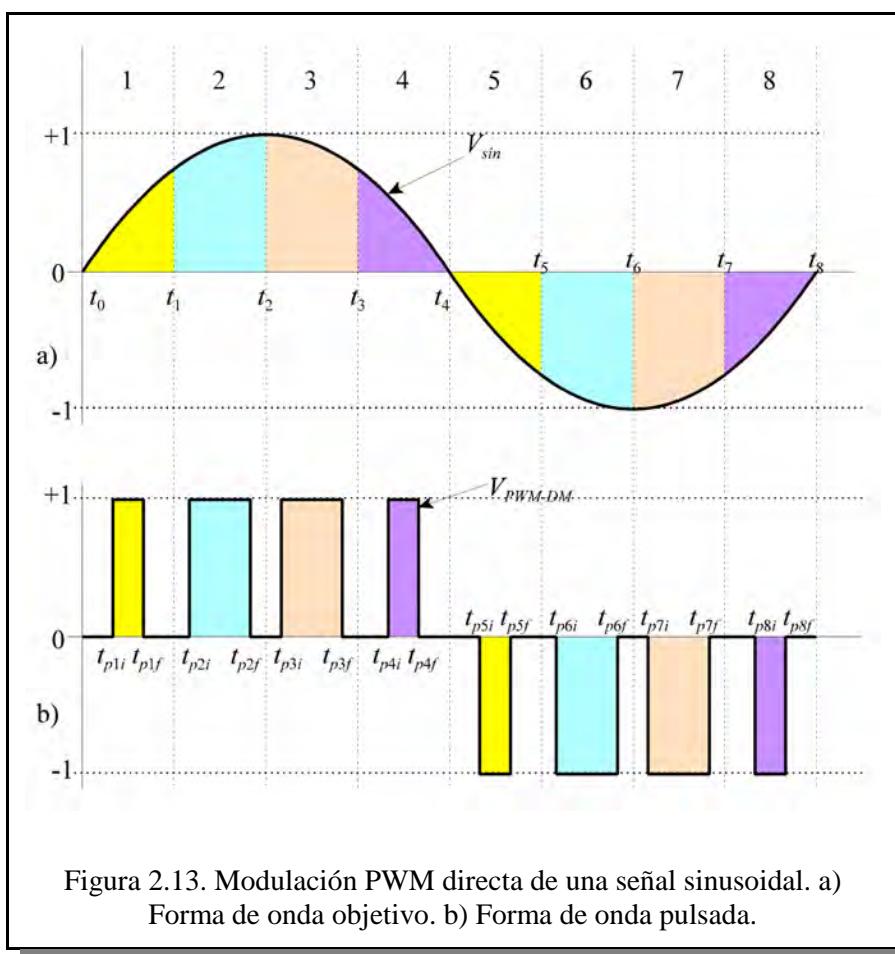
2.4.2 PWM por modulación directa

La técnica de modulación PWM que se utiliza en este trabajo se denomina “Modulación directa”, DM (Direct Modulation). D. Grahame Holmes y Thomas A. Lipo [51], describen este método (pág. 126) como sigue:

“El concepto es hacer conmutar el inversor para conseguir un intervalo de pulso activo por cada intervalo de la portadora que tenga exactamente el mismo valor medio tensión \times tiempo que la forma de onda original”.

Este es el mismo concepto que se utiliza en [52] para realizar la modulación PWM-DM de una señal sinusoidal con resultados muy interesantes.

La figura 2.13 muestra el ejemplo de una señal sinusoidal (señal objetivo) y la correspondiente señal modulada PWM-DM para el caso de un inversor monofásico.



En la figura 2.13 a) se ha representado la forma de onda de la señal objetivo de la modulación, una señal sinusoidal (V_{sin}), mientras que en b) se ha representado la señal modulada correspondiente (V_{PWM-DM}), ambas con amplitud normalizada a la unidad. Tanto la señal objetivo como la modulada están divididas, en este ejemplo, en ocho intervalos iguales, numerados de uno a ocho y coloreados para su fácil identificación.

A cada uno de los intervalos en la señal en a) le corresponde un pulso de la señal en b), cuyo valor del producto $V_{PWM-DM} \times t_{pulso}$ es numéricamente idéntico al valor del producto $V_{sin} \times t_{sen}$ en el mismo intervalo. Es decir:

$$\int_{t_n}^{t_{n+1}} V_{sin} dt = \int_{t_{pmi}}^{t_{pmf}} V_{PWM-DM} dt \quad (2.12)$$

para $n = 0, 1, 2, \dots, 8$ y $m = 1, 2, 3, \dots, 8$.

Dada la simetría de la señal objetivo, solamente hay dos valores absolutos de producto $V \times t$ diferentes, los de los intervalos 1 y 2. A partir de estos valores se puede construir un periodo completo de la señal modulada ya que si $V \times t(n)$ representa el producto $V \times t$ del intervalo número n , se tiene que:

$$V \times t (1) = V \times t (4)$$

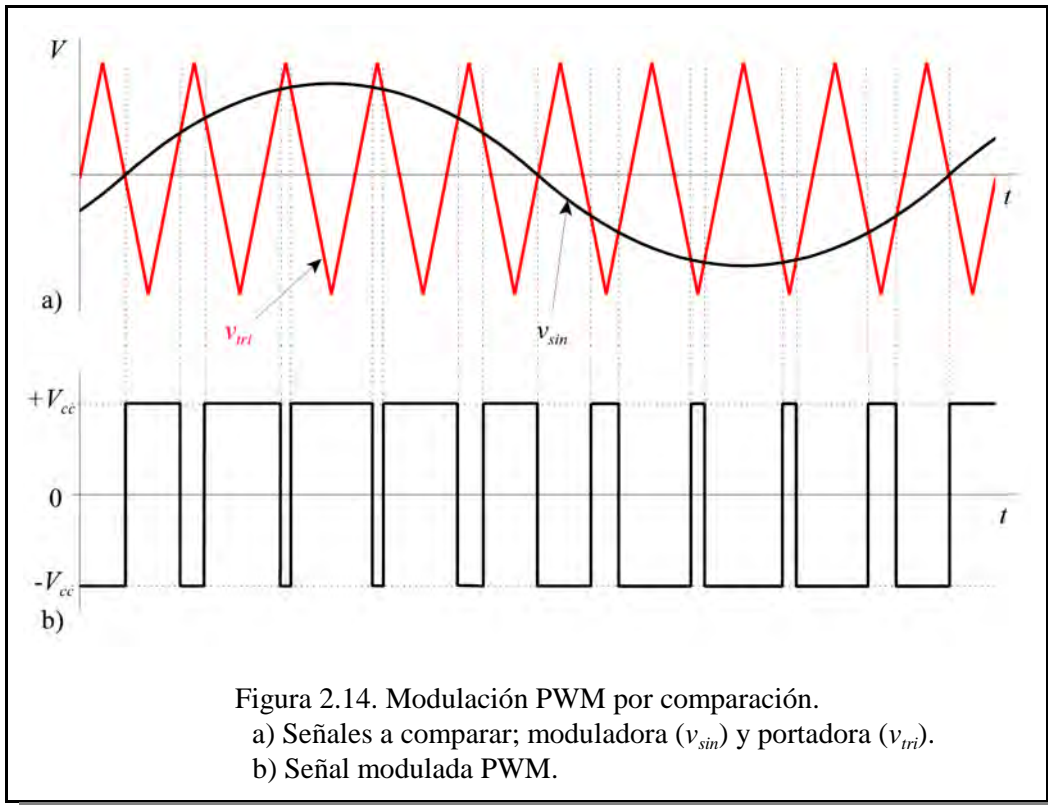
$$V \times t (2) = V \times t (3)$$

$$V \times t (5) = V \times t (8) = -V \times t (1) \text{ y}$$

$$V \times t (6) = V \times t (7) = -V \times t (2)$$

2.4.3 Otras formas de modulación PWM

A lo largo del tiempo se han desarrollado muchas técnicas de modulación que encajan dentro de PWM. Una de las más clásicas es la que obtiene la señal modulada a partir de la comparación de dos señales denominadas moduladora y portadora [1, 2], utilizando para ello dispositivos analógicos o digitales. La figura 2.14 muestra este método de modulación. En ella, se compara, en a), la señal objetivo (sinusoidal, v_{sin}) con una señal moduladora (triangular, v_{tri}), obteniendo de esta comparación la señal modulada, en b). Dependiendo de cual sea la forma de



onda de la señal moduladora y la portadora, las técnicas reciben diferentes nombres y con ellas se obtienen diferentes resultados.

La técnica TPWM-DM se distingue de las otras citadas en que la señal modulada se obtiene por cálculo algebraico y no por comparación entre señales, lo cual requiere de un elemento computacional (ordenador, microprocesador o microcontrolador), que no es necesario en las otras técnicas. En estas técnicas no hay señal portadora ni moduladora.

2.4.4 Clasificación de las técnicas PWM

En el apartado anterior se han descrito superficialmente dos métodos para obtener una señal PWM que represente a una señal sinusoidal. Estos no son los únicos métodos utilizados. En lo que sigue se cita una colección de métodos que

persiguen diferentes beneficios en cuanto a la calidad de la señal obtenida y el rendimiento del sistema inversor.

Las técnicas PWM que se utilizan para controlar los inversores de potencia se pueden clasificar de diferentes formas según sea el criterio seguido para ello.

Criterio 1. Por el método de obtener la señal PWM:

- Técnicas generadas:
 - Por circuitería [1, 2]. Se parte de dos generadores de señal, uno de ellos suministra una señal sinusoidal de la misma frecuencia que la modulada a obtener (señal moduladora). El otro, suministra una señal que se denomina portadora que es de frecuencia más alta y que puede tener forma triangular, en diente de sierra, etc. De la comparación de ambas se obtiene la señal PWM de control para los transistores del inversor.
 - Por programa. En este caso se parte de las ecuaciones de las señales moduladora y portadora citadas en el apartado anterior y se comparan computacionalmente para obtener las señales de control de los transistores del inversor.
- Técnicas calculadas:
 - Calculada propiamente, en donde las señales se sintetizan en el instante en que son necesarias, en directo (“on line”).
 - Precalculadas, en donde las secuencias de las señales de control se calculan en un sistema exterior al inversor y al modulador (normalmente en un ordenador externo) creando una serie de tablas que se descargan en el controlador del inversor.

Criterio 2. Por la forma de la señal moduladora:

- Sinusoidal, SPWM (Sinusoidal PWM) [1, 2, 51, 53], donde se utiliza una señal sinusoidal como moduladora.
- Sinusoidal con inyección de armónicos, HIPWM (Harmonic Injection PWM) [54 - 56], donde la señal moduladora es una composición de

una sinusoidal de la frecuencia fundamental y otras componentes armónicas específicas.

- Moduladora trapezoidal, TPWM (Trapezoidal PWM) [57 - 61], donde la señal moduladora tiene forma trapezoidal.

Criterio 3. Por la forma de la señal portadora:

- Portadora triangular o diente de sierra [1, 2, 51, 53 - 57, 62 - 64].
- Portadora sinusoidal [1, 2, 51].
- Sin portadora [52, 65].

Criterio 4. Por el método de modulación:

- SLPWM (Slope PWM), que utiliza una moduladora trapezoidal y modula únicamente los intervalos de subida y bajada [42, 60, 61].
- HIPWM-FMTC (HIPWM Frequency Modulation with Triangular Carrier), que modula una señal del tipo utilizada en HIPWM con una portadora triangular de frecuencia variable [55, 56].
- Modulación directa [51, 65], que es la técnica que se desarrolla en esta tesis en el Capítulo 3, se simula en el Capítulo 4 y se implementa en el Capítulo 5.

Criterio 5. Eliminación / reducción de armónicos:

- HEPWM (Harmonic Elimination PWM), eliminación de armónicos [66, 67].
- SHMPWM (Selective Harmonic Mitigation PWM), mitigación de armónicos [68].

Referencias

- [1] Ned Mohan, Tore M. Underland and William P. Robbins, "Power Electronics. Converters, Applications and Design". John Wiley and Sons, INC. 1995. ISBN: 0-471-58408-8.
- [2] Daniel W. Hart, "Electrónica de Potencia". Pearson Educación, 2001. ISBN: 84-205-3179-0.
- [3] Lv Chenguang Song Qiang, "Study on the Dead-time Effect in PWM Inverter Control of Electric Vehicle's Motor". Power Electronics Systems and Applications (PESA), 2011 4th International Conference on.
- [4] Seung-Gi Jeong and Min-Ho Park, "The Analysis and Compensation of Dead-Time Effects in PWM Inverters". IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 38, No. 2, April 1991.
- [5] M. Jones, D. Dujic, E. Levi and S. N. Vukosavic, "Dead-Time Effects in Voltage Source Inverter Fed Multi-Phase AC Motor Drives and Their Compensation". Industrial Electronics Society, 1998. IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE.
- [6] Y. Zhao, W. Qiao and L. Wu, "Dead-Time Effect Analysis and Compensation for a Sliding-Mode Position Observer-Based Sensorless IPMSM Control System". DOI 10.1109 / TIA 2014.2372094, IEEE Transactions on Industry Applications.
- [7] Zhendong Zhang and Longya Xu, "Dead-Time Compensation of Inverters Considering Snubber and Parasitic Capacitance". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 6, June 2014.
- [8] Liu Mingji, Cai Zhongqin, Wang Jing and Wang Xiangpeng, "Effect of Inverter's Dead-Time on the Dynamic Characteristics of Permanent Magnet Synchronous Motor Systems". Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on.
- [9] Zhiyu Shen, Marko Jaksic, Sara Ahmed, Paolo Mattavelli and Dushan Boroyevich, "Parametric Study of Dead Time Effect on Three Phase AC Output Impedance of Voltage Source Inverter (VSI)". Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on.
- [10] Dong-Hee Lee, Hong-min Kim and Jin-Woo Ahn, "A Direct Compensation Scheme of the Dead-Time Effect in PWM-VSI". IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 2012.
- [11] Aleksandr Reznik, Marcelo Godoy Simões, Ahmed Al-Durra and S. M. Mueen, "LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid-Interconnected Systems". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 50, No. 2, March/April 2014.
- [12] Nina Naghizadeh, and Sheldon S, "A Comprehensive Review of Power Electronic Converter Topologies to Integrate Photovoltaics (PV), AC Grid, and Electric Vehicles". Williamson. Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2013 IEEE.
- [13] Naik Yogesh R. and Thorat A. R, "A Review on Photovoltaic Module Based Grid Connected Power Inverter". 2013 International Conference on Power, Energy and Control (ICPEC).
- [14] Ahmed Abdalrahman and Abdalhalim Zekry, "Control of The Grid-connected inverter using dsPIC Microcontroller". Electronics, Communications and Computers (JEC-ECC), 2013 Japan-Egypt International Conference on.

- [15] Hua F. Xiao, Xi P. Liu, and Ke Lan, “Zero-Voltage-Transition Full-Bridge Topologies for Transformerless Photovoltaic Grid-Connected Inverter”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 61, No. 10, October 2014.
- [16] Haizhong Ye, Yinye Yang, and Ali Emadi, “Traction Inverters in Hybrid Electric Vehicles”. *Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2012 IEEE.
- [17] Udupi R. Prasanna, Pan Xuewei, Akshay Kumar Rathore and Kaushik Rajashekara, “Propulsion System Architecture and Power Conditioning Topologies for Fuel Cell Vehicles”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 51, No. 1, January/February 2015.
- [18] Evgenije M. Adžić, Milan S. Adžić, Vladimir A. Katić, Darko P. Marčetić and Nikola L. Čelanović, “Development of High-Reliability EV and HEV IM Propulsion Drive With Ultra-Low Latency HIL Environment”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 9, No. 2, May 2013.
- [19] S. Z. Mohammad Noor, A. M. Omar, N. N. Mahzan, I. R. Ibrahim, “A Review of Single-Phase Single Stage Inverter Topologies for Photovoltaic System”. *2013 IEEE 4th Control and System Graduate Research Colloquium*, 19 - 20 Aug. 2013, Shah Alam, Malaysia.
- [20] Zhonghui Bing, Xiong Du, and Jian Sun, “Control of Three-Phase PWM Rectifiers Using A Single DC Current Sensor”. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 26, No. 6, June 2011.
- [21] Marco Liserre, Frede Blaabjerg and Steffan Hansen, “Design and Control of an LCL-Filter-Based Three-Phase Active Rectifier”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 41, No. 5, September/October 2005.
- [22] Jose A. Restrepo, Jose M. Aller, Alexander Bueno, Julio C. Viola, Alberto Berzoy, Ronald Harley and Thomas G. Habetler, “Direct Power Control of a Dual Converter Operating as a Synchronous Rectifier”. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 26, No. 5, May 2011.
- [23] Zhonggang Yin, Jing Liu, and Yanru Zhong, “Study and Control of Three-Phase PWM Rectifier Based on Dual Single-Input Single-Output Model”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 9, No. 2, May 2013.
- [24] Johan I. Guzman, Pedro E. Melín, José R. Espinoza, Luis A. Morán, Carlos R. Baier, Javier A. Muñoz and Gonzalo A. Guiñez, “Digital Implementation of Selective Harmonic Elimination Techniques in Modular Current Source Rectifiers”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 9, No. 2, May 2013.
- [25] Nilanjan Mukherjee and Dipankar De, “Analysis and improvement of performance in LCL filter-based PWM rectifier/inverter application using hybrid damping approach”. *IET Power Electron.*, 2013, Vol. 6, Iss. 2, pp. 309–325.
- [26] Giampaolo Buticchi, Emilio Lorenzani, Fabio Immovilli and Claudio Bianchini, “Active Rectifier With Integrated System Control for Microwind Power Systems”. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, Vol. 6, No. 1, January 2015.
- [27] Bilal Akin, Manish Bhardwaj and Shamim Choudhury, “An Integrated Implementation of Two-Phase Interleaved PFC and Dual Motor Drive Using Single MCU With CLA”. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, Vol. 9, No. 4, November 2013.
- [28] H. Rodriguez-Cortés, R. Alvarez-Salas, M. Flota-Bañuelos and M.F. Escalante, “Power factor compensation and DC-link voltage regulation for a single-phase PWM multilevel rectifier”. *IET Power Electron.*, 2012, Vol. 5, Iss. 8, pp. 1456–1462.

- [29] Tzung-Lin Lee, Yen-Ching Wang, Jian-Cheng Li and Josep M. Guerrero, “Hybrid Active Filter With Variable Conductance for Harmonic Resonance Suppression in Industrial Power Systems”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 2, February 2015.
- [30] Parag Kanjiya, Vinod Khadkikar and Hatem H. Zeineldin, “Optimal Control of Shunt Active Power Filter to Meet IEEE Std. 519 Current Harmonic Constraints Under Non ideal Supply Condition”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 2, February 2015.
- [31] Samet Biricik, Soydan Redif, Özgür C. Özerdem, Shafiuzzaman K. Khadem, Malabika Basu, “Real-time control of shunt active power filter under distorted grid voltage and unbalanced load condition using self-tuning filter”. *IET Power Electron.*, 2014, Vol. 7, Iss. 7, pp. 1895–1905.
- [32] G.-Y. Jeong, T.-J. Park and B.-H. Kwon, “Line-voltage-sensorless active power filter for reactive power compensation”. *Electric Power Applications*, IEE Proceedings-Volume:147, Iss. 5.
- [33] Ricardo Lúcio de Araujo Ribeiro, Thiago de Oliveira Alves Rocha, Raphael Maciel de Sousa, Euzeli Cipriano dos Santos, Jr. and Antonio Marcus Nogueira Lima, “A Robust DC-Link Voltage Control Strategy to Enhance the Performance of Shunt Active Power Filters Without Harmonic Detection Schemes”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, No. 2, February 2015.
- [34] Shahriyar Kaboli, Javad Mahdavi and Ali Agah, “Application of Random PWM Technique for Reducing the Conducted Electromagnetic Emissions in Active Filters”. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 54, No. 4, August 2007.
- [35] Pedro Fabian Cárdenas, Fabian Jimenez and César Augusto Peña Cortes, “Shunt Active Power Filter: Analysis and Desing”. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada* ISSN: 1692-7257 - Volumen 2 - Número 14 - Año 2009.
- [36] R. Sudharshan Kaarthik, P. Roshan Kumar, K. Gopakumar, Jose I. Leon, Leopoldo G. Franquelo, “A Hybrid Multilevel Inverter scheme for Induction Motor Drives and Grid-Tied Applications using a Single DC-link”. *Industrial Technology (ICIT)*, 2015 IEEE International Conference on.
- [37] Kamallesh Hatua and V. T. Ranganathan, “A Novel VSI- and CSI-Fed Active–Reactive Induction Motor Drive with Sinusoidal Voltages and Currents”. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 26, No. 12, December 2011.
- [38] Zheyu Zhang, Fred Wang, , Leon M. Tolbert, Benjamin J. Blalock and Daniel J. Costinett, “Evaluation of Switching Performance of SiC Devices in PWM Inverter-Fed Induction Motor Drives”. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, No. 10, October 2015.
- [39] Farnesi, S.; Fazio, P.; Marchesoni, M, “A New Fault Tolerant NPC Converter System for High Power Induction Motor Drives”. *Diagnostics for Electric Machines Power Electronics & Drives (SDEMPED)*, 2011 IEEE International Symposium on.
- [40] Chathura Mudannayake, John Ryan and Akihiko Kuroiwa, Tomoharu Kuninaga. Mudannayake, C.; Ryan, J.; Kuroiwa, A.; Kuninaga, T., “Upgrade of 4.9MW High Speed Helper Motor Drive System of LNG Hydrocarbon Gas Compressor Train; A Comparison of Voltage Source Inverter and Load Commutated Inverter Topologies”. *ECCE Asia Downunder (ECCE Asia)*, 2013 IEEE.
- [41] Sangshin Kwak, Hamid A. Toliyat. *Energy Conversion*, “A Hybrid Converter System for High Performance Large Induction Motor Drives”. *IEEE Transactions on*, Year: 2005, Volume: 20, Issue: 3, Pages: 504 - 511.

- [42] A. Ruiz-González, F. Vargas-Merino, J. R. Heredia-Larrubia, M. J. Meco-Gutiérrez, and F. Pérez-Hidalgo, "Application of Slope PWM Strategies to Reduce Acoustic Noise Radiated by Inverter-Fed Induction Motors". IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 60, No. 7, July 2013.
- [43] J. J. Yang, M Zuhdi, H.T. Nguyen and S. S. Choi, "Evaluation and Control of Heating Effect due to Harmonics in Motor Loads". IPEC, 2010 Conference Proceedings.
- [44] D. M. Said and K. M. Nor, "Effects of Harmonics on Distribution Transformers". Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian Universities.
- [45] Aurora Gil de Castro, Antonio Moreno Muñoz, Víctor Pallarés López, Agustín Agüera Pérez, "Harmonic Effect in Street Lighting". Compatibility and Power Electronics (CPE), 2011 7th International Conference - Workshop.
- [46] K. V. Suslov, V. S. Stepanov and N. N. Solonina, "Smart Grid: Effect of High Harmonics on Electricity Consumers in Distribution Networks". Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 2013 International Symposium on.
- [47] Taywin Nilsakorn, Kaweeoj W oranetsuttikul, Kittapas Pinsuntia, Nattawat Jumpasri and Werachet Khan-ngern, "Harmonic Effect on BLDC Motor Temperature Caused by Driving System". Electrical Engineering Congress (IEECON), 2014 International.
- [48] Xiaofei Du, Chu Sun, Longsheng Guo and Yuanjun Zhou, "Saturation Harmonic Effect of Induction Motor on Aircraft Power Quality". Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2014 IEEE 9th Conference on.
- [49] UNE-EN 50160, "Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución".
- [50] International Electrotechnical Commission, "IEC 61000-2-3. Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current = 16 A per phase)".
- [51] D. Grahame Holmes and Thomas A. Lipo, "Pulse Width Modulation for Power Converters. Principles and Practice". IEEE Press. Wiley Interscience 2003. ISBN:0-471-20814-0.
- [52] Yoone Ho Kim and Mehrdad Ehsani, "An Algebraic Algorithm for Microcomputer-Based (Direct) Inverter Pulse width Modulation". IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-23, No. 4, July/August 1987.
- [53] Wan-Rone Liou, Harreez M. Villaruzza, Mei-Ling Yeh and Patrick Roblin, "A Digitally Controlled Low-EMI SPWM Generation Method for Inverter Applications". IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 10, No. 1, February 2014.
- [54] Mario Meco-Gutierrez, Juan-Ramon Heredia-Larrubia, Francisco Perez-Hidalgo, Antonio Ruiz-Gonzalez and Francisco Vargas-Merino, "Pulse width modulation technique parameter selection with harmonic injection and frequency modulated triangular carrier". IET Power Electron., 2013, Vol. 6, Iss.5, pp. 954–962.
- [55] M. J. Meco-Gutierrez, F. Perez- Hidalgo, F. Vargas-Merino and J. R. Heredia-Larrubia, "Pulse width modulation technique with harmonic injection and frequency modulated carrier: formulation and application to an induction motor". IET Electr. Power Appl., 2007, 1, (5), pp. 714–726.
- [56] Wen-Inne Tsai and York-Yih Sun, "Design and Implementation of Three Phase HIPWM Inverters with Instantaneous and Average Feedback". Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1993. Proceedings of the IECON '93, International Conference on.

- [57] Anshul Agarwal and Vineeta Agarwal, “FPGA Realization of Trapezoidal PWM for Generalized Frequency Converter”. IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 8, No. 3, August 2012.
- [58] Katsunori Taniguchi, and Hisaichi Irie, “Trapezoidal Modulating Signal for Three-Phase PWM Inverter”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. Ie-33, No. 2, May 1986
- [59] Francisco Vargas-Merino, Mario J. Meco-Gutiérrez, Juan R. Heredia-Larrubia, and Antonio Ruiz-Gonzalez, “Low Switching PWM Strategy Using a Carrier Wave Regulated by the Slope of a Trapezoidal Modulator Wave”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 6, June 2009.
- [60] F. Vargas, M. J. Meco, J. R. Heredia and A. Ruiz, “Highly efficient PWM strategy over FPGA”. Electronics Letters 20th November 2008 Vol. 44 No. 24.
- [61] F. Vargas-Merino, M. J. Meco-Gutierrez, J. R. Heredia-Larrubia, A. Ruiz-Gonzalez, “Slope modulation strategy for generated PWM”. Industrial Electronics, 2008. ISIE 2008 IEEE. International Symposium on.
- [62] Gabriel J. Capella, Josep Pou, Salvador Ceballos, Georgios Konstantinou, Jordi Zaragoza, and Vassilios G. Agelidis, “Enhanced Phase-Shifted PWM Carrier Disposition for Interleaved Voltage-Source Inverters”. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 30, No. 3, March 2015.
- [63] Jin Huang and Rui Xiong, “Study on Modulating Carrier Frequency Twice in SPWM Single-Phase Inverter”. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 29, No. 7, July 2014.
- [64] Zhenyu Yu Arefeen Mohammed Issa Panahi, “A Review of Three PWM Techniques”. Proceedings of the American Control Conference. Albuquerque, New Mexico June 1997.
- [65] P. J. Sotorrio-Ruiz, F. J. Sanchez-Pacheco, F. Perez-Hidalgo and J. R Heredia-Larrubia, “Trapezoidal PWM with Direct Modulation Technique (TPWM-DM) Using a Low Cost Microcontroller with High Signal Quality for Power Converters”. International Review of Electrical Engineering (IREE), Vol. 8, N. 6. November - December 2013.
- [66] S. Chen, Y. M. Lai, S. C. Tan and C. K. Tse, “Analysis and design of repetitive controller for harmonic elimination in PWM voltage source inverter systems”. IET Power Electron., 2008, Vol. 1, No. 4, pp. 497–506.
- [67] M. Balasubramonian and V. Rajamani, “Design and Real-Time Implementation of SHEPWM in Single-Phase Inverter Using Generalized Hopfield Neural Network”. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 61, No. 11, November 2014.
- [68] Javier Napoles, Jose I. Leon, Ramon Portillo, Leopoldo G. Franquelo and Miguel A. Aguirre, “Selective Harmonic Mitigation Technique for High-Power Converters”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 57, No. 7, July 2010.

Capítulo 3

La técnica TPWM-DM

Índice

Capítulo 3. La técnica TPWM-DM	3-1
3.1 Introducción	3-1
3.2 Modulación directa	3-1
3.3 La señal trapezoidal	3-2
3.3.1 Límites de la forma de onda	3-3
3.3.2 Espectro de frecuencias de la señal trapezoidal	3-4
3.3.3 Amplitud de la frecuencia fundamental	3-6
3.3.4 Simetrías en la señal trapezoidal	3-8
3.3.4.1 Efectos de la falta de simetría	3-9
3.3.5 Simetría en la señal modulada	3-13
3.4 Modulación de la señal trapezoidal	3-14
3.4.1 Metodología	3-14
3.4.2 Sobre los pulsos	3-16
3.4.3 Modulación de la señal en el caso de alimentación simple	3-17
3.4.3.1 Modulación de la señal durante el tiempo de subida	3-19
3.4.3.2 Modulación de la señal durante el tiempo de bajada	3-25
3.4.4 Modulación de la señal en el caso de alimentación doble	3-35
3.5 Construcción de la señal modulada	3-39

3.5.1 El vector-semilla	3-46
3.6 Control de la frecuencia	3-47
3.7 Control de la amplitud	3-50
3.7.1 Control de la amplitud por cambio del tiempo de subida	3-50
3.7.2 Control de la amplitud por modulación de t_H y t_L	3-50
Referencias	3-51

Índice de figuras

Figura 3.1. Forma de onda de una señal trapezoidal	3-2
Figura 3.2. Forma de onda de una señal trapezoidal cuando $t_r = t_f = 0$	3-4
Figura 3.3. Forma de onda de una señal trapezoidal cuando $t_r = t_f = T/2$	3-4
Figura 3.4. Espectros de frecuencias de tres formas de onda monofásicas.	3-5
Figura 3.5. Espectros de frecuencias de tres formas de onda trifásicas (línea - línea).	3-6
Figura 3.6. Amplitud de la frecuencia fundamental de la señal trapezoidal en función de t_r y t_f	3-7
Figura 3.7. Simetría impar de una señal trapezoidal.	3-9
Figura 3.8. Simetría par de la señal a modular.	3-9
Figura 3.9. Señal trapezoidal simétrica y su espectro de frecuencias.	3-10
Figura 3.10. Señal trapezoidal asimétrica en t_r y t_f y su espectro de frecuencias.	3-11
Figura 3.11. Señal trapezoidal asimétrica en t_H y t_L y su espectro de frecuencias.	3-13
Figura 3.12. Esquema de inversor trifásico con alimentación simple.	3-18
Figura 3.13. Formas de onda en un inversor con alimentación simple.	3-18
Figura 3.14. División de la señal trapezoidal durante el tiempo de subida en N intervalos iguales.	3-19
Figura 3.15. Detalle de la señal trapezoidal, a), y la señal modulada, b), durante un intervalo del tiempo de subida.	3-20
Figura 3.16. Forma de onda de la señal modulada durante el tiempo de subida para $t_r = 4.000 \mu\text{s}$, $N=5$ y $V_o/V_i = 1$	3-23

Figura 3.17. División de la señal trapezoidal durante el tiempo de bajada en N intervalos iguales. 3-26

Figura 3.18. Detalle de la señal trapezoidal, a), y la señal modulada, b), durante un intervalo del tiempo de bajada. 3-27

Figura 3.19. Forma de onda durante el tiempo de bajada para $t_f = 4.000 \mu s$, $N = 5$ y $V_o/V_i = 1$ 3-31

Figura 3.20. Formas de onda de la señal modulada TPWM-DM con alimentación simple para $N = 5$, $t_r = t_f = 2.000 \mu s$ y $V_o/V_i = 1$ 3-33

Figura 3.21. Formas de onda de la señal modulada TPWM-DM con alimentación simple para $N = 5$, $t_r = t_f = 6.000 \mu s$ y $V_o/V_i = 1$ 3-34

Figura 3.22. Esquema de inversor trifásico con alimentación doble. 3-35

Figura 3.23. Obtención de la señal TPWM-DM. a) Alimentación en continua del inversor. b) Señal objetivo. c) Señal modulada. 3-35

Figura 3.24. Formas de onda de la señal modulada TPWM-DM con alimentación doble para $N = 5$, $t_r = t_f = 2.000 \mu s$ y $V_o/V_i = 1$ 3-36

Figura 3.25. Formas de onda de la señal modulada TPWM-DM con alimentación doble para $N = 5$, $t_r = t_f = 6.000 \mu s$ y $V_o/V_i = 1$ 3-38

Índice de tablas

Tabla 3.1. Valores máximos de la amplitud de la frecuencia fundamental en tres formas de onda.	3-7
Tabla 3.2. Amplitud de las componentes armónicas de orden par en la forma de onda monofásica de la figura 3.10.	3-11
Tabla 3.3. Amplitud de las componentes armónicas de orden par en la forma de onda trifásica de la figura 3.10.	3-12
Tabla 3.4. Amplitud de las componentes armónicas de orden par en la forma de onda monofásica de la figura 3.11.	3-12
Tabla 3.5. Amplitud de las componentes armónicas de orden par en la forma de onda trifásica de la figura 3.11.	3-12
Tabla 3.6. Valores de tiempos durante t_r para $N = 5$, $V_o/V_i = 1$ y varios valores de t_r	3-23
Tabla 3.7. Valores de tiempos durante t_r para $N = 6$, $V_o/V_i = 1$ y varios valores de t_r	3-25
Tabla 3.8. Valores de tiempos durante t_f para $N = 5$, $V_o/V_i = 1$ y varios valores de t_f	3-30
Tabla 3.9. Valores de tiempos durante t_f para $N = 6$, $V_o/V_i = 1$ y varios valores de t_f	3-32
Tabla 3.10. Valores de tiempo de cada uno de los niveles que forman cada intervalo de modulación de una señal TPWM-DM para $N = 5$, $f = 50$ Hz y varios valores de $t_r = t_f$	3-40
Tabla 3.11. Vectores HL $N = 5$, $f = 50$ Hz y varios valores de t_r y t_f , desde $1.000 \mu\text{s}$ hasta $10.000 \mu\text{s}$	3-41
Tabla 3.12. Valores finales de los vectores HL para una señal TPWM-DM con $N = 5$, $f = 50$ Hz y varios valores de t_r y t_f , desde $1.000 \mu\text{s}$ hasta $10.000 \mu\text{s}$	3-42

Tabla 3.13. Valores de tiempo de cada uno de los niveles que forman cada intervalo de modulación de una señal TPWM-DM para $N = 6$, $f = 50$ Hz y varios valores de $t_r = t_f$ 3-43

Tabla 3.14. Tabla de vectores HL para $N = 6$, $f = 50$ Hz y valores de t_r y t_f , desde $1.000 \mu\text{s}$ a $10.000 \mu\text{s}$ 3-44

Tabla 3.15. Valores finales de los vectores HL para una señal modulada TPWM-DM de 50 Hz, $N = 6$ y $t_r = 1.000 \mu\text{s}$ a $t_r = 10.000 \mu\text{s}$ 3-45

Tabla 3.16. Valores máximos de la frecuencia de la señal TPWM-DM en función de t_r y t_f 3-48

Tabla 3.17. Error en frecuencia debido al redondeo de los tiempos en caso peor. 3-49

Capítulo 3. La técnica TPWM-DM

La técnica de modulación que se desarrolla y experimenta en este trabajo se ha denominado TPWM-DM porque se basa en modular una señal trapezoidal (T), es una técnica de modulación por modificación del ancho de los pulsos (PWM) y la señal modulada se obtiene utilizando el método de modulación directa (DM) [1] [2]. Esta es una técnica que puede ser clasificada como precalculada o como generada, según sea su implementación.

3.1 Introducción

Las mejoras introducidas por la técnica HIPWM [3, 4] en cuanto a la amplitud del armónico fundamental y los resultados obtenidos por medio de la técnica SLPWM [5], junto con el análisis del espectro de frecuencias de la señal trapezoidal, llevaron a la idea de realizar la modulación de una señal trapezoidal en lugar de una señal sinusoidal, con las ventajas que ello acarrea en cuanto al proceso de modulación y las mejoras de otros parámetros de la señal modulada. Como se verá más adelante, esta técnica de modulación es muy fácilmente implementable por medio de microcontroladores con bajas prestaciones computacionales debido a que las expresiones que rigen la modulación son totalmente lineales. Además, el cálculo de los tiempos de conmutación de la señal modulada se puede realizar a partir de un vector-semilla de muy pocos elementos.

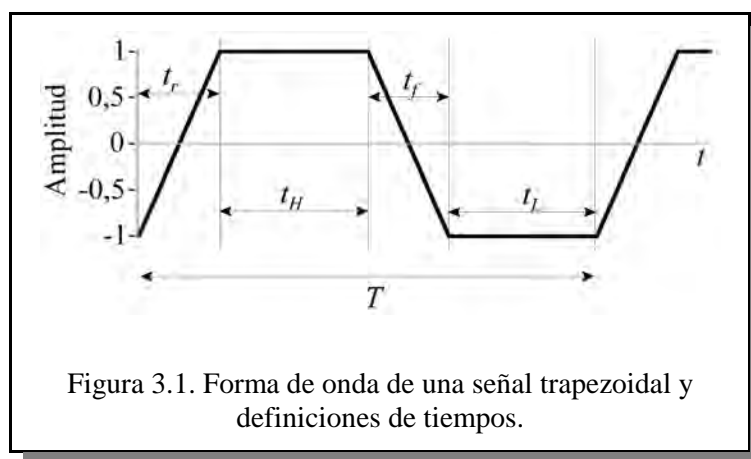
3.2 Modulación directa

La técnica de modulación que se desarrolla en este trabajo ya ha sido introducida en el apartado 2.4.2 de una forma genérica. En los apartados que siguen

se aplican los mismos principios citados antes hasta obtener la duración de cada uno de los pulsos de la señal modulada. En este trabajo se modula una señal trapezoidal en lugar de una señal sinusoidal porque presenta diversas ventajas que se discuten más adelante.

3.3 La señal trapezoidal

Una señal trapezoidal alterna ideal presenta dos niveles de tensión continua de la misma amplitud y distinta polaridad, $+V$, la tensión más alta (positiva), y $-V$, la más baja (negativa). El tránsito entre estos dos niveles de tensión es de variación constante en el tiempo, lo que se representa gráficamente por medio de una línea recta. La figura 3.1 muestra la forma de onda de esta señal. Se trata de una señal trapezoidal alterna de frecuencia f (periodo $T = 1/f$) y amplitud normalizada a la unidad. En esta figura se han identificado las distintas partes que compone una señal trapezoidal y se han nombrado como sigue:



- T Periodo de la señal. El valor usual en electricidad industrial es $T = 20$ ms, correspondiente a la frecuencia de 50 Hz. En los países con frecuencia de red de 60 Hz, T tiene el valor 16,66 ms.
- t_H Tiempo en estado alto (high time). Es el tiempo durante el cual la señal se mantiene en el valor de tensión más alto de su amplitud, $+V$.

- t_L Tiempo en estado bajo (low time). Es el tiempo durante el cual la señal se mantiene en el valor de tensión más bajo de su amplitud, $-V$.
- t_r Tiempo de subida (rise time). Es el tiempo necesario para que la amplitud de la señal cambie linealmente desde el valor de tensión más bajo ($-V$) hasta el más alto ($+V$).
- t_f Tiempo de bajada (fall time). Es el tiempo necesario para que la amplitud de la señal cambie linealmente desde el valor de tensión más alto ($+V$) hasta el más bajo ($-V$).

En esta forma de onda siempre se cumple que:

$$T = t_H + t_L + t_r + t_f \quad (3.1)$$

En este trabajo se utiliza siempre una señal trapezoidal simétrica, que es la que menos armónicos contiene como se muestra en el apartado 3.3.4. En lo que sigue se asume que la señal es simétrica, aunque no se especifique. Esta simetría implica que se cumplen siempre las siguientes ecuaciones:

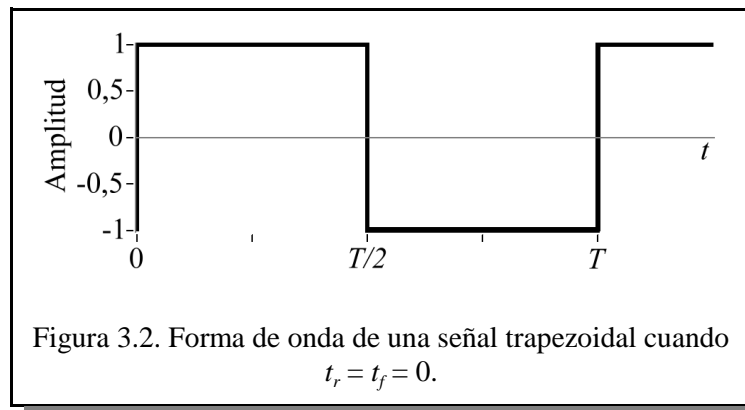
$$t_H = t_L \quad (3.2)$$

$$t_r = t_f \quad (3.3)$$

3.3.1 Límites de la forma de onda

En una señal sinusoidal, la forma de onda queda determinada por medio de sus parámetros de frecuencia, fase y amplitud, mientras que en una señal trapezoidal son necesarios más parámetros para su definición. Para una misma frecuencia, misma fase y misma amplitud de una señal trapezoidal, hay un número infinito de formas de onda diferentes según sean los valores de t_r y t_f o los de t_H y t_L . La forma de la señal y su espectro de frecuencias son diferentes en cada caso.

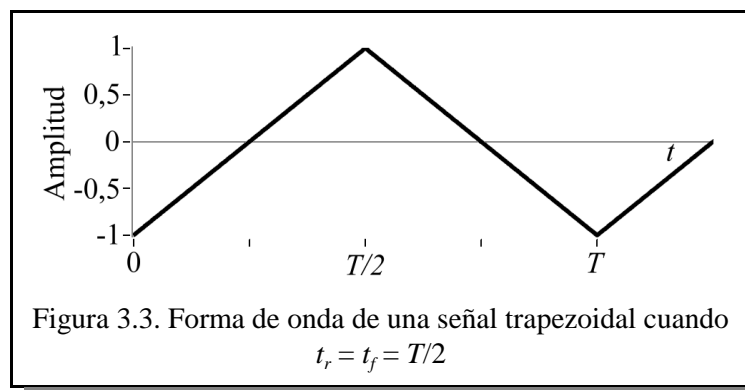
Teniendo en cuenta los valores extremos que pueden tomar t_r y t_f para una señal de periodo T y amplitud constante, se obtienen las formas de onda límites de la señal trapezoidal. Para $t_r = t_f = 0$, la forma de onda es una señal cuadrada con ciclo de trabajo del 50 % (figura 3.2).



En este caso, se tiene:
$$t_H = t_L = \frac{T}{2} \tag{3.4}$$

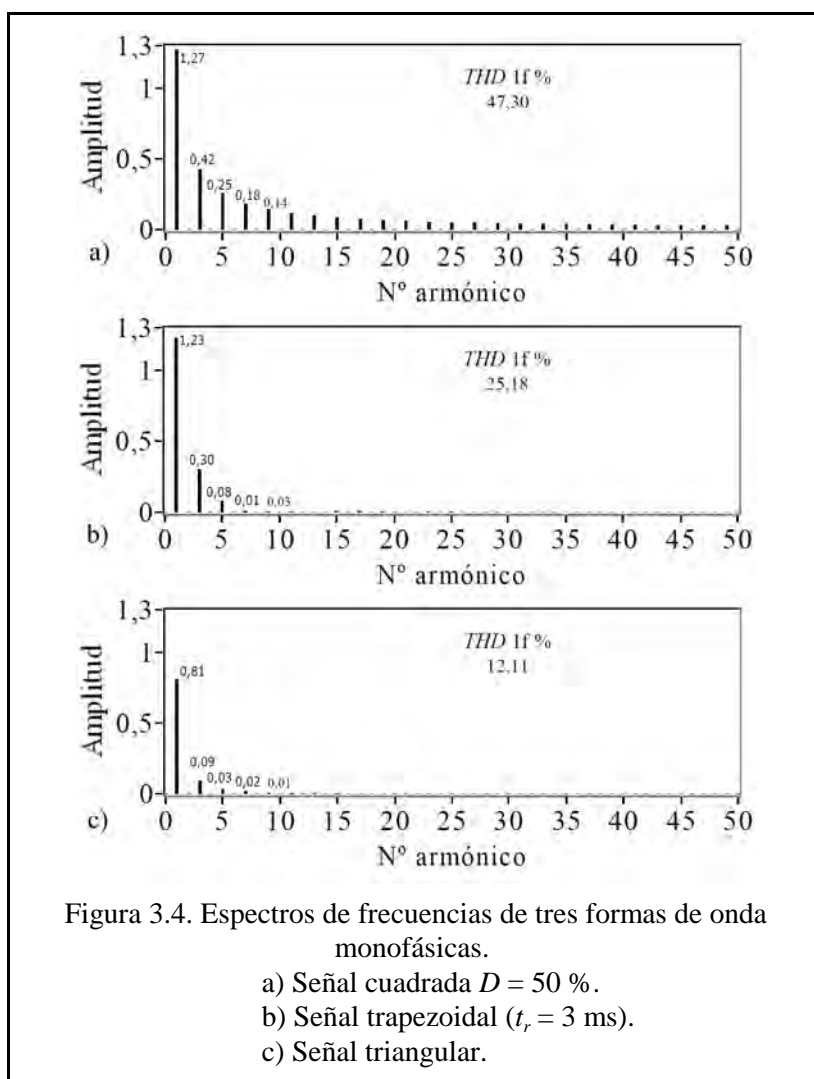
Cuando $t_r = t_f = T/2$, la forma de onda se corresponde con la de una señal triangular (figura 3.3). En este caso, se tiene:

$$t_H = t_L = 0 \tag{3.5}$$



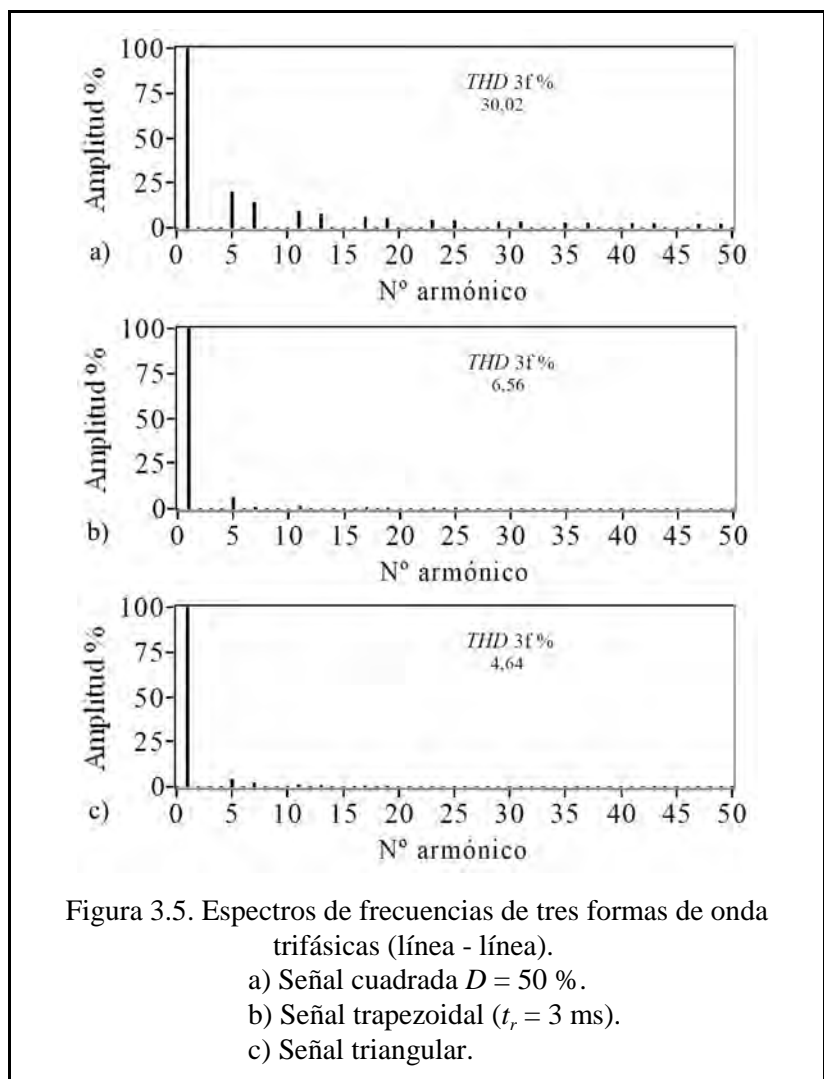
3.3.2 Espectro de frecuencias de la señal trapezoidal

Una de las razones por lo que en esta tesis se trabaja con señales trapezoidales es por el espectro de frecuencias de las mismas. En general presentan una frecuencia fundamental de gran amplitud y pocos armónicos no deseados. La figura 3.4 muestra los espectros de frecuencias de tres señales alternas monofásicas de 50 Hz de frecuencia y amplitud unidad con distintas formas de onda: a) es el espectro de



frecuencias de una señal cuadrada con ciclo de trabajo del 50 %; b) es el espectro de frecuencias de una señal trapezoidal con $t_r = 3\text{ ms}$; y c) es el espectro de frecuencias de una señal triangular.

Dado que el objetivo de este trabajo es la modulación de señales trifásicas, estas se han obtenido utilizando las señales monofásicas mostradas en la figura 3.4. La figura 3.5 muestra los espectros de frecuencias de las formas de onda trifásicas obtenidas con las señales anteriores (tensión línea - línea). En este caso, se puede ver que el menor valor de THD lo tiene la señal triangular. Sin embargo, no siempre es la mejor opción, como se discute en el apartado siguiente.



3.3.3 Amplitud de la frecuencia fundamental

El valor de la amplitud de la frecuencia fundamental de una señal trapezoidal es función del valor de los tiempos de subida y bajada de la señal. El valor máximo corresponde al caso extremo en que $t_r = t_f = 0$ (señal cuadrada). En este caso, la amplitud de la frecuencia fundamental para una señal de amplitud unidad es $4/\pi = 1,2732$. En el otro caso extremo, donde $t_r = t_f = T/2$ (señal triangular), la amplitud de la frecuencia fundamental de la señal es 0,8107. Esto significa que, tomando como referencia el valor de la amplitud de la frecuencia fundamental cuando la forma de

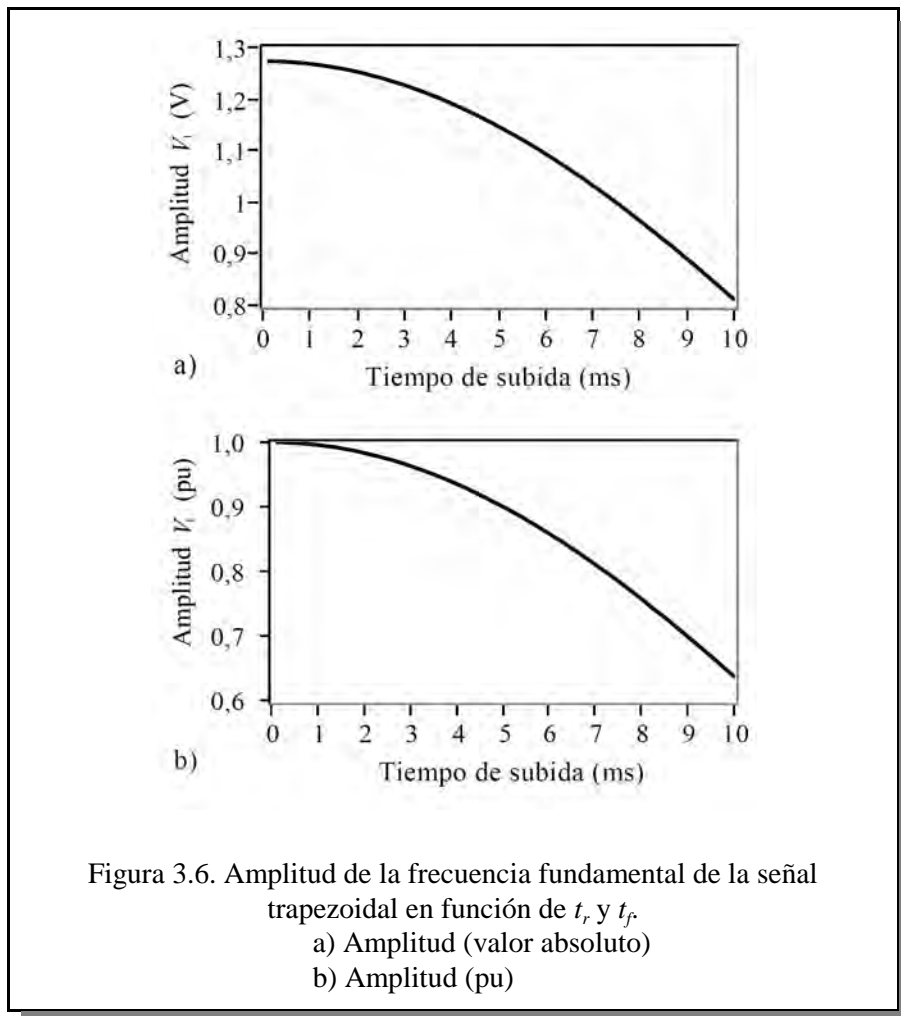
onda es cuadrada, la amplitud de la frecuencia fundamental en una señal triangular es el 63,67 % respecto a la señal cuadrada. Por lo tanto, para una carga determinada, esta variación en la amplitud de la señal representa una variación en la potencia entregada a ella. La tabla 3.1 resume los valores de la amplitud en valor absoluto y en unidades pu, respecto a la señal cuadrada, de la frecuencia fundamental para los tres tipos de forma de onda que se tratan.

		V_1	V_1 pu
Señal	Cuadrada 50%	1,27324	1,00
	Trapezoidal ($t_r = 3$ ms)	1,22665	0,96
	Triangular	0,81065	0,64

Tabla 3.1. Valores máximos de la amplitud de la frecuencia fundamental en tres formas de onda.

En esta tabla se ha puesto un único valor para la señal trapezoidal ($t_r = 3$ ms), como un ejemplo. Cualquier otro valor del tiempo de subida de la señal tiene un valor de potencia diferente ya que se modifica la amplitud de la frecuencia fundamental.

La figura 3.6 muestra las gráficas que relacionan la amplitud de la frecuencia fundamental de una señal trapezoidal de 50 Hz y amplitud unidad con el valor de los tiempos de subida y bajada, desde $t_r = 0$ ms hasta $t_r = 10$ ms ($T/2$). La figura 3.6 a) muestra la variación del valor absoluto de la amplitud de la frecuencia fundamental mientras que en b) se muestra la variación de la amplitud en unidades pu. Como puede verse, modificando el valor de t_r y t_f es posible regular la amplitud de la frecuencia fundamental de la señal trapezoidal.

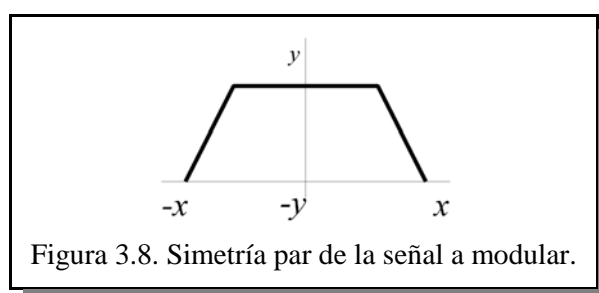
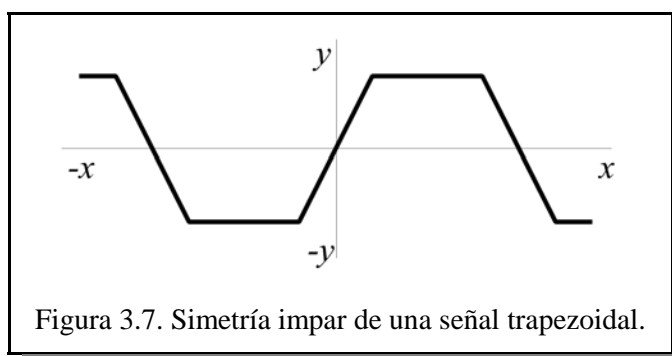


3.3.4 Simetrías en la señal trapezoidal

La señal trapezoidal presenta simetría impar ya que en ella se cumple la condición:

$$f(-x) = -f(x) \quad (3.6)$$

La figura 3.7 muestra esta simetría respecto al eje y de coordenadas, lo cual permite simplificar los cálculos necesarios para realizar la modulación puesto que



solo hay que realizarlos sobre la mitad de la forma de onda, obteniendo la otra mitad por simetría. Por lo tanto, es suficiente modular la forma de onda que se muestra en la figura 3.8. Esta última forma de onda, a su vez, presenta simetría par ya que cumple con la condición:

$$f(x) = f(-x) \quad (3.7)$$

Esta simetría permite reducir más aún los cálculos necesarios para realizar la modulación de la señal.

3.3.4.1 Efectos de la falta de simetría

Como sucede en todas las técnicas de modulación PWM, la falta de simetría hace que existan armónicos no deseados en el espectro de frecuencias de la señal. La figura 3.9 muestra un ejemplo de señal trapezoidal totalmente simétrica en a), su espectro de frecuencias como señal monofásica en b) y como señal trifásica (línea - línea) en c). Las amplitudes de los armónicos están expresados en valores porcentuales respecto a la frecuencia fundamental. Se han indicado la amplitud de los cuatro primeros armónicos en la señal monofásica y el valor de *THD* de ambas

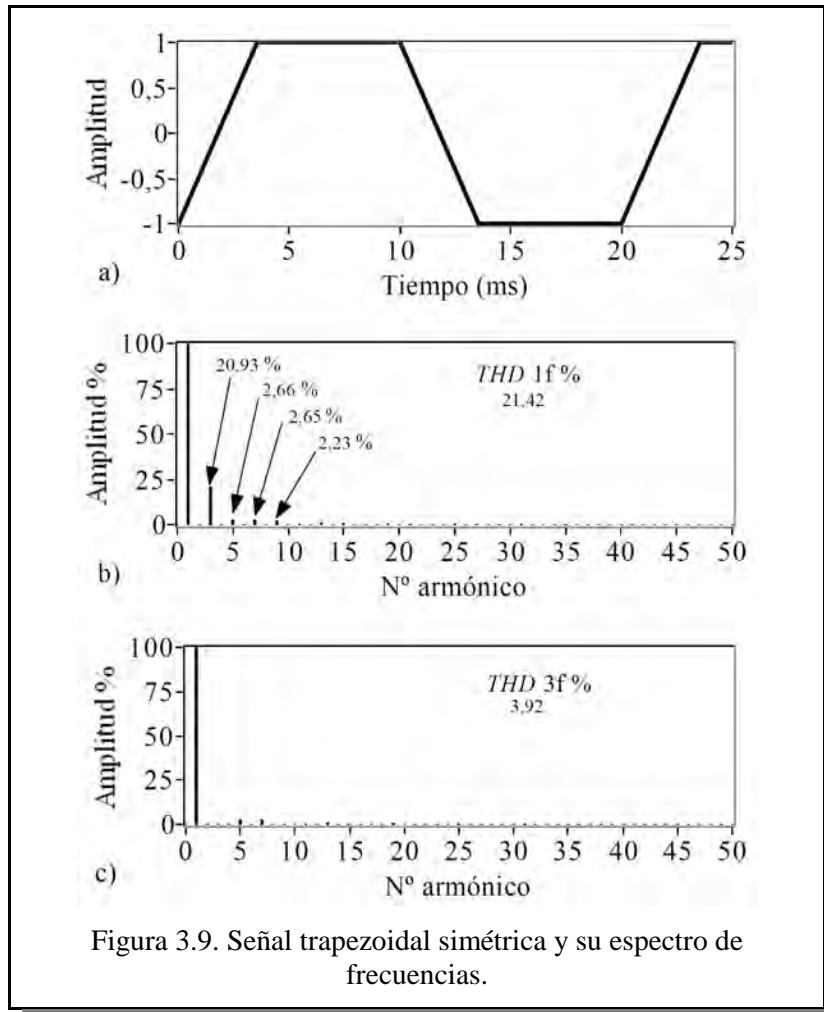


Figura 3.9. Señal trapezoidal simétrica y su espectro de frecuencias.

señales. En la señal monofásica, el valor de THD es 21,42 %, el armónico de orden 3 tiene una amplitud del 20,93 %, el de orden 5 tiene una amplitud del 2,66 %, el de orden 7 tiene una amplitud del 2,65 % y el de orden 9 tiene una amplitud del 2,23 %. Las demás componentes armónicas tienen una amplitud inferior a 1 % y todas las de orden par tienen una amplitud de 0,00 %.

Para el caso de la señal trifásica, el valor de THD es 3,92 %, no hay armónicos múltiplos de tres y la amplitud relativa de los otros armónicos es igual que en la señal monofásica.

Las figuras 3.10 y 3.11 muestran formas de onda con asimetrías. Ambas son modificaciones de la forma de onda de la figura 3.9. En la figura 3.10 se ha representado la señal con tiempos de subida y bajada asimétricos: t_r se ha reducido un 20 % respecto a su valor nominal mientras que t_f se ha aumentado un 20 % sobre

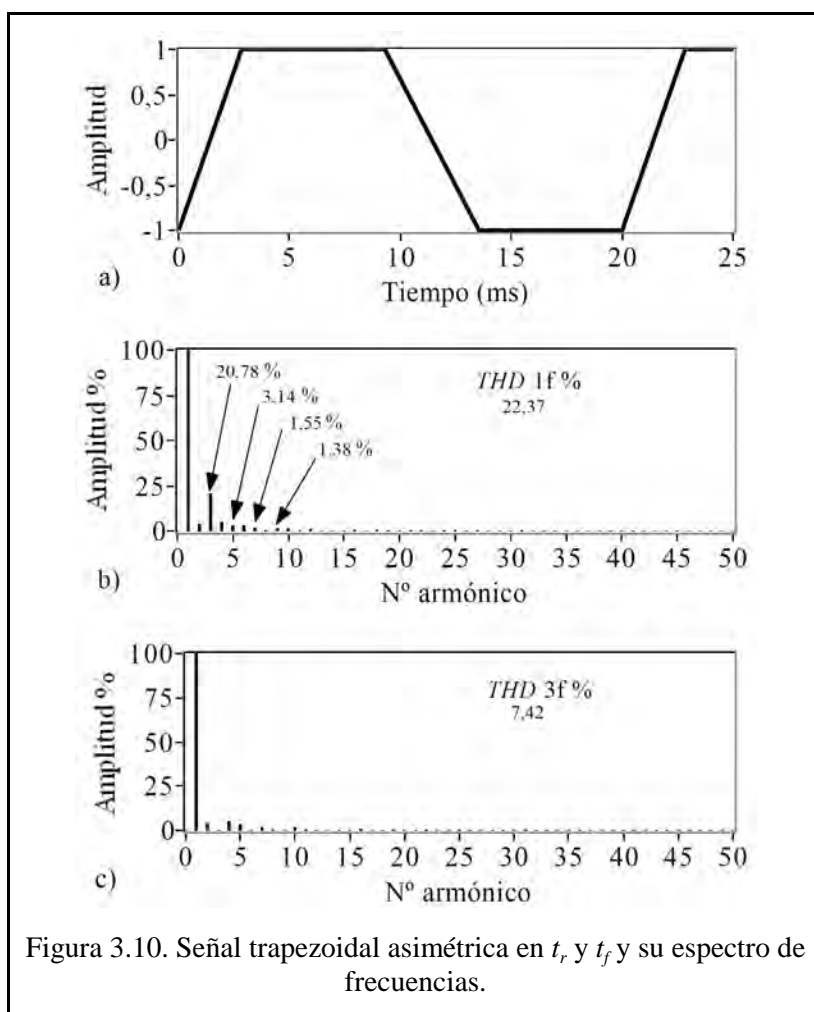


Figura 3.10. Señal trapezoidal asimétrica en t_r y t_f y su espectro de frecuencias.

su valor nominal. Con estos parámetros, el valor de THD para la señal monofásica es 22,37 % (ha crecido un 4,44 %). Las componentes de orden 3, 5, 7 y 9 tienen ahora una amplitud de 20,78 % (+0,72 %), 3,14 % (+ 18 %), 1,55 % (-38 %) y 1,38 % (-38,12 %), respectivamente. Como se puede ver en la figura 3.10 b), ahora hay componentes armónicas de orden par cuyos valores de amplitud porcentual respecto a la frecuencia fundamental son los mostrados en la tabla 3.2.

Nº armónico	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
Amplitud (%)	0,00	3,83	5,01	3,16	0,24	1,45	1,21	0,06	0,64	0,49	0,01	0,23	0,15	0,03

Tabla 3.2. Amplitud de las componentes armónicas de orden par en la forma de onda monofásica de la figura 3.10.

En el caso de la señal trifásica, el valor de *THD* ha pasado de 3,92 % a 7,42 %, un incremento de 258 % y los armónicos impares tienen la misma amplitud que en la señal monofásica, menos los múltiplos de tres, cuya amplitud es nula. Las amplitudes de los armónicos de orden par son, en este caso, los que se muestran en la tabla 3.3.

Nº armónico	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
Amplitud (%)	0,00	3,83	5,01	0,00	0,24	1,45	0,00	0,06	0,64	0,00	0,01	0,23	0,00	0,03

Tabla 3.3. Amplitud de las componentes armónicas de orden par en la forma de onda trifásica de la figura 3.10.

La figura 3.11 muestra una forma de onda similar a la de la figura 3.9 en la que el valor de t_H es un 20 % menor y el de t_L es un 20 % mayor. El valor de *THD*, para la señal monofásica, es ahora 25,75 % (+ 20,21 %). También en este caso, la señal contiene armónicos pares con las amplitudes mostradas en la tabla 3.4. En esta tabla puede verse que aparece un valor de amplitud a la frecuencia cero (componente continua) de -10,91 %.

Nº armónico	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
Amplitud (%)	-10,91	17,10	6,94	0,99	2,91	1,14	0,34	0,29	0,04	0,16	0,38	0,12	0,24	0,23

Tabla 3.4. Amplitud de las componentes armónicas de orden par en la forma de onda monofásica de la figura 3.11.

En el caso de la señal trifásica, el valor de *THD* pasa de 3,92 % a 18,81 %, un incremento de 380 %. Los valores de las componentes armónicas de orden par se han recogido en la tabla 3.5.

Nº armónico	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26
Amplitud (%)	0,00	17,10	6,94	0,00	2,91	1,14	0,00	0,29	0,04	0,00	0,38	0,12	0,00	0,23

Tabla 3.5. Amplitud de las componentes armónicas de orden par en la forma de onda trifásica de la figura 3.11.

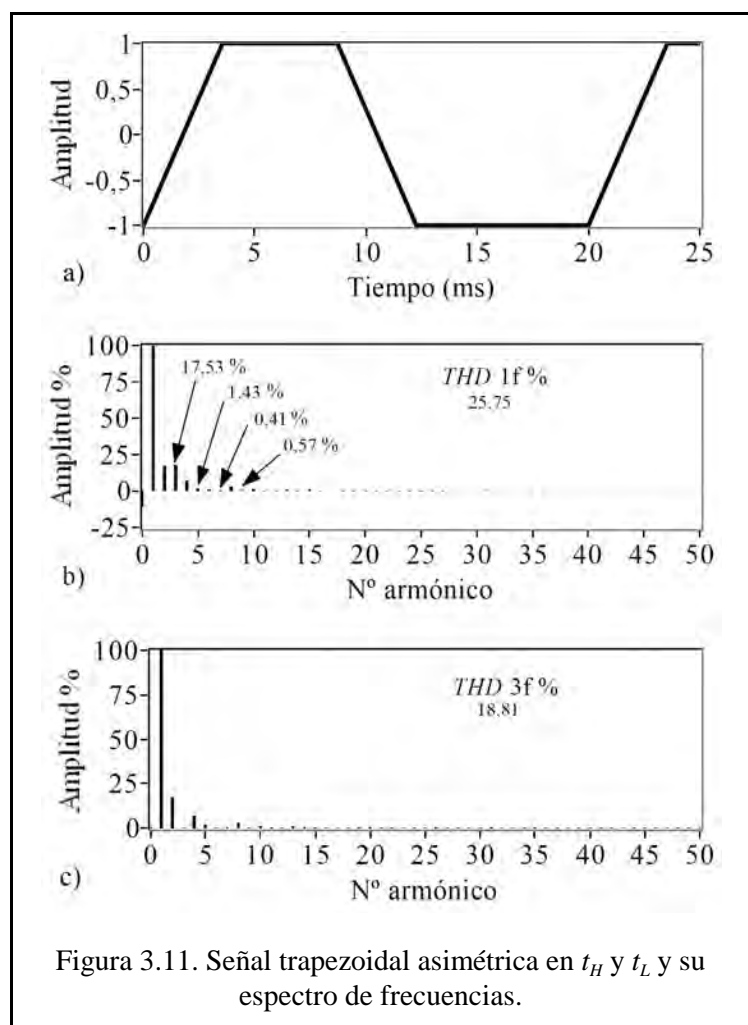


Figura 3.11. Señal trapezoidal asimétrica en t_H y t_L y su espectro de frecuencias.

Como puede verse, la falta de simetría tiene efectos no deseados, por ello es muy importante mantener la señal simétrica.

3.3.5 Simetría en la señal modulada

Aunque la señal modulada es una consecuencia de la señal objetivo en la modulación directa, es necesario tener en cuenta que esta señal ha de ser totalmente simétrica, no siendo válido únicamente la aplicación del principio de igualdad del producto $V \times s$, sino que además es muy importante la posición de cada pulso en la

forma de onda modulada. Concretamente, la posición de los pulsos ha de estar centrada en el intervalo correspondiente ya que de no ser así, la señal resultante es asimétrica y en el análisis del espectro de frecuencias de la señal modulada aparecen armónicos indeseados, de forma similar a como se ha visto en el apartado anterior. Por ejemplo, si los pulsos de una señal modulada TPWM-DM con $M = 21$ y $t_r = 3,7$ ms se desplazan $100 \mu\text{s}$ del centro del intervalo, el valor de THD se incrementa en un 154 %, la distorsión armónica ponderada ($WTHD$) se incrementa en un 55 % y la amplitud del armónico fundamental se ve reducida en un 0,5 %. En este caso no hay componentes armónicas de orden par.

3.4 Modulación de la señal trapezoidal

Como se ha visto en los apartados anteriores, modificando la duración de los tiempos de subida y bajada de una señal trapezoidal es posible controlar la amplitud de la frecuencia fundamental entregada a la carga. Esto significa que sólo es necesario modular la señal durante los tiempos de subida y bajada siempre que no sea necesario una regulación de amplitud mayor que la comentada en 3.3.3. Esto permite una simplificación importante en el proceso de modulación y reduce el número de conmutaciones por periodo de la señal, lo que implica la correspondiente reducción de pérdidas por conmutación en los inversores de potencia.

Como se demuestra en lo que sigue, durante los tiempos t_r y t_f , el valor de la amplitud de la señal se rige por ecuaciones lineales. Esto hace que se simplifique la obtención de la señal modulada minimizándose los requerimientos computacionales del sistema electrónico necesario para ello (microcontrolador).

3.4.1 Metodología

Para la obtención de la señal modulada TPWM-DM se parte del análisis del funcionamiento de un sistema inversor real para deducir los instantes de conmutación necesarios para los transistores del mismo (patrón de conmutaciones).

Un inversor real hace que la tensión de salida conmute entre los valores máximo y mínimo de la tensión continua del bus de alimentación, realizando las conmutaciones según un patrón específico descrito por medio de las señales de control. Estas señales de control son digitales de niveles industriales para asegurar un amplio margen de ruido en ellas.

Desde una perspectiva de conjunto, un inversor actúa como un convertidor de nivel haciendo que las señales de control, que son de baja potencia y baja tensión, procedentes de un sistema electrónico digital, sean de alta potencia y alta tensión (señales conmutadas) a la salida del mismo.

Entre las señales digitales de control y las de salida del inversor hay una correspondencia directa en cuanto a las amplitudes pero no exacta en cuanto a los tiempos, ya que los requerimientos de conmutación del sistema de modulación y del sistema de potencia son muy distintos. Los sistemas de modulación digitales se basan en microcontroladores y estos son muy rápidos, con tiempos de conmutación muy cortos, inferior a 10 ns, mientras que los tiempos de conmutación necesarios en los transistores de potencia de los inversores son de centena o de miles de ns, según sean los modelos. Por fortuna, a la frecuencia de la red eléctrica industrial (50 Hz o 60 Hz, según sea el país), estas diferencias apenas se observan. Hay que tener en cuenta que, si bien las diferencias citadas en los tiempos de conmutación llegan a ser del orden del millar de ns (es decir, microsegundos), y dado que el periodo de una señal de red de 50 Hz tiene un valor de 20.000 μ s, se trata de diferencias pequeñas relativamente.

Para obtener los patrones de conmutación o instantes de tiempo en los que el inversor debe de realizar las conmutaciones, en este trabajo se parte de analizar la forma de onda que se desea obtener a la salida del inversor para deducir de ella las ecuaciones que rigen la modulación y obtener los valores de tiempo necesarios para las señales de control. Este proceso se ha organizado en dos apartados principales de los que se obtienen las ecuaciones para la modulación de la señal:

- Modulación durante el tiempo de subida, t_r
- Modulación durante el tiempo de bajada, t_f

A su vez, el desarrollo de la modulación durante t_r y t_f se realiza en las cuatro fases siguientes:

- Fase 1. Valor del producto $V_{trap} \times s$ en un intervalo.

- Fase 2. Valor del producto $V_{TPWM-DM} \times S$ en un intervalo.
- Fase 3. Ecuación de la duración del pulso.
- Fase 4. Casos de estudio, en los que se utilizan las ecuaciones obtenidas en las fases anteriores para obtener y analizar los resultados numéricos.

Además, dependiendo de cómo es la alimentación en continua del inversor, hay dos posibilidades: los que son alimentados con una tensión continua simple (V_i) y los que son alimentados por medio de una tensión continua doble ($\pm V_i$). En el primer caso la tensión de fase es conmutada no alterna y en el segundo es conmutada y alterna. En cada caso el planteamiento es diferente, por lo que se realiza en apartados independientes.

Por otra parte, el desarrollo de la modulación durante t_H y t_L se realiza utilizando también técnica PWM.

3.4.2 Sobre los pulsos

La técnica PWM, como su nombre indica, trabaja controlando la duración (ancho) de cada pulso utilizado. La señal que se obtiene es una señal conmutada cuyos valores de amplitud son solamente dos, $0V$ y $+V_i$, cuando la alimentación en continua del inversor es simple, o $-V_i$ y $+V_i$, cuando la alimentación en continua del inversor es doble. No hay valores intermedios. La conmutación entre ellos es lo que da lugar a los pulsos. Por defecto, se suele asumir que un pulso es un intervalo de tiempo durante el cual la señal se encuentra al nivel más alto posible, $+V_i$. Sin embargo, esta no es la única posibilidad. En lo que sigue se habla con mucha frecuencia de “pulso”. En general, la palabra “pulso” se utiliza para identificar un determinado intervalo de tiempo durante el cual la señal se encuentra a un valor fijo de tensión. Todos los pulsos comienzan y acaban con una conmutación (transición) entre el valor de tensión del pulso y el otro valor de tensión. Si el valor de la tensión durante el tiempo de pulso es positiva, se dice que se trata de un pulso positivo, o simplemente, un pulso. Si la tensión durante el tiempo de pulso es cero o negativa, se dice que se trata de un pulso a cero o un pulso negativo, respectivamente. Para que exista un pulso positivo es necesario que la señal antes del pulso se encuentre a la tensión cero o negativa. De igual forma, para que exista un pulso a cero o negativo, la señal ha de estar previamente a la tensión positiva. Esta aclaración es necesaria

porque durante el tiempo de subida de la señal trapezoidal se utiliza el término pulso para denominar los pulsos positivos, que hacen que el valor de la tensión varíe desde 0V hasta $+V_i$ (o desde $-V_i$ hasta $+V_i$), y durante el tiempo de bajada se habla de pulsos a cero (o negativos), porque el valor de la tensión de la señal va de $+V_i$ a 0V (o de $+V_i$ a $-V_i$). Con esta nomenclatura, el tiempo t_H de la señal trapezoidal constituye un pulso positivo, mientras que el tiempo t_L constituye un pulso a cero (o negativo). Así, si N_r es el número de pulsos durante el tiempo de subida y N_f es el número de pulsos durante el tiempo de bajada, el número total de pulsos por periodo de la señal, M , se expresa como:

$$M = N_r + N_f + 1 \quad (3.8)$$

donde el valor 1 corresponde al pulso t_H .

Teniendo en cuenta que por simetría el número de pulsos durante el tiempo de subida debe ser igual al número de pulsos durante el tiempo de bajada, se tiene:

$$N_r = N_f \quad (3.9)$$

Así, la ecuación (3.8) puede ser reescrita como sigue:

$$M = 2N + 1 \quad (3.10)$$

El parámetro M es similar al parámetro m_f en otros métodos de modulación [6, pág. 335] en cuanto que representa el número de pulsos por periodo de la señal modulada. Sin embargo, el concepto y la formulación son diferentes en cada caso.

3.4.3 Modulación de la señal en el caso de alimentación simple

Este caso se presenta cuando la alimentación en continua del inversor tiene un único valor de tensión. La figura 3.12 muestra el esquema correspondiente a este caso. Las señales de salida del inversor (V_a , V_b y V_c) son señales que conmutan entre 0V y V_i , pero no son alternas. La señal alterna en la carga se consigue al hacer la combinación de las tres fases, como se dijo en 2.1.4.

La figura 3.13 muestra las distintas formas de onda en el inversor; a) es la tensión de entrada (V_i , tensión continua); b) es la forma de onda de la señal a obtener

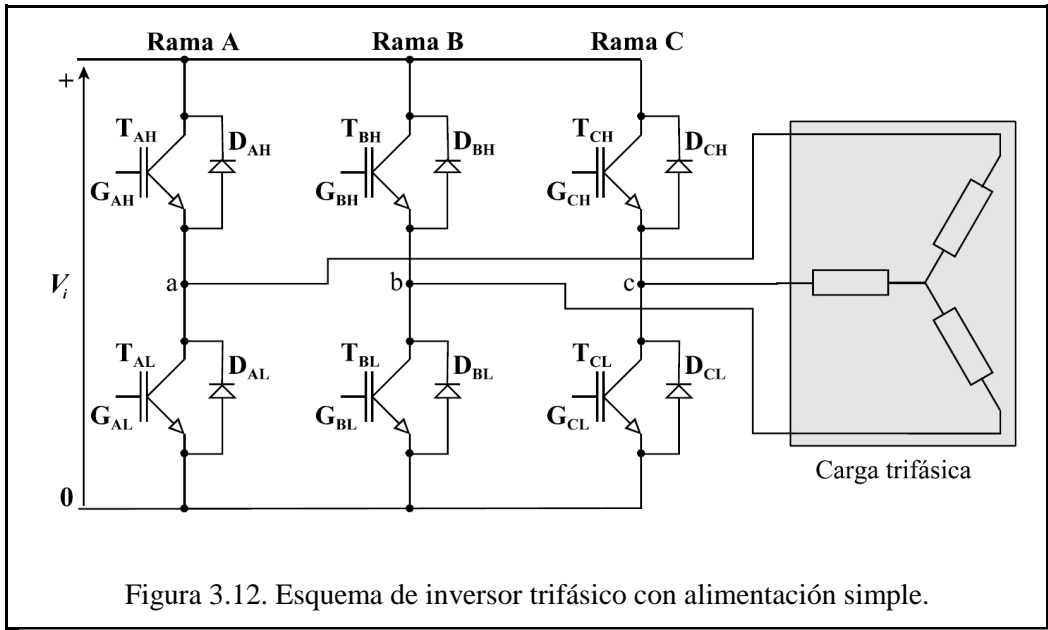


Figura 3.12. Esquema de inversor trifásico con alimentación simple.

(V_{trap} , trapezoidal); y c) es forma de onda de la señal modulada ($V_{TPWM-DM}$) en una de las salidas (V_a , V_b o V_c). La misión de la modulación es obtener la forma de onda mostrada en c) en las salidas del inversor. Dado que el inversor convierte los valores

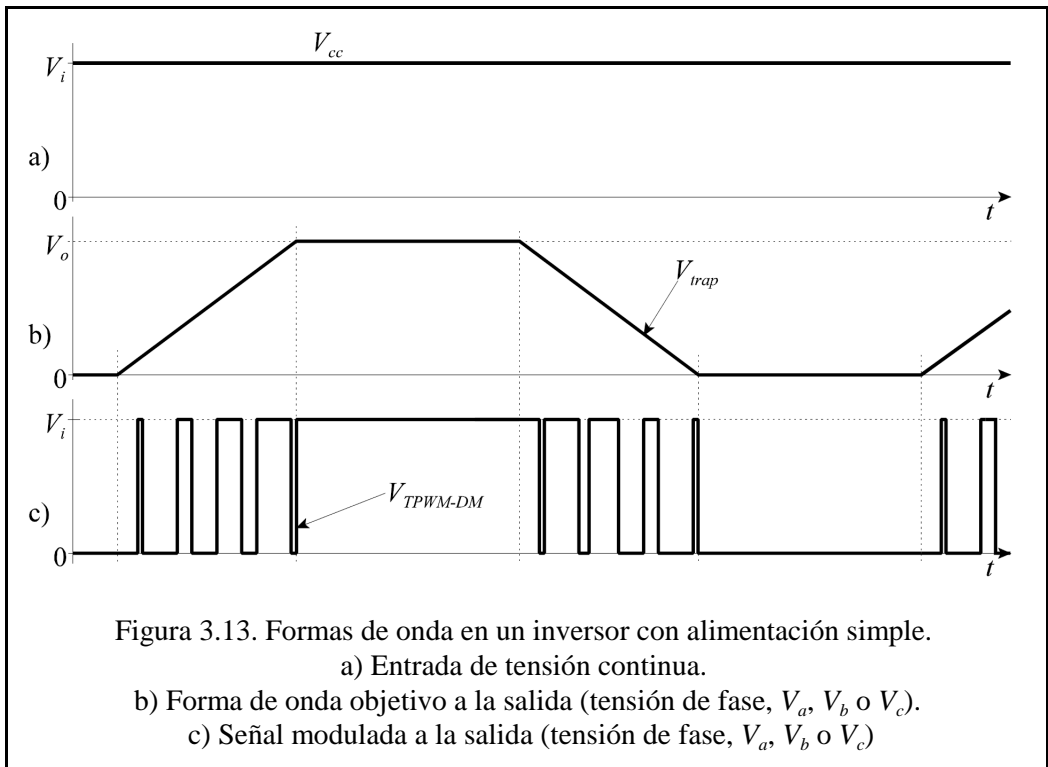


Figura 3.13. Formas de onda en un inversor con alimentación simple.

- a) Entrada de tensión continua.
- b) Forma de onda objetivo a la salida (tensión de fase, V_a , V_b o V_c).
- c) Señal modulada a la salida (tensión de fase, V_a , V_b o V_c)

de tensión de las señales de control, estas han de estar moduladas adecuadamente para conseguir las salidas correspondientes.

3.4.3.1 Modulación de la señal durante el tiempo de subida

La modulación se realiza igualando el producto $V \times s$ de la señal objetivo (trapezoidal ideal) con el de la señal modulada (señal real a la salida del inversor).

Para realizar la modulación de la señal durante el tiempo de subida, se divide este tiempo en un número determinado de intervalos iguales, N , como se muestra en la figura 3.14. La duración de cada intervalo, t_{nr} , es:

$$t_{nr} = \frac{t_r}{N} \tag{3.11}$$

para $nr = 1, 2, 3, \dots, N$.

Esta división hace que la amplitud total de la señal quede dividida en N valores iguales, V_{nr} , cuya expresión es:

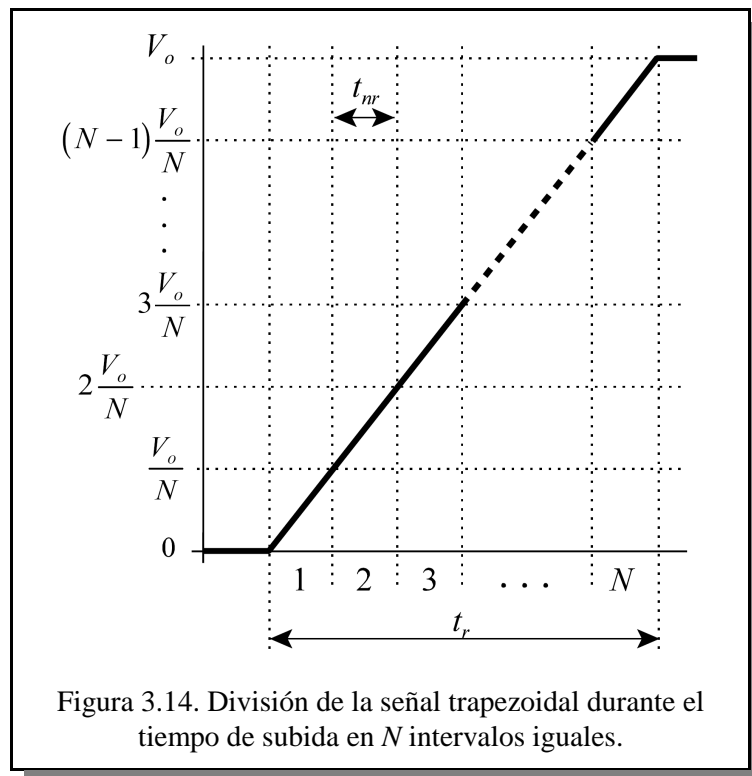


Figura 3.14. División de la señal trapezoidal durante el tiempo de subida en N intervalos iguales.

$$V_{nr} = \frac{V_o}{N} \quad (3.12)$$

para $nr = 1, 2, 3, \dots, N$.

El cambio de amplitud de la señal es lineal con el tiempo, por lo que en cada intervalo la amplitud de la señal se incrementa en V_{nr} respecto al intervalo anterior.

Fase 1. Valor del producto $V_{trap} \times s$ en un intervalo

La figura 3.15 muestra un detalle de la forma de onda trapezoidal en un intervalo de tiempo y de la señal modulada durante el mismo. De las figuras 3.14 y 3.15 a), se obtiene que el producto $V_{trap} \times s$ tiene la siguiente expresión:

$$V_{trap} \times s = \frac{1}{2} \frac{V_o}{N} \frac{t_r}{N} + (nr - 1) \frac{V_o}{N} \frac{t_r}{N} \quad (3.13)$$

Es decir:

$$V_{trap} \times s = V_o \frac{t_r}{N^2} \left(nr - \frac{1}{2} \right) \quad (3.14)$$

para $nr = 1, 2, 3, \dots, N$.

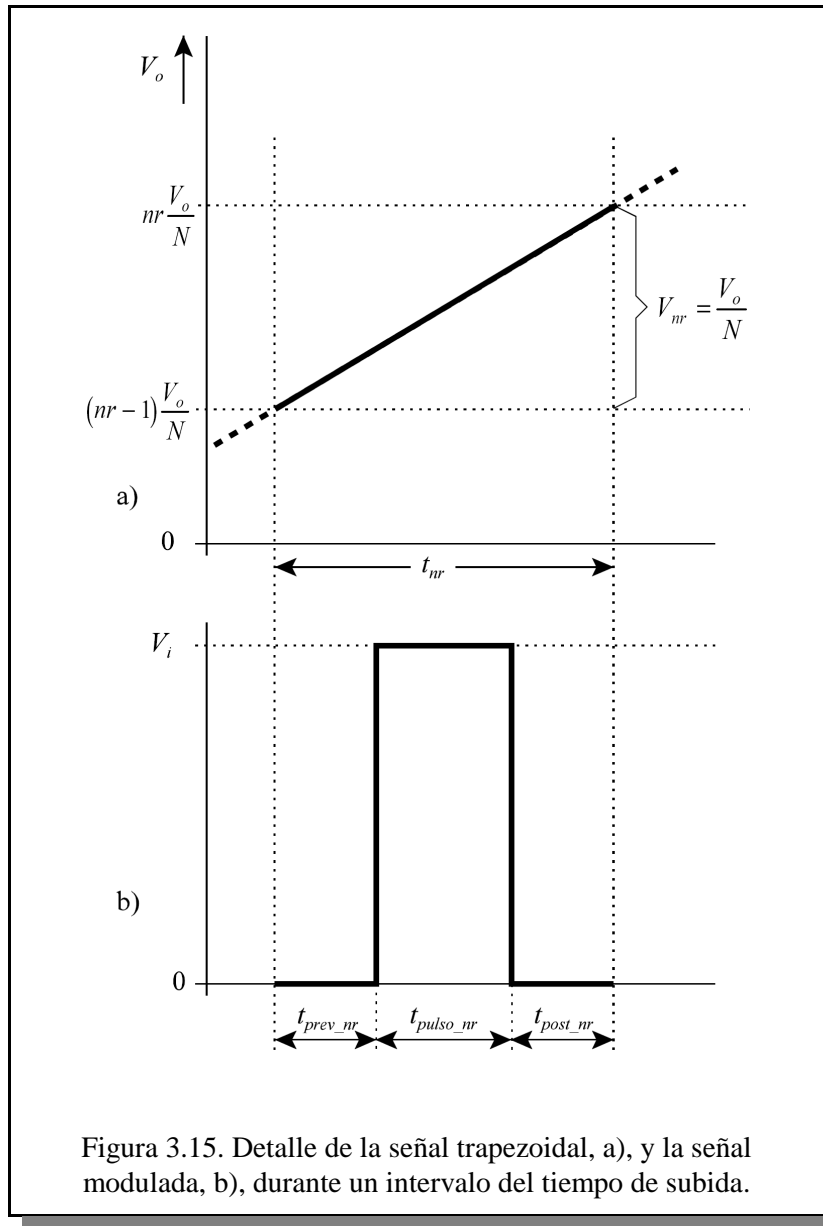
Fase 2. Valor del producto $V_{TPWM-DM} \times s$ en un intervalo

Durante un intervalo nr del tiempo de subida, la señal modulada se compone de tres partes temporales, como se puede ver en la figura 3.15 b), identificados como tiempo previo al pulso, t_{prev_nr} , tiempo del pulso, t_{pulso_nr} y tiempo posterior al pulso, t_{post_nr} . La suma de estos tres tiempos tiene que ser igual a la duración del intervalo:

$$t_{prev_nr} + t_{pulso_nr} + t_{post_nr} = t_{nr} \quad (3.15)$$

Además, con vista a mantener la simetría de la señal, los tiempos previo y posterior al pulso han de ser iguales:

$$t_{prev_nr} = t_{post_nr} \quad (3.16)$$



Por lo que la ecuación (3.15) puede ser reescrita como sigue:

$$2t_{prev_nr} + t_{pulso_nr} = t_{nr} \quad (3.17)$$

De donde se obtiene:

$$t_{prev_nr} = \frac{1}{2}(t_{nr} - t_{pulso_nr}) \quad (3.18)$$

Sustituyendo la ecuación (3.11) en la ecuación (3.18) se tiene:

$$t_{prev_nr} = \frac{1}{2}\left(\frac{t_r}{N} - t_{pulso_nr}\right) \quad (3.19)$$

Por otro lado, de la figura 3.15 b), se obtiene que el producto $V_{TPWM-DM} \times s$ tiene la expresión:

$$V_{TPWM-DM} \times s = 0 \cdot t_{prev_nr} + V_i \cdot t_{pulso_nr} + 0 \cdot t_{post_nr} \quad (3.20)$$

Es decir:

$$V_{TPWM-DM} \times s = V_i \cdot t_{pulso_nr} \quad (3.21)$$

Fase 3. Ecuación de la duración del pulso

Igualando las ecuaciones (3.14) y (3.21) se tiene:

$$V_i t_{pulso_nr} = V_o \frac{t_r}{N^2} \left(nr - \frac{1}{2} \right) \quad (3.22)$$

De donde:

$$t_{pulso_nr} = \frac{V_o}{V_i} \frac{t_r}{N^2} \left(nr - \frac{1}{2} \right) \quad (3.23)$$

para $nr = 1, 2, 3, \dots, N$.

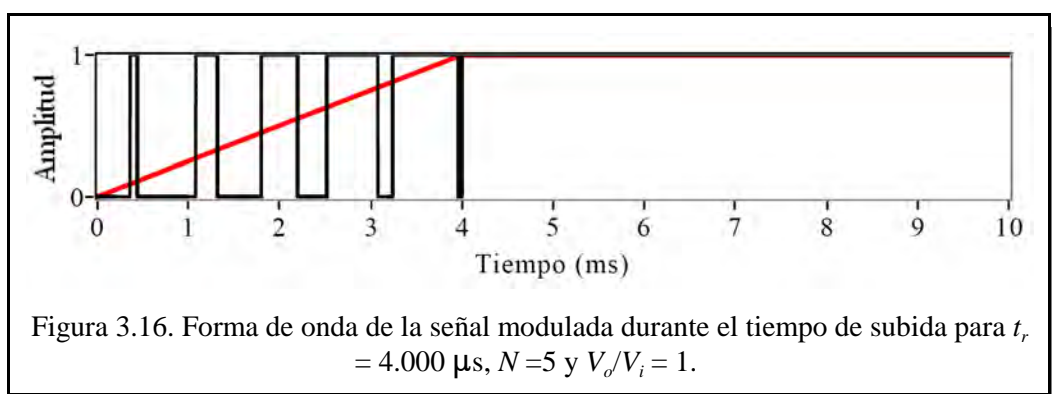
El término V_o/V_i de la ecuación (3.23) se puede utilizar para controlar la tensión máxima de la señal de salida, es decir, es posible controlar el valor máximo de la tensión durante el tiempo de subida.

Las ecuaciones (3.19) y (3.23) definen los tiempos de los pulsos en la señal modulada, por lo que se denominan ecuaciones de modulación.

Fase 4. Casos de estudio

Aplicando las ecuaciones de modulación para $N = 5$ y varios valores de t_r (de $1.000 \mu\text{s}$ a $10.000 \mu\text{s}$), como un ejemplo de aplicación real, se han obtenido los valores para los tiempos previo, pulso y posterior que se muestran en la tabla 3.6. En esta tabla se han realizado los cálculos para $V_o/V_i = 1$. La columna de la izquierda, t_r , contiene los valores del tiempo de subida de la señal para el cual se calculan los valores de t_{prev_nr} , t_{pulso_nr} y t_{post_nr} . La columna encabezada con nr identifica el número de orden del intervalo (de uno a cinco en este ejemplo, ya que $N = 5$). Cada una de ellas contiene los valores correspondientes de t_{prev_nr} , t_{pulso_nr} y t_{post_nr} .

La figura 3.16 muestra el aspecto de la forma de onda durante el tiempo de subida para el caso específico en el que $t_r = 4.000 \mu\text{s}$, $N = 5$ y $V_o/V_i = 1$. En esta figura se ha representado en color rojo la parte de la forma de onda correspondiente se la señal trapezoidal objetivo de la modulación.



Aplicando de nuevo las ecuaciones de modulación, ahora para $N = 6$ y varios valores de t_r (de $1.000 \mu\text{s}$ a $10.000 \mu\text{s}$), como otro ejemplo de aplicación real, se han obtenido los valores para los tiempos previo, pulso y posterior que se muestran en la tabla 3.7. En esta tabla se han realizado los cálculos para $V_o/V_i = 1$. La columna de la izquierda, t_r , contiene los valores del tiempo de subida de la señal para el cual se calculan los valores de t_{prev_nr} , t_{pulso_nr} y t_{post_nr} . La columna encabezada con nr identifica el número de orden del intervalo (de uno a seis en este ejemplo, ya que $N = 6$). Cada una de ellas contiene los valores correspondientes de t_{prev_nr} , t_{pulso_nr} y t_{post_nr} .

		<i>nr</i>								
		1			2			3		
t_r		t_{prev_nr}	t_{pulso_nr}	t_{post_nr}	t_{prev_nr}	t_{pulso_nr}	t_{post_nr}	t_{prev_nr}	t_{pulso_nr}	t_{post_nr}
a)	1.000	90,00	20,00	90,00	70,00	60,00	70,00	50,00	100,00	50,00
	2.000	180,00	40,00	180,00	140,00	120,00	140,00	100,00	200,00	100,00
	3.000	270,00	60,00	270,00	210,00	180,00	210,00	150,00	300,00	150,00
	4.000	360,00	80,00	360,00	280,00	240,00	280,00	200,00	400,00	200,00
	5.000	450,00	100,00	450,00	350,00	300,00	350,00	250,00	500,00	250,00
	6.000	540,00	120,00	540,00	420,00	360,00	420,00	300,00	600,00	300,00
	7.000	630,00	140,00	630,00	490,00	420,00	490,00	350,00	700,00	350,00
	8.000	720,00	160,00	720,00	560,00	480,00	560,00	400,00	800,00	400,00
	9.000	810,00	180,00	810,00	630,00	540,00	630,00	450,00	900,00	450,00
	10.000	900,00	200,00	900,00	700,00	600,00	700,00	500,00	1.000,00	500,00

		<i>nr</i>					
		4			5		
t_r		t_{prev_nr}	t_{pulso_nr}	t_{post_nr}	t_{prev_nr}	t_{pulso_nr}	t_{post_nr}
b)	1.000	30,00	140,00	30,00	10,00	180,00	10,00
	2.000	60,00	280,00	60,00	20,00	360,00	20,00
	3.000	90,00	420,00	90,00	30,00	540,00	30,00
	4.000	120,00	560,00	120,00	40,00	720,00	40,00
	5.000	150,00	700,00	150,00	50,00	900,00	50,00
	6.000	180,00	840,00	180,00	60,00	1.080,00	60,00
	7.000	210,00	980,00	210,00	70,00	1.260,00	70,00
	8.000	240,00	1.120,00	240,00	80,00	1.440,00	80,00
	9.000	270,00	1.260,00	270,00	90,00	1.620,00	90,00
	10.000	300,00	1.400,00	300,00	100,00	1.800,00	100,00

Tabla 3.6. Valores de tiempos en cada intervalo del tiempo de subida para $N = 5$, $V_o/V_i = 1$ y varios valores de t_r .

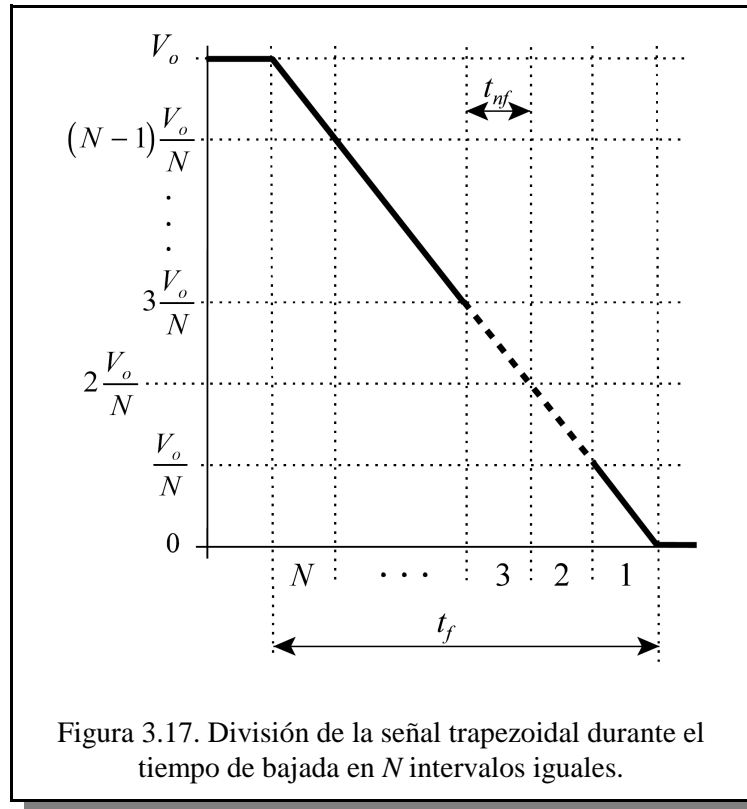
		<i>nr</i>								
		1			2			3		
t_r	t_{prev_nr}	t_{pulso_nr}	t_{post_nr}	t_{prev_nr}	t_{pulso_nr}	t_{post_nr}	t_{prev_nr}	t_{pulso_nr}	t_{post_nr}	
a) 1.000	76,39	13,89	76,39	62,50	41,67	62,50	48,61	69,44	48,61	
2.000	152,78	27,78	152,78	125,00	83,33	125,00	97,22	138,89	97,22	
3.000	229,17	41,67	229,17	187,50	125,00	187,50	145,83	208,33	145,83	
4.000	305,56	55,56	305,56	250,00	166,67	250,00	194,44	277,78	194,44	
5.000	381,94	69,44	381,94	312,50	208,33	312,50	243,06	347,22	243,06	
6.000	458,33	83,33	458,33	375,00	250,00	375,00	291,67	416,67	291,67	
7.000	534,72	97,22	534,72	437,50	291,67	437,50	340,28	486,11	340,28	
8.000	611,11	111,11	611,11	500,00	333,33	500,00	388,89	555,56	388,89	
9.000	687,50	125,00	687,50	562,50	375,00	562,50	437,50	625,00	437,50	
10.000	763,89	138,89	763,89	625,00	416,67	625,00	486,11	694,44	486,11	

		<i>nr</i>								
		4			5			6		
t_r	t_{prev_nr}	t_{pulso_nr}	t_{post_nr}	t_{prev_nr}	t_{pulso_nr}	t_{post_nr}	t_{prev_nr}	t_{pulso_nr}	t_{post_nr}	
b) 1.000	34,72	97,22	34,72	20,83	125,00	20,83	6,94	152,78	6,94	
2.000	69,44	194,44	69,44	41,67	250,00	41,67	13,89	305,56	13,89	
3.000	104,17	291,67	104,17	62,50	375,00	62,50	20,83	458,33	20,83	
4.000	138,89	388,89	138,89	83,33	500,00	83,33	27,78	611,11	27,78	
5.000	173,61	486,11	173,61	104,17	625,00	104,17	34,72	763,89	34,72	
6.000	208,33	583,33	208,33	125,00	750,00	125,00	41,67	916,67	41,67	
7.000	243,06	680,56	243,06	145,83	875,00	145,83	48,61	1.069,44	48,61	
8.000	277,78	777,78	277,78	166,67	1.000,00	166,67	55,56	1.222,22	55,56	
9.000	312,50	875,00	312,50	187,50	1.125,00	187,50	62,50	1.375,00	62,50	
10.000	347,22	972,22	347,22	208,33	1.250,00	208,33	69,44	1.527,78	69,44	

Tabla 3.7. Valores de tiempos en cada intervalo del tiempo de subida para $N = 6$, $V_o/V_i = 1$ y varios valores de t_r .

3.4.3.2 Modulación de la señal durante el tiempo de bajada

De forma similar a lo dicho para el tiempo de subida, para realizar la modulación de la señal durante el tiempo de bajada, se divide este tiempo en un número determinado de intervalos iguales, N , como se muestra en la figura 3.17. La duración de cada intervalo, t_{nf} , es:



$$t_{nf} = \frac{t_f}{N} \tag{3.24}$$

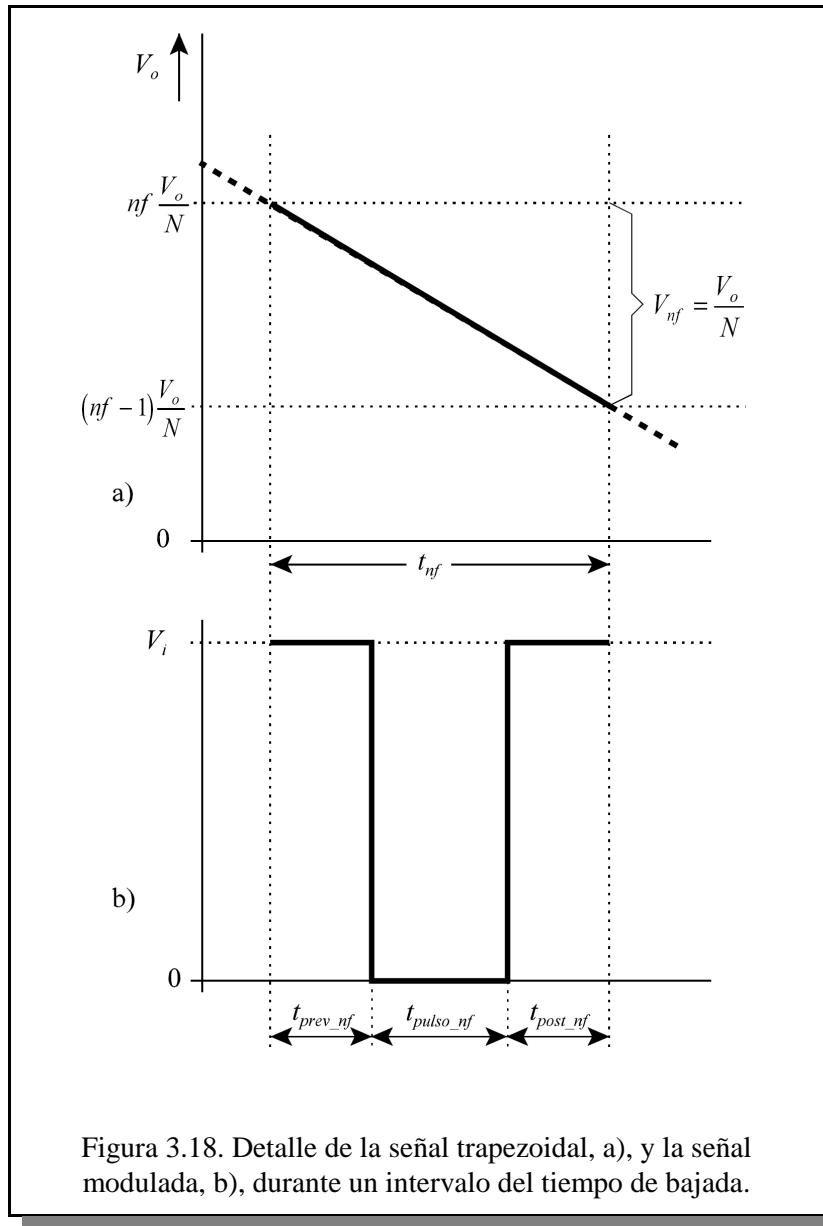
para $nf = 1, 2, 3, \dots, N$

Esta división hace que la amplitud total de la señal quede dividida en N valores iguales, cuya expresión es:

$$V_{nf} = \frac{V_o}{N} \tag{3.25}$$

para $nf = 1, 2, 3, \dots, N$.

Como el cambio de amplitud de la señal es lineal con el tiempo, en cada intervalo de tiempo la amplitud de la señal disminuye en V_{nf} respecto al intervalo anterior.



Fase 1. Valor del producto $V_{trap} \times s$ en un intervalo

La figura 3.18 muestra un detalle de la forma de onda trapezoidal en un intervalo de tiempo y de la señal modulada durante el mismo. De las figuras 3.17 y 3.18 a), se obtiene que el producto $V_{trap} \times s$ tiene la siguiente expresión:

$$V_{trap} \times s = \frac{1}{2} \frac{V_o}{N} \frac{t_f}{N} + (nf - 1) \frac{V_o}{N} \frac{t_f}{N} \tag{3.26}$$

Es decir:

$$V_{trap} \times s = V_o \frac{t_f}{N^2} \left(nf - \frac{1}{2} \right) \quad (3.27)$$

para $nf = 1, 2, 3, \dots, N$.

Fase 2. Valor del producto $V_{TPWM-DM} \times s$ en un intervalo

Durante un intervalo nf del tiempo de subida, la señal modulada se compone de tres partes temporales, como se puede ver en la figura 18 b), identificados como tiempo previo al pulso, t_{prev_nf} , tiempo del pulso, t_{pulso_nf} y tiempo posterior al pulso, t_{post_nf} . La suma de estos tres tiempos tiene que ser igual a la duración del intervalo:

$$t_{prev_nf} + t_{pulso_nf} + t_{post_nf} = t_{nf} \quad (3.28)$$

Además, con vista a mantener la simetría de la señal, los tiempos previo y posterior al pulso han de ser iguales:

$$t_{prev_nf} = t_{post_nf} \quad (3.29)$$

Por lo que la ecuación (3.28) puede ser reescrita como sigue:

$$2t_{prev_nf} + t_{pulso_nf} = t_{nf} \quad (3.30)$$

De donde se obtiene:

$$t_{prev_nf} = \frac{1}{2} (t_{nf} - t_{pulso_nf}) \quad (3.31)$$

Sustituyendo la ecuación (3.24) en la ecuación (3.31), se tiene:

$$t_{prev_nf} = \frac{1}{2} \left(\frac{t_f}{N} - t_{pulso_nf} \right) \quad (3.32)$$

De la figura 3.18 b) se obtiene que el producto $V_{TPWM-DM} \times s$, tiene la expresión:

$$V_{TPWM-DM} \times s = V_i \cdot t_{prev_nf} + 0 \cdot t_{pulso_nf} + V_i \cdot t_{post_nf} \quad (3.33)$$

Es decir:

$$V_{TPWM-DM} \times s = 2V_i \cdot t_{prev_nf} \quad (3.34)$$

Sustituyendo la ecuación (3.32) en la ecuación (3.34), se tiene:

$$V_{TPWM-DM} \times s = 2V_i \frac{1}{2} \left(\frac{t_f}{N} - t_{pulso_nf} \right) \quad (3.35)$$

De donde:

$$V_{TPWM-DM} \times s = V_i \left(\frac{t_f}{N} - t_{pulso_nf} \right) \quad (3.36)$$

Fase 3. Ecuación de la duración del pulso

Igualando las ecuaciones (3.27) y (3.36), se tiene:

$$V_i \left(\frac{t_f}{N} - t_{pulso_nf} \right) = V_o \frac{t_f}{N^2} \left(nf - \frac{1}{2} \right) \quad (3.37)$$

De donde:

$$t_{pulso_nf} = \frac{t_f}{N} - \frac{V_o}{V_i} \frac{t_f}{N^2} \left(nf - \frac{1}{2} \right) \quad (3.38)$$

para $nf = 1, 2, 3, \dots, N$.

Al igual que en la ecuación del pulso durante el tiempo de subida, el término V_o/V_i de la ecuación (3.38) se puede utilizar para controlar la tensión máxima de la salida, es decir, es posible controlar el valor máximo de tensión del tiempo de bajada.

Fase 4. Casos de estudio

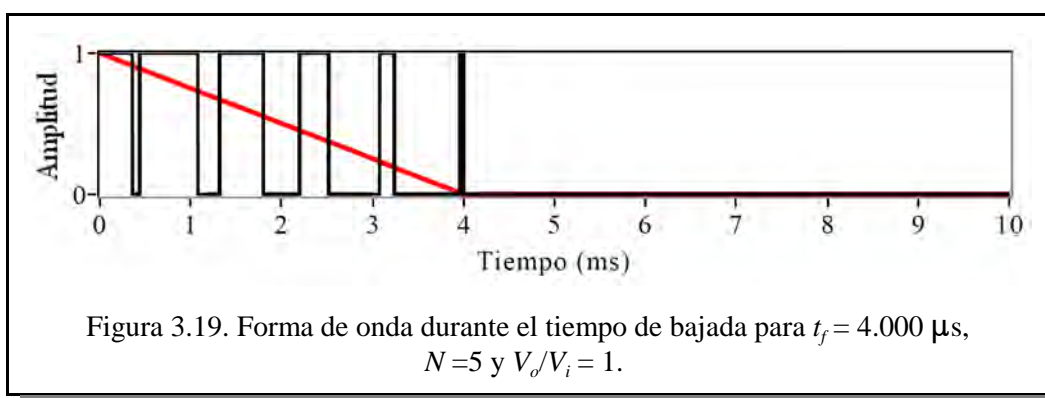
Aplicando las ecuaciones (3.32) y (3.38) para $N = 5$ y varios valores de t_f (de $1.000 \mu s$ a $10.000 \mu s$), como un ejemplo de aplicación real, se han obtenido los valores para los tiempos previo, pulso y posterior que se muestran en la tabla 3.8. En esta tabla se han realizado los cálculos para $V_o/V_i = 1$. La columna de la izquierda, t_f , contiene los valores del tiempo de bajada de la señal para el cual se calculan los

		<i>nf</i>								
		5			4			3		
<i>t_f</i>	<i>t_{prev_nf}</i>	<i>t_{pulso_nf}</i>	<i>t_{post_nf}</i>	<i>t_{prev_nf}</i>	<i>t_{pulso_nf}</i>	<i>t_{post_nf}</i>	<i>t_{prev_nf}</i>	<i>t_{pulso_nf}</i>	<i>t_{post_nf}</i>	
1.000	90,00	20,00	90,00	70,00	60,00	70,00	50,00	100,00	50,00	
2.000	180,00	40,00	180,00	140,00	120,00	140,00	100,00	200,00	100,00	
3.000	270,00	60,00	270,00	210,00	180,00	210,00	150,00	300,00	150,00	
a) 4.000	360,00	80,00	360,00	280,00	240,00	280,00	200,00	400,00	200,00	
5.000	450,00	100,00	450,00	350,00	300,00	350,00	250,00	500,00	250,00	
6.000	540,00	120,00	540,00	420,00	360,00	420,00	300,00	600,00	300,00	
7.000	630,00	140,00	630,00	490,00	420,00	490,00	350,00	700,00	350,00	
8.000	720,00	160,00	720,00	560,00	480,00	560,00	400,00	800,00	400,00	
9.000	810,00	180,00	810,00	630,00	540,00	630,00	450,00	900,00	450,00	
10.000	900,00	200,00	900,00	700,00	600,00	700,00	500,00	1.000,00	500,00	

		<i>nf</i>				
		2			1	
<i>t_f</i>	<i>t_{prev_nf}</i>	<i>t_{pulso_nf}</i>	<i>t_{post_nf}</i>	<i>t_{prev_nf}</i>	<i>t_{pulso_nf}</i>	<i>t_{post_nf}</i>
1.000	30,00	140,00	30,00	10,00	180,00	10,00
2.000	60,00	280,00	60,00	20,00	360,00	20,00
3.000	90,00	420,00	90,00	30,00	540,00	30,00
b) 4.000	120,00	560,00	120,00	40,00	720,00	40,00
5.000	150,00	700,00	150,00	50,00	900,00	50,00
6.000	180,00	840,00	180,00	60,00	1.080,00	60,00
7.000	210,00	980,00	210,00	70,00	1.260,00	70,00
8.000	240,00	1.120,00	240,00	80,00	1.440,00	80,00
9.000	270,00	1.260,00	270,00	90,00	1.620,00	90,00
10.000	300,00	1.400,00	300,00	100,00	1.800,00	100,00

Tabla 3.8. Valores de tiempos en cada intervalo del tiempo de bajada para $N = 5$, $V_o/V_i = 1$ y varios valores de t_f .

valores de t_{prev_nf} , t_{pulso_nf} y t_{post_nf} . La columna encabezada con nf identifica el número de orden del intervalo (de uno a cinco en este ejemplo, ya que $N = 5$). Cada una de ellas contiene los valores correspondientes de t_{prev_nf} , t_{pulso_nf} y t_{post_nf} . La figura 3.19 muestra el aspecto de la forma de onda durante el tiempo de bajada para $t_f = 4.000 \mu s$, $N = 5$ y $V_o/V_i = 1$. En ella se ha representado en color rojo la parte correspondiente de la forma de onda de la señal trapezoidal objetivo de la modulación.



Aplicando de nuevo las ecuaciones (3.32) y (3.38), ahora para $N = 6$ y varios valores de t_f (de $1.000 \mu s$ a $10.000 \mu s$), como otro ejemplo de aplicación real, se han obtenido los valores para los tiempos previo, pulso y posterior que se muestran en la tabla 3.9. En esta tabla se han realizado los cálculos para $V_o/V_i = 1$. La columna de la izquierda, t_f , contiene los valores del tiempo de bajada de la señal para el cual se calculan los valores de t_{prev_nf} , t_{pulso_nf} y t_{post_nf} . La columna encabezada con nf identifica el número de orden del intervalo (de uno a seis en este ejemplo, ya que $N = 6$). Cada una de ellas contiene los valores correspondientes de t_{prev_nf} , t_{pulso_nf} y t_{post_nf} .

Como puede comprobarse, los valores de las tablas 3.6 y 3.8 son exactamente iguales a las tablas 3.7 y 3.9 respectivamente. Esto es así debido a las condiciones de simetría impuestas. Sin embargo no hay que olvidar que en el caso del tiempo de subida (tablas 3.6 y 3.7) los tiempos de pulso son a $+V_i$ (pulsos positivos), mientras que los tiempos previo y posterior al pulso son a $0V$ (pulsos a cero). En el caso del tiempo de bajada, los tiempos de pulso son pulsos a cero y los tiempos previo y posterior son de pulsos a $+V_i$. Es decir que las ecuaciones de modulación del apartado 3.4.3.1, ecuaciones (3.19) y (3.23), son las únicas necesarias para realizar los cálculos de tiempos.

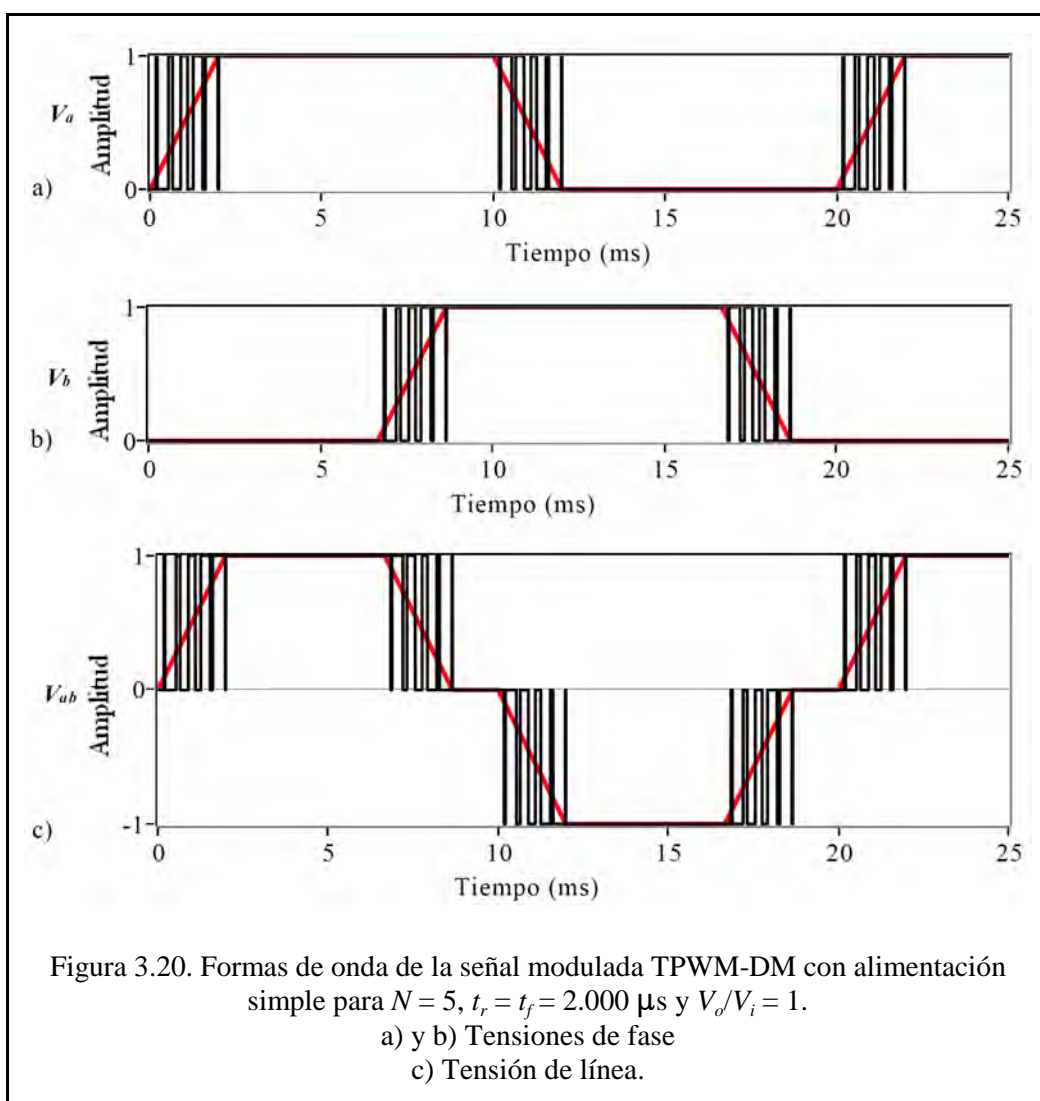
		n_f								
		6			5			4		
t_f	t_{prev_nf}	t_{pulso_nf}	t_{post_nf}	t_{prev_nf}	t_{pulso_nf}	t_{post_nf}	t_{prev_nf}	t_{pulso_nf}	t_{post_nf}	
a) 1.000	76,39	13,89	76,39	62,50	41,67	62,50	48,61	69,44	48,61	
2.000	152,78	27,78	152,78	125,00	83,33	125,00	97,22	138,89	97,22	
3.000	229,17	41,67	229,17	187,50	125,00	187,50	145,83	208,33	145,83	
4.000	305,56	55,56	305,56	250,00	166,67	250,00	194,44	277,78	194,44	
5.000	381,94	69,44	381,94	312,50	208,33	312,50	243,06	347,22	243,06	
6.000	458,33	83,33	458,33	375,00	250,00	375,00	291,67	416,67	291,67	
7.000	534,72	97,22	534,72	437,50	291,67	437,50	340,28	486,11	340,28	
8.000	611,11	111,11	611,11	500,00	333,33	500,00	388,89	555,56	388,89	
9.000	687,50	125,00	687,50	562,50	375,00	562,50	437,50	625,00	437,50	
10.000	763,89	138,89	763,89	625,00	416,67	625,00	486,11	694,44	486,11	

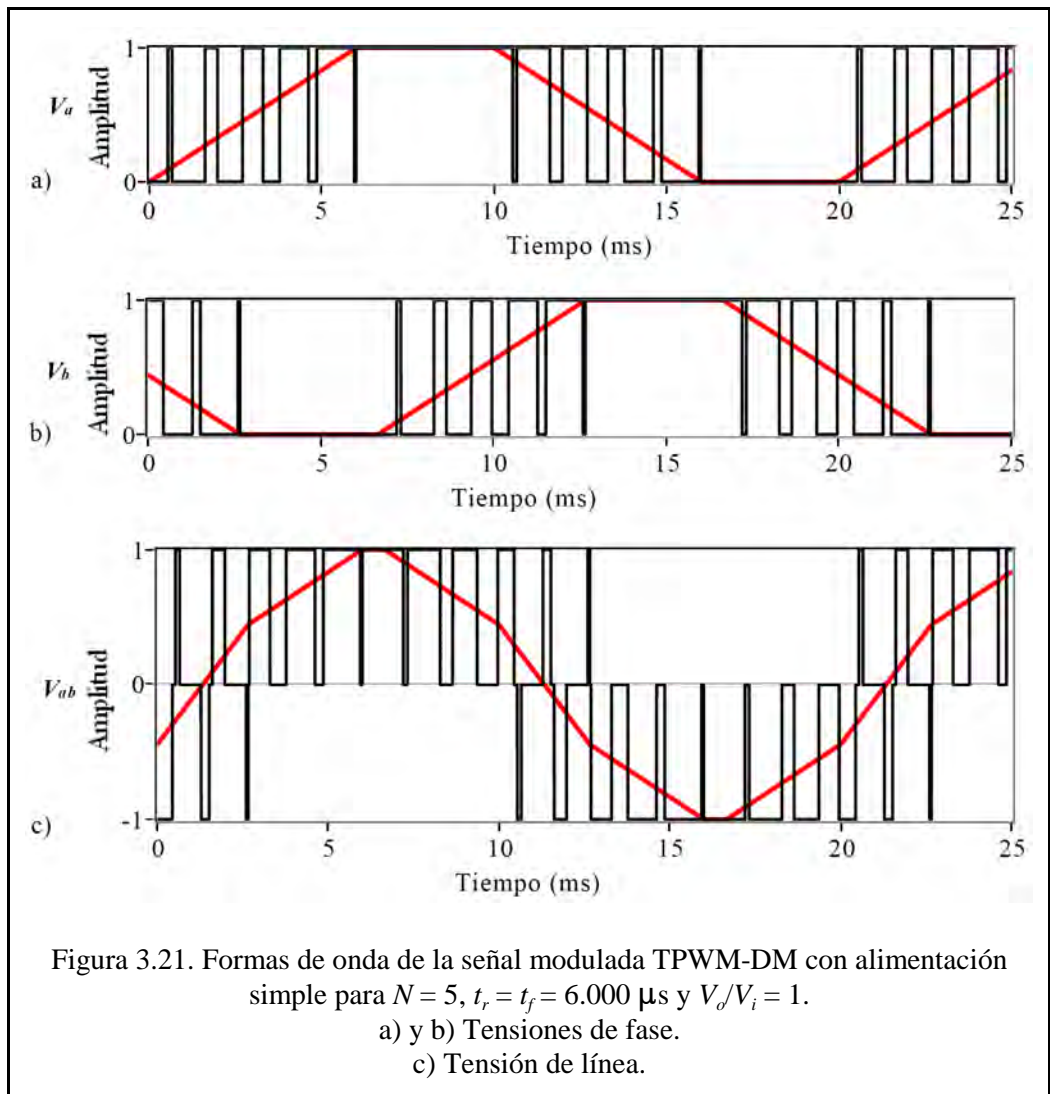
		n_f								
		3			2			1		
t_f	t_{prev_nf}	t_{pulso_nf}	t_{post_nf}	t_{prev_nf}	t_{pulso_nf}	t_{post_nf}	t_{prev_nf}	t_{pulso_nf}	t_{post_nf}	
b) 1.000	34,72	97,22	34,72	20,83	125,00	20,83	6,94	152,78	6,94	
2.000	69,44	194,44	69,44	41,67	250,00	41,67	13,89	305,56	13,89	
3.000	104,17	291,67	104,17	62,50	375,00	62,50	20,83	458,33	20,83	
4.000	138,89	388,89	138,89	83,33	500,00	83,33	27,78	611,11	27,78	
5.000	173,61	486,11	173,61	104,17	625,00	104,17	34,72	763,89	34,72	
6.000	208,33	583,33	208,33	125,00	750,00	125,00	41,67	916,67	41,67	
7.000	243,06	680,56	243,06	145,83	875,00	145,83	48,61	1.069,44	48,61	
8.000	277,78	777,78	277,78	166,67	1.000,00	166,67	55,56	1.222,22	55,56	
9.000	312,50	875,00	312,50	187,50	1.125,00	187,50	62,50	1.375,00	62,50	
10.000	347,22	972,22	347,22	208,33	1.250,00	208,33	69,44	1.527,78	69,44	

Tabla 3.9. Valores de tiempos en cada intervalo del tiempo de bajada para $N = 6$, $V_o/V_i = 1$ y varios valores de t_f .

Las tablas 3.6 y 3.8 definen los instantes de conmutación para $N = 5$. Por su parte, las tablas 3.7 y 3.8 definen los instantes de conmutación para $N = 6$. Estos patrones de conmutación junto con los valores correspondientes de t_H y t_L , que se obtienen de las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3), definen un periodo completo de la forma de onda de la señal modulada.

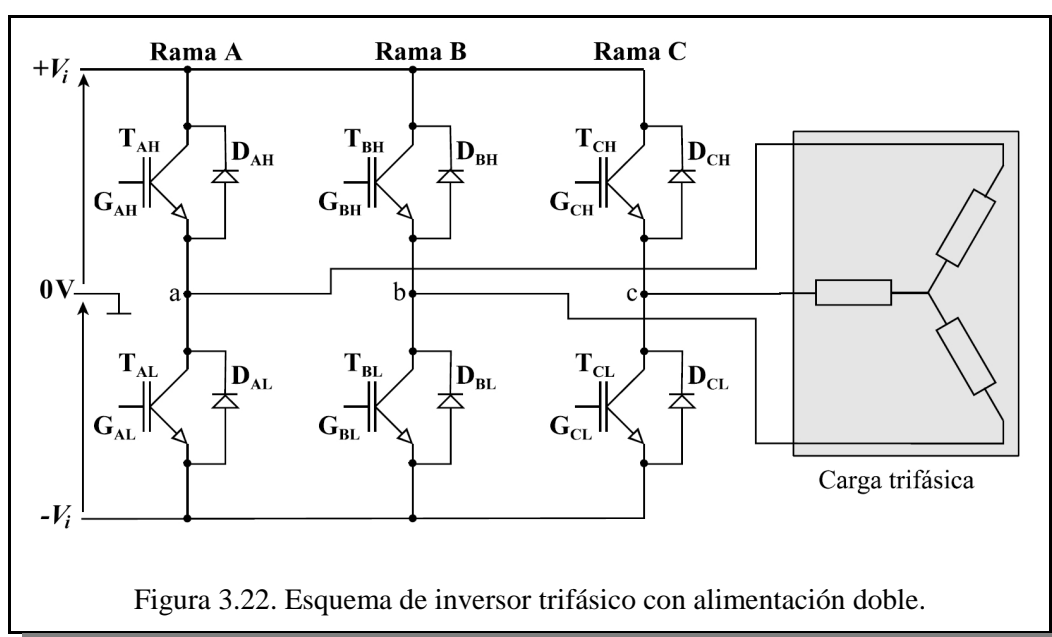
La figura 3.20 muestra las formas de onda, con la amplitud normalizada a la unidad, para las tensiones de fase, a) y b) y de línea, c), que se obtienen a la salida del inversor para $N = 5$, $t_r = t_f = 2.000 \mu\text{s}$, $f = 50 \text{ Hz}$ y $V_o/V_i = 1$. La figura 3.21 muestra las formas de onda para el caso en el que $N = 5$, $t_r = t_f = 6.000 \mu\text{s}$, $f = 50 \text{ Hz}$ y $V_o/V_i = 1$. En ambas figuras se ha representado en color rojo la forma de onda de la señal trapezoidal objetivo de la modulación.





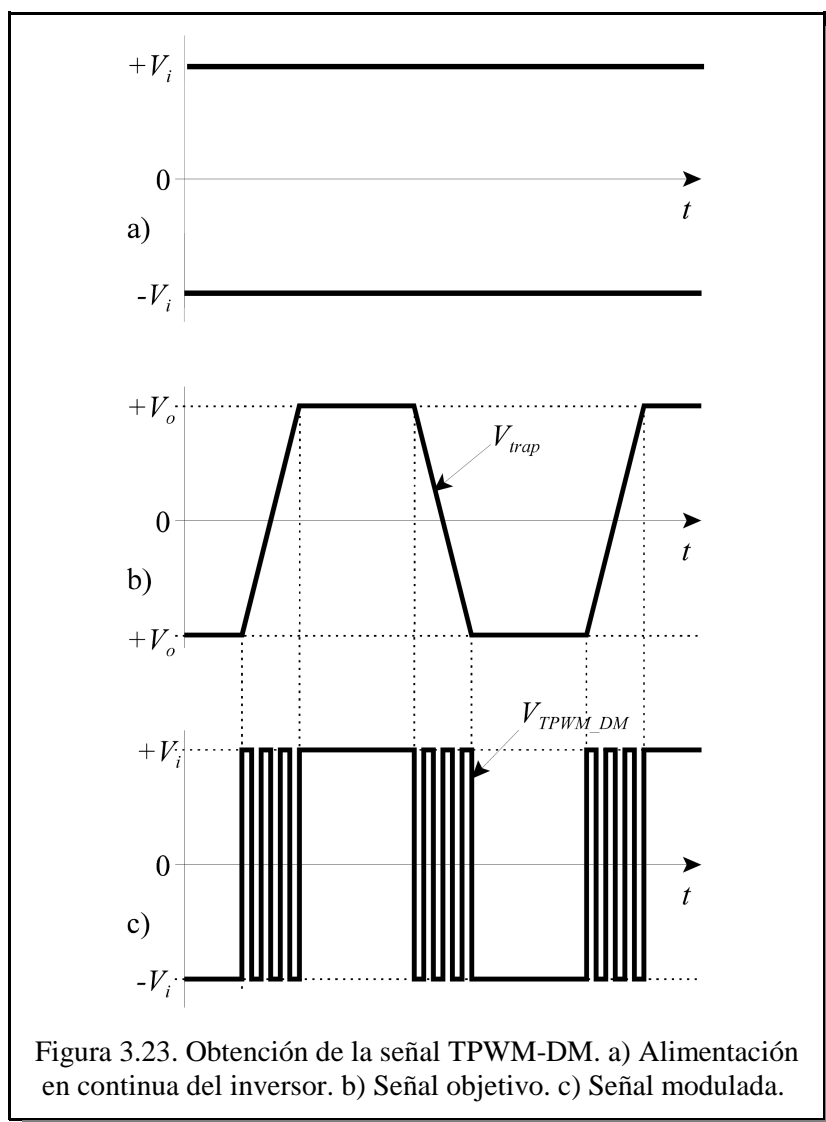
3.4.4 Modulación de la señal en el caso de alimentación doble

En este caso, como se muestra en la figura 3.22, la tensión continua de entrada al inversor (bus de continua) es doble, $\pm V_i$. En la figura 3.23 se muestran las formas de onda correspondientes; en a) se tiene la tensión continua de alimentación del inversor; en b) se ha representado la trapezoidal que se pretende obtener, V_{trap} , cuya amplitud va de $-V_o$ a $+V_o$; y en c) se ha representado la señal modulada, $V_{TPWM-DM}$, que conmuta entre $+V_i$ y $-V_i$. Todas estas gráficas están referidas al punto 0V.



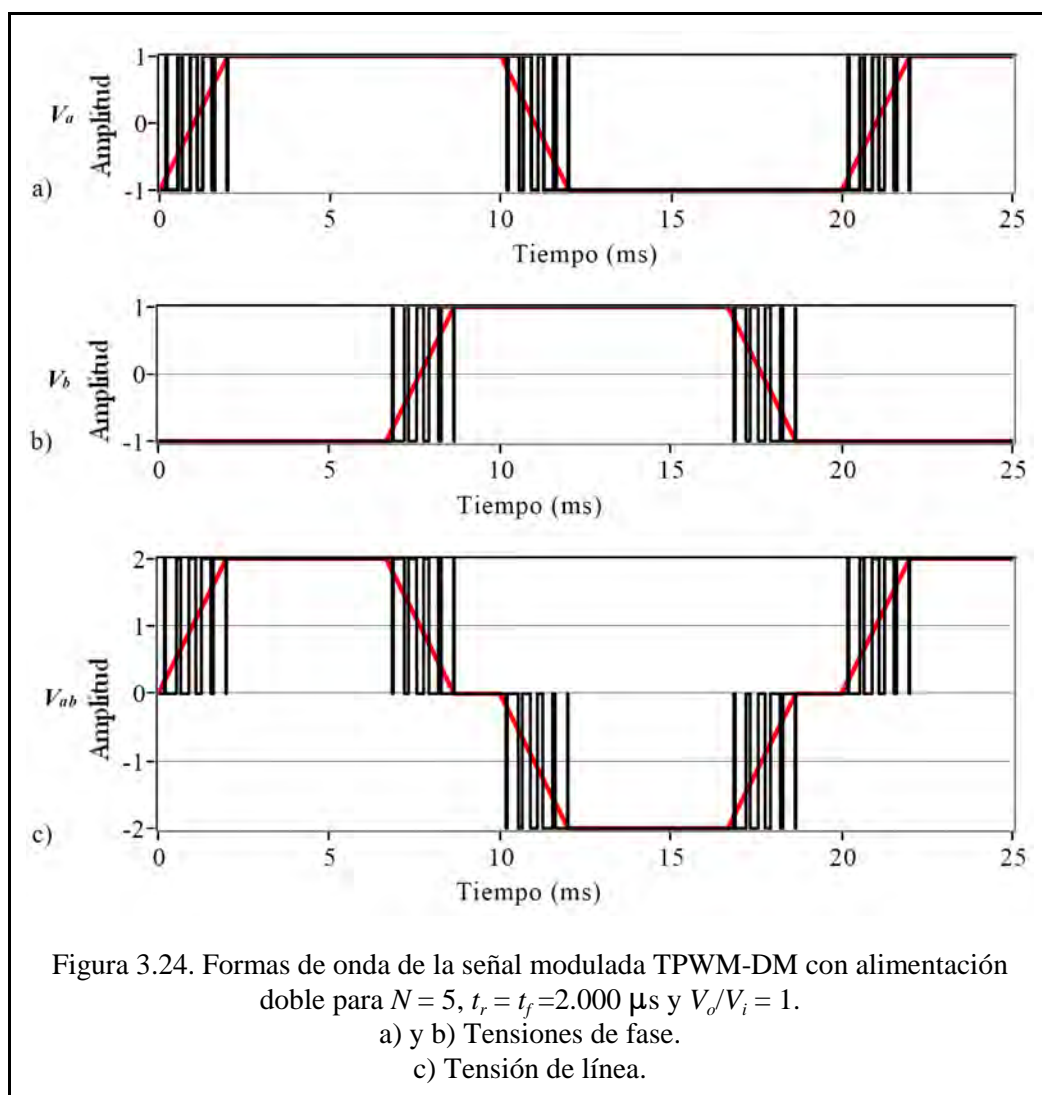
Los patrones de modulación para este caso se pueden obtener tomando como referencia de la tensión de fase (V_a , V_b y V_c) la tensión $-V_i$. De esta forma, el planteamiento es el mismo que en el caso de alimentación simple, salvo que ahora la tensión de alimentación es $2V_i$. Correspondientemente, la referencia de tensión para la señal trapezoidal ha de ser $-V_o$, con lo cual la amplitud de esta señal es $2V_o$. Así, la relación entre las amplitudes de la señal trapezoidal y la modulada se mantiene como antes, ya que:

$$\frac{2V_o}{2V_i} = \frac{V_o}{V_i} \quad (3.39)$$

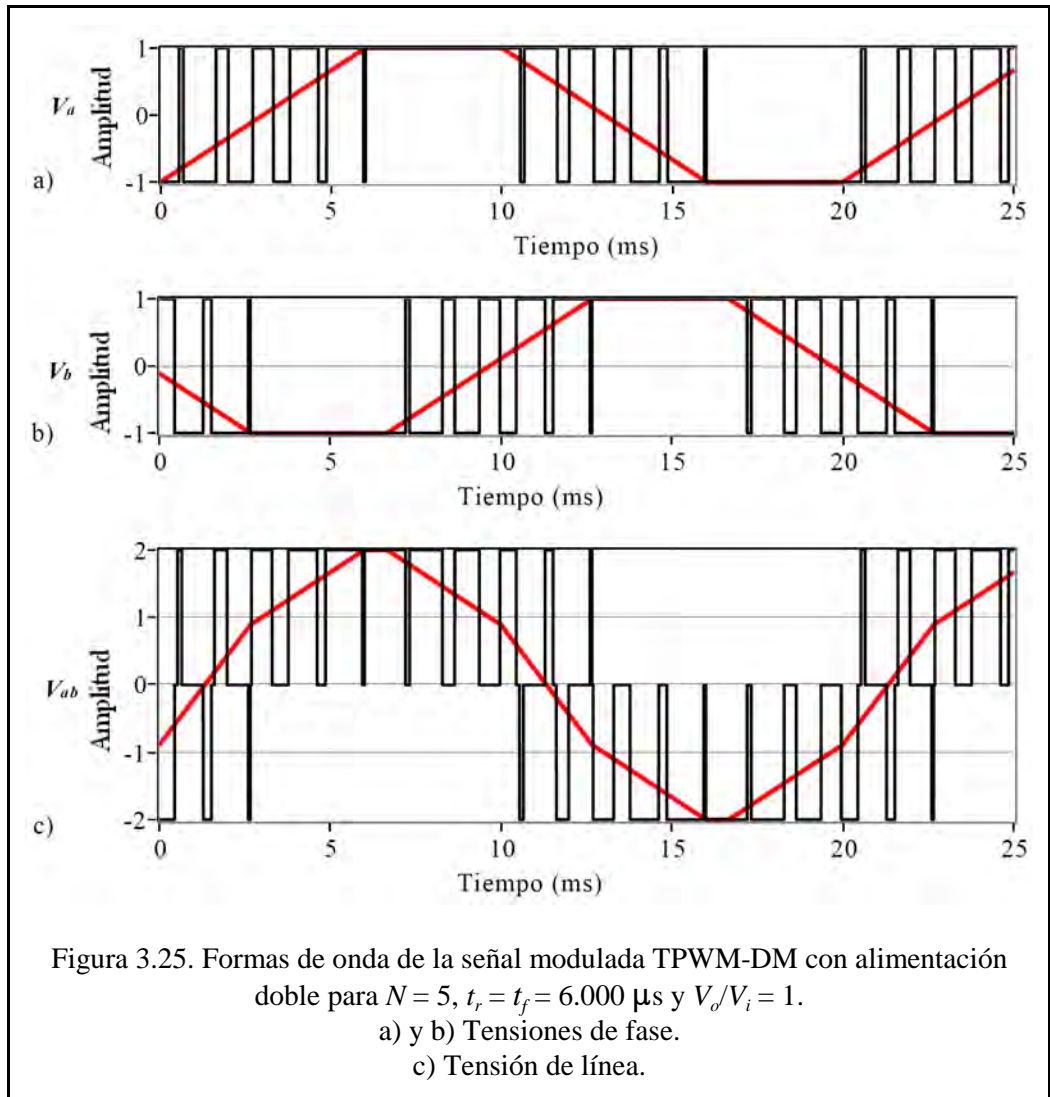


Las ecuaciones de modulación, obtenidas en el apartado 3.4.3.1, que definen los patrones de conmutación para los tiempos de subida y bajada de la señal modulada, son válidas también para este caso ya que geoméricamente la única diferencias es la amplitud de las señales, y ya se ha visto que su relación permanece constante, según la ecuación (3.39).

Sin embargo las formas de onda sí son diferentes. Las figuras 3.24 y 3.25 muestran dos conjunto de formas de onda de fase y línea. Hay que hacer notar que en estas figuras, las tensiones de fase están referenciadas a 0V, como en las figuras 3.20 y 3.21. Las señales de fase son, en este caso, alternas con los mismos patrones



de conmutación que en el caso de alimentación simple (figuras 3.20 y 3.21). La forma de onda de la tensión resultante línea - línea es idéntica a la obtenida en el caso de alimentación simple en cuanto a tiempos pero con amplitud doble, suponiendo que V_i es el mismo valor de tensión tanto en el caso de alimentación simple como en el de alimentación doble. Desde el punto de vista de la carga trifásica, ambos casos son iguales en cuanto a tiempos pero diferentes en cuanto a la amplitud. En estas figuras se ha representado con trazo rojo la señal trapezoidal objetivo. Ambas figuras son para $N = 5$, $f = 50 \text{ Hz}$ y $V_o/V_i = 1$. En la figura 3.24 se tiene $t_r = t_f = 2.000 \mu s$, mientras que la figura 3.25, es $t_r = t_f = 6.000 \mu s$.



3.5 Construcción de la señal modulada

En los apartados anteriores se ha modulado la señal trapezoidal durante el tiempo de subida, t_r , y el de bajada, t_f . Para construir la señal trapezoidal modulada, se utilizan las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3), que se repiten a continuación:

$$T = t_H + t_L + t_r + t_f \quad t_H = t_L \quad t_r = t_f$$

por lo que la ecuación (3.1) puede reescribirse como sigue:

$$T = 2t_L + 2t_r \quad (3.40)$$

es decir:

$$t_L = t_H = \frac{1}{2}(T - 2t_r) \quad (3.41)$$

De donde se deduce que los valores de t_L y t_H se obtienen a partir de los parámetros de la señal como son la duración del tiempo de subida, t_r , y la frecuencia de la señal $f = 1/T$.

Lo que sigue son dos ejemplos de aplicación para $N = 5$ y $N = 6$, a partir de los valores calculados para la duración de los pulsos en las tablas 3.6 y 3.7, para los tiempos de subida, y las tablas 3.8 y 3.9, para los tiempos de bajada, se construyen las tabla 3.10 y 3.13. Concatenando los valores de cada fila de la tabla 3.6 (3.8) con los valores correspondientes de t_H , según sea el valor de t_r , calculado por medio de la ecuación (3.41), los valores de la misma fila de la tabla 3.7 (3.9) y los valores correspondientes de t_L , se define un periodo completo de la forma de onda modulada TPWM-DM. Esta concatenación es lo que se ha hecho para construir la tabla 3.10, para $N = 5$, y la tabla 3.13, para $N = 6$. En ellas, la columna encabezada como n es la que identifica el número de orden de los intervalos de modulación, tanto en el tiempo de subida como en el tiempo de bajada. En estos casos, n toma valores entre 1 y N . Como puede verse, tanto durante t_r como durante t_f hay cinco (seis) intervalos numerados de 1 a 5 (1 a 6). Cada intervalo contiene tres apartados, “a”, “b” y “c”, que corresponden al tiempo previo, el tiempo de pulso y el tiempo posterior de cada intervalo, respectivamente, como se han descrito en los apartados anteriores.

La columna encabezada como Nivel identifica el nivel digital de control; H corresponde al nivel alto, y L al nivel bajo.

		$t_r = t_f$											
n	Nivel	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000	10.000	Uds.	
Tiempo de subida	1	a L	90,00	180,00	270,00	360,00	450,00	540,00	630,00	720,00	810,00	900,00	μs
		b H	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	180,00	200,00	
		c L	90,00	180,00	270,00	360,00	450,00	540,00	630,00	720,00	810,00	900,00	
	2	a L	70,00	140,00	210,00	280,00	350,00	420,00	490,00	560,00	630,00	700,00	
		b H	60,00	120,00	180,00	240,00	300,00	360,00	420,00	480,00	540,00	600,00	
		c L	70,00	140,00	210,00	280,00	350,00	420,00	490,00	560,00	630,00	700,00	
	3	a L	50,00	100,00	150,00	200,00	250,00	300,00	350,00	400,00	450,00	500,00	
		b H	100,00	200,00	300,00	400,00	500,00	600,00	700,00	800,00	900,00	1.000,00	
		c L	50,00	100,00	150,00	200,00	250,00	300,00	350,00	400,00	450,00	500,00	
	4	a L	30,00	60,00	90,00	120,00	150,00	180,00	210,00	240,00	270,00	300,00	
		b H	140,00	280,00	420,00	560,00	700,00	840,00	980,00	1.120,00	1.260,00	1.400,00	
		c L	30,00	60,00	90,00	120,00	150,00	180,00	210,00	240,00	270,00	300,00	
	5	a L	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	
		b H	180,00	360,00	540,00	720,00	900,00	1.080,00	1.260,00	1.440,00	1.620,00	1.800,00	
		c L	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	
t_H	H	9.000,00	8.000,00	7.000,00	6.000,00	5.000,00	4.000,00	3.000,00	2.000,00	1.000,00	0,00		
Tiempo de bajada	5	a H	90,00	180,00	270,00	360,00	450,00	540,00	630,00	720,00	810,00	900,00	
		b L	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	180,00	200,00	
		c H	90,00	180,00	270,00	360,00	450,00	540,00	630,00	720,00	810,00	900,00	
	4	a H	70,00	140,00	210,00	280,00	350,00	420,00	490,00	560,00	630,00	700,00	
		b L	60,00	120,00	180,00	240,00	300,00	360,00	420,00	480,00	540,00	600,00	
		c H	70,00	140,00	210,00	280,00	350,00	420,00	490,00	560,00	630,00	700,00	
	3	a H	50,00	100,00	150,00	200,00	250,00	300,00	350,00	400,00	450,00	500,00	
		b L	100,00	200,00	300,00	400,00	500,00	600,00	700,00	800,00	900,00	1.000,00	
		c H	50,00	100,00	150,00	200,00	250,00	300,00	350,00	400,00	450,00	500,00	
	2	a H	30,00	60,00	90,00	120,00	150,00	180,00	210,00	240,00	270,00	300,00	
		b L	140,00	280,00	420,00	560,00	700,00	840,00	980,00	1.120,00	1.260,00	1.400,00	
		c H	30,00	60,00	90,00	120,00	150,00	180,00	210,00	240,00	270,00	300,00	
	1	a H	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	
		b L	180,00	360,00	540,00	720,00	900,00	1.080,00	1.260,00	1.440,00	1.620,00	1.800,00	
		c H	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	
t_L	L	9.000,00	8.000,00	7.000,00	6.000,00	5.000,00	4.000,00	3.000,00	2.000,00	1.000,00	0,00		
Σ			20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00		

Tabla 3.10. Valores de tiempo de cada uno de los niveles que forman cada intervalo de modulación de una señal TPWM-DM para $N = 5$, $f = 50$ Hz y varios valores de $t_r = t_f$, desde 1.000 μs hasta 10.000 μs.

Las columnas bajo la cabecera $t_r = t_f$ contienen los valores de la duración de cada tiempo en cada intervalo, calculados como se ha descrito antes para distintos valores de los tiempos de subida y bajada, desde 1.000 μs (1 ms) hasta 10.000 μs (10 ms), a paso de 1.000 μs (1 ms), en un periodo completo de la señal. En la fila de abajo siguiente al intervalo número cinco del tiempo de subida, en la tabla 3.10 (seis, en la tabla 3.13) se ha situado el tiempo que la señal se ha de mantener a nivel alto sin modulación, t_H , para, a continuación, dar paso a los tiempos de los distintos intervalos del tiempo de bajada. Debajo del último intervalo del tiempo de bajada (intervalo número uno) se ha colocado el valor del tiempo que la señal se ha de mantener a nivel bajo sin modulación, t_L

		$t_r = t_f$											
Nivel		1,000	2,000	3,000	4,000	5,000	6,000	7,000	8,000	9,000	10,000	Uds.	
T i e m p o d e s u b i d a	L	90,00	180,00	270,00	360,00	450,00	540,00	630,00	720,00	810,00	900,00	μs	
	H	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	180,00	200,00		
	L	160,00	320,00	480,00	640,00	800,00	960,00	1120,00	1280,00	1440,00	1600,00		
	H	60,00	120,00	180,00	240,00	300,00	360,00	420,00	480,00	540,00	600,00		
	L	120,00	240,00	360,00	480,00	600,00	720,00	840,00	960,00	1080,00	1200,00		
	H	100,00	200,00	300,00	400,00	500,00	600,00	700,00	800,00	900,00	1000,00		
	L	80,00	160,00	240,00	320,00	400,00	480,00	560,00	640,00	720,00	800,00		
	H	140,00	280,00	420,00	560,00	700,00	840,00	980,00	1120,00	1260,00	1400,00		
	L	40,00	80,00	120,00	160,00	200,00	240,00	280,00	320,00	360,00	400,00		
	H	180,00	360,00	540,00	720,00	900,00	1080,00	1260,00	1440,00	1620,00	1800,00		
	L	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00		
	t_H	H	9000,00	8000,00	7000,00	6000,00	5000,00	4000,00	3000,00	2000,00	1000,00		0,00
	T i e m p o d e b a j a d a	H	90,00	180,00	270,00	360,00	450,00	540,00	630,00	720,00	810,00		900,00
		L	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	180,00		200,00
H		160,00	320,00	480,00	640,00	800,00	960,00	1120,00	1280,00	1440,00	1600,00		
L		60,00	120,00	180,00	240,00	300,00	360,00	420,00	480,00	540,00	600,00		
H		120,00	240,00	360,00	480,00	600,00	720,00	840,00	960,00	1080,00	1200,00		
L		100,00	200,00	300,00	400,00	500,00	600,00	700,00	800,00	900,00	1000,00		
H		80,00	160,00	240,00	320,00	400,00	480,00	560,00	640,00	720,00	800,00		
L		140,00	280,00	420,00	560,00	700,00	840,00	980,00	1120,00	1260,00	1400,00		
H		40,00	80,00	120,00	160,00	200,00	240,00	280,00	320,00	360,00	400,00		
L		180,00	360,00	540,00	720,00	900,00	1080,00	1260,00	1440,00	1620,00	1800,00		
H	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00			
t_L	L	9.000,00	8.000,00	7.000,00	6.000,00	5.000,00	4.000,00	3.000,00	2.000,00	1.000,00	0,00		
Σ		20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00		

Tabla 3.11. Vectores HL $N = 5$, $f = 50$ Hz y varios valores de t_r y t_f , desde 1.000 μs hasta 10.000 μs .

La suma de los valores de cada columna es siempre el valor del periodo de la señal modulada, que en el caso de estas tablas es 20.000, ya que está calculada para una frecuencia $f = 50 \text{ Hz}$ ($T = 20.000 \mu\text{s}$). El hecho de usar como unidad de tiempo el μs y no otra, es para facilitar la implementación del algoritmo de modulación por medio de microcontroladores. Sin embargo esto no deja de ser un caso práctico particular. De una forma general, la unidad de tiempo a utilizar puede ser cualquiera, siempre que cumpla con los requisitos de precisión en los tiempos calculados.

Cada columna de la tabla 3.10 (tabla 3.13) representa un periodo completo de la forma de onda de la señal modulada TPWM-DM para los distintos valores de los tiempos de subida y bajada. En esta tabla se puede observar que cada intervalo de modulación del tiempo de subida empieza y acaba en nivel L, y que cada intervalo

		$t_r = t_f$										
	Nivel	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000	10.000	Uds.
1	H	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	180,00	200,00	μs
2	L	160,00	320,00	480,00	640,00	800,00	960,00	1.120,00	1.280,00	1.440,00	1.600,00	
3	H	60,00	120,00	180,00	240,00	300,00	360,00	420,00	480,00	540,00	600,00	
4	L	120,00	240,00	360,00	480,00	600,00	720,00	840,00	960,00	1.080,00	1.200,00	
5	H	100,00	200,00	300,00	400,00	500,00	600,00	700,00	800,00	900,00	1.000,00	
6	L	80,00	160,00	240,00	320,00	400,00	480,00	560,00	640,00	720,00	800,00	
7	H	140,00	280,00	420,00	560,00	700,00	840,00	980,00	1.120,00	1.260,00	1.400,00	
8	L	40,00	80,00	120,00	160,00	200,00	240,00	280,00	320,00	360,00	400,00	
9	H	180,00	360,00	540,00	720,00	900,00	1.080,00	1.260,00	1.440,00	1.620,00	1.800,00	
10	L	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	
11	H	9.090,00	8.180,00	7.270,00	6.360,00	5.450,00	4.540,00	3.630,00	2.720,00	1.810,00	900,00	
12	L	20,00	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	180,00	200,00	
13	H	160,00	320,00	480,00	640,00	800,00	960,00	1.120,00	1.280,00	1.440,00	1.600,00	
14	L	60,00	120,00	180,00	240,00	300,00	360,00	420,00	480,00	540,00	600,00	
15	H	120,00	240,00	360,00	480,00	600,00	720,00	840,00	960,00	1.080,00	1.200,00	
16	L	100,00	200,00	300,00	400,00	500,00	600,00	700,00	800,00	900,00	1.000,00	
17	H	80,00	160,00	240,00	320,00	400,00	480,00	560,00	640,00	720,00	800,00	
18	L	140,00	280,00	420,00	560,00	700,00	840,00	980,00	1.120,00	1.260,00	1.400,00	
19	H	40,00	80,00	120,00	160,00	200,00	240,00	280,00	320,00	360,00	400,00	
20	L	180,00	360,00	540,00	720,00	900,00	1.080,00	1.260,00	1.440,00	1.620,00	1.800,00	
21	H	10,00	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00	100,00	
22	L	9.090,00	8.180,00	7.270,00	6.360,00	5.450,00	4.540,00	3.630,00	2.720,00	1.810,00	900,00	
	Σ	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	

Tabla 3.12. Valores finales de los vectores HL para una señal TPWM-DM con $N = 5$, $f = 50 \text{ Hz}$ y varios valores de t_r y t_f , desde $1.000 \mu\text{s}$ hasta $10.000 \mu\text{s}$.

		$t_r = t_f$										Uds.
n	Nivel	1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000	10.000	
Tiempo de subida	1	a L	76,39	152,78	229,17	305,56	381,94	458,33	534,72	611,11	687,50	763,89
		b H	13,89	27,78	41,67	55,56	69,44	83,33	97,22	111,11	125,00	138,89
		c L	76,39	152,78	229,17	305,56	381,94	458,33	534,72	611,11	687,50	763,89
	2	a L	62,50	125,00	187,50	250,00	312,50	375,00	437,50	500,00	562,50	625,00
		b H	41,67	83,33	125,00	166,67	208,33	250,00	291,67	333,33	375,00	416,67
		c L	62,50	125,00	187,50	250,00	312,50	375,00	437,50	500,00	562,50	625,00
	3	a L	48,61	97,22	145,83	194,44	243,06	291,67	340,28	388,89	437,50	486,11
		b H	69,44	138,89	208,33	277,78	347,22	416,67	486,11	555,56	625,00	694,44
		c L	48,61	97,22	145,83	194,44	243,06	291,67	340,28	388,89	437,50	486,11
	4	a L	34,72	69,44	104,17	138,89	173,61	208,33	243,06	277,78	312,50	347,22
		b H	97,22	194,44	291,67	388,89	486,11	583,33	680,56	777,78	875,00	972,22
		c L	34,72	69,44	104,17	138,89	173,61	208,33	243,06	277,78	312,50	347,22
	5	a L	20,83	41,67	62,50	83,33	104,17	125,00	145,83	166,67	187,50	208,33
		b H	125,00	250,00	375,00	500,00	625,00	750,00	875,00	1.000,00	1.125,00	1.250,00
		c L	20,83	41,67	62,50	83,33	104,17	125,00	145,83	166,67	187,50	208,33
	6	a L	6,94	13,89	20,83	27,78	34,72	41,67	48,61	55,56	62,50	69,44
		b H	152,78	305,56	458,33	611,11	763,89	916,67	1.069,44	1.222,22	1.375,00	1.527,78
		c L	6,94	13,89	20,83	27,78	34,72	41,67	48,61	55,56	62,50	69,44
t_H	H	9.000,00	8.000,00	7.000,00	6.000,00	5.000,00	4.000,00	3.000,00	2.000,00	1.000,00	0,00	
Tiempo de bajada	6	a H	76,39	152,78	229,17	305,56	381,94	458,33	534,72	611,11	687,50	763,89
		b L	13,89	27,78	41,67	55,56	69,44	83,33	97,22	111,11	125,00	138,89
		c H	76,39	152,78	229,17	305,56	381,94	458,33	534,72	611,11	687,50	763,89
	5	a H	62,50	125,00	187,50	250,00	312,50	375,00	437,50	500,00	562,50	625,00
		b L	41,67	83,33	125,00	166,67	208,33	250,00	291,67	333,33	375,00	416,67
		c H	62,50	125,00	187,50	250,00	312,50	375,00	437,50	500,00	562,50	625,00
	4	a H	48,61	97,22	145,83	194,44	243,06	291,67	340,28	388,89	437,50	486,11
		b L	69,44	138,89	208,33	277,78	347,22	416,67	486,11	555,56	625,00	694,44
		c H	48,61	97,22	145,83	194,44	243,06	291,67	340,28	388,89	437,50	486,11
	3	a H	34,72	69,44	104,17	138,89	173,61	208,33	243,06	277,78	312,50	347,22
		b L	97,22	194,44	291,67	388,89	486,11	583,33	680,56	777,78	875,00	972,22
		c H	34,72	69,44	104,17	138,89	173,61	208,33	243,06	277,78	312,50	347,22
	2	a H	20,83	41,67	62,50	83,33	104,17	125,00	145,83	166,67	187,50	208,33
		b L	125,00	250,00	375,00	500,00	625,00	750,00	875,00	1.000,00	1.125,00	1.250,00
		c H	20,83	41,67	62,50	83,33	104,17	125,00	145,83	166,67	187,50	208,33
	1	a H	6,94	13,89	20,83	27,78	34,72	41,67	48,61	55,56	62,50	69,44
		b L	152,78	305,56	458,33	611,11	763,89	916,67	1.069,44	1.222,22	1.375,00	1.527,78
		c H	6,94	13,89	20,83	27,78	34,72	41,67	48,61	55,56	62,50	69,44
t_L	L	9.000,00	8.000,00	7.000,00	6.000,00	5.000,00	4.000,00	3.000,00	2.000,00	1.000,00	0,00	
Σ		20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	20.000,00	

Tabla 3.13. Valores de tiempo de cada uno de los niveles que forman cada intervalo de modulación de una señal TPWM-DM para $N = 6$, $f = 50$ Hz y varios valores de $t_r = t_f$, desde 1.000 μ s hasta 10.000 μ s.

de modulación del tiempo de bajada empieza y acaba en nivel H. Esto significa que es posible simplificar esta tabla agrupando los valores de tiempo de los niveles L adyacentes en el tiempo de subida y los de los niveles H adyacentes en el tiempo de bajada, obteniendo así una tabla más compacta y simplificada que es la que se muestra como tabla 3.11 (tabla 3.14).

En la tabla 3.11, el tiempo de subida, t_r , ocupa las once (trece) primeras filas de valores, le sigue la fila del tiempo en alto, t_H , para a continuación seguir con los

		$t_r = t_f$										
Nivel		1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000	10.000	Uds.
Tiempo de subida	L	76,39	152,78	229,17	305,56	381,94	458,33	534,72	611,11	687,50	763,89	μs
	H	13,89	27,78	41,67	55,56	69,44	83,33	97,22	111,11	125,00	138,89	
	L	138,89	277,78	416,67	555,56	694,44	833,33	972,22	1.111,11	1.250,00	1.388,89	
	H	41,67	83,33	125,00	166,67	208,33	250,00	291,67	333,33	375,00	416,67	
	L	111,11	222,22	333,33	444,44	555,56	666,67	777,78	888,89	1.000,00	1.111,11	
	H	69,44	138,89	208,33	277,78	347,22	416,67	486,11	555,56	625,00	694,44	
	L	83,33	166,67	250,00	333,33	416,67	500,00	583,33	666,67	750,00	833,33	
	H	97,22	194,44	291,67	388,89	486,11	583,33	680,56	777,78	875,00	972,22	
	L	55,56	111,11	166,67	222,22	277,78	333,33	388,89	444,44	500,00	555,56	
	H	125,00	250,00	375,00	500,00	625,00	750,00	875,00	1.000,00	1.125,00	1.250,00	
	L	27,78	55,56	83,33	111,11	138,89	166,67	194,44	222,22	250,00	277,78	
	H	152,78	305,56	458,33	611,11	763,89	916,67	1.069,44	1.222,22	1.375,00	1.527,78	
	L	6,94	13,89	20,83	27,78	34,72	41,67	48,61	55,56	62,50	69,44	
t_H	H	9.000,00	8.000,00	7.000,00	6.000,00	5.000,00	4.000,00	3.000,00	2.000,00	1.000,00	0,00	
Tiempo de bajada	H	76,39	152,78	229,17	305,56	381,94	458,33	534,72	611,11	687,50	763,89	
	L	13,89	27,78	41,67	55,56	69,44	83,33	97,22	111,11	125,00	138,89	
	H	138,89	277,78	416,67	555,56	694,44	833,33	972,22	1.111,11	1.250,00	1.388,89	
	L	41,67	83,33	125,00	166,67	208,33	250,00	291,67	333,33	375,00	416,67	
	H	111,11	222,22	333,33	444,44	555,56	666,67	777,78	888,89	1.000,00	1.111,11	
	L	69,44	138,89	208,33	277,78	347,22	416,67	486,11	555,56	625,00	694,44	
	H	83,33	166,67	250,00	333,33	416,67	500,00	583,33	666,67	750,00	833,33	
	L	97,22	194,44	291,67	388,89	486,11	583,33	680,56	777,78	875,00	972,22	
	H	55,56	111,11	166,67	222,22	277,78	333,33	388,89	444,44	500,00	555,56	
	L	125,00	250,00	375,00	500,00	625,00	750,00	875,00	1.000,00	1.125,00	1.250,00	
	H	27,78	55,56	83,33	111,11	138,89	166,67	194,44	222,22	250,00	277,78	
	L	152,78	305,56	458,33	611,11	763,89	916,67	1.069,44	1.222,22	1.375,00	1.527,78	
	H	6,94	13,89	20,83	27,78	34,72	41,67	48,61	55,56	62,50	69,44	
t_L	L	9.000,00	8.000,00	7.000,00	6.000,00	5.000,00	4.000,00	3.000,00	2.000,00	1.000,00	0,00	
Σ		20.000,00	20.000,02	20.000,00	20.000,02	19.999,98	20.000,00	19.999,98	20.000,00	20.000,00	20.000,00	

Tabla 3.14. Tabla de vectores HL para $N = 6$, $f = 50$ Hz y varios valores de t_r y t_f , desde 1.000 μs a 10.000 μs.

valores, otros once (trece), del tiempo de bajada y, por último, el valor del tiempo en nivel bajo, t_L . Estas tablas se pueden simplificar agrupando los valores de tiempo de los estados H de la fila t_H y la primera fila del tiempo de bajada y agrupando también la fila de t_L con la primera fila del tiempo de subida, quedando finalmente en cada columna un vector HL de 22 (26) elementos, formado como se muestra en la tabla 3.12 (3.15). Esto es posible hacerlo gracias a que el proceso de obtención de la señal de salida es cíclico, repitiendo cada 20 ms los valores de esta tabla, enlazando la fila 22 (26) con la fila 1.

		$t_r = t_f$										
Nivel		1.000	2.000	3.000	4.000	5.000	6.000	7.000	8.000	9.000	10.000	Uds.
1	H	13,89	27,78	41,67	55,56	69,44	83,33	97,22	111,11	125,00	138,89	μs
2	L	138,89	277,78	416,67	555,56	694,44	833,33	972,22	1.111,11	1.250,00	1.388,89	
3	H	41,67	83,33	125,00	166,67	208,33	250,00	291,67	333,33	375,00	416,67	
4	L	111,11	222,22	333,33	444,44	555,56	666,67	777,78	888,89	1.000,00	1.111,11	
5	H	69,44	138,89	208,33	277,78	347,22	416,67	486,11	555,56	625,00	694,44	
6	L	83,33	166,67	250,00	333,33	416,67	500,00	583,33	666,67	750,00	833,33	
7	H	97,22	194,44	291,67	388,89	486,11	583,33	680,56	777,78	875,00	972,22	
8	L	55,56	111,11	166,67	222,22	277,78	333,33	388,89	444,44	500,00	555,56	
9	H	125,00	250,00	375,00	500,00	625,00	750,00	875,00	1.000,00	1.125,00	1.250,00	
10	L	27,78	55,56	83,33	111,11	138,89	166,67	194,44	222,22	250,00	277,78	
11	H	152,78	305,56	458,33	611,11	763,89	916,67	1.069,44	1.222,22	1.375,00	1.527,78	
12	L	6,94	13,89	20,83	27,78	34,72	41,67	48,61	55,56	62,50	69,44	
13	H	9.076,39	8.152,78	7.229,17	6.305,56	5.381,94	4.458,33	3.534,72	2.611,11	1.687,50	763,89	
14	L	13,89	27,78	41,67	55,56	69,44	83,33	97,22	111,11	125,00	138,89	
15	H	138,89	277,78	416,67	555,56	694,44	833,33	972,22	1.111,11	1.250,00	1.388,89	
16	L	41,67	83,33	125,00	166,67	208,33	250,00	291,67	333,33	375,00	416,67	
17	H	111,11	222,22	333,33	444,44	555,56	666,67	777,78	888,89	1.000,00	1.111,11	
18	L	69,44	138,89	208,33	277,78	347,22	416,67	486,11	555,56	625,00	694,44	
19	H	83,33	166,67	250,00	333,33	416,67	500,00	583,33	666,67	750,00	833,33	
20	L	97,22	194,44	291,67	388,89	486,11	583,33	680,56	777,78	875,00	972,22	
21	H	55,56	111,11	166,67	222,22	277,78	333,33	388,89	444,44	500,00	555,56	
22	L	125,00	250,00	375,00	500,00	625,00	750,00	875,00	1.000,00	1.125,00	1.250,00	
23	H	27,78	55,56	83,33	111,11	138,89	166,67	194,44	222,22	250,00	277,78	
24	L	152,78	305,56	458,33	611,11	763,89	916,67	1.069,44	1.222,22	1.375,00	1.527,78	
25	H	6,94	13,89	20,83	27,78	34,72	41,67	48,61	55,56	62,50	69,44	
26	L	9.076,39	8.152,78	7.229,17	6.305,56	5.381,94	4.458,33	3.534,72	2.611,11	1.687,50	763,89	
	Σ	20.000,00	20.000,02	20.000,00	20.000,02	19.999,98	20.000,00	19.999,98	20.000,00	20.000,00	20.000,00	

Tabla 3.15. Valores finales de los vectores HL para una señal modulada TPWM-DM de 50 Hz, $N = 6$ y $t_r = 1.000 \mu s$ a $t_r = 10.000 \mu s$.

Cada una de las columnas, 1.000, 2.000, ..., 10.000, de estas tablas contiene un vector HL que define totalmente la forma de onda de un periodo completo de señal modulada para el valor del tiempo de subida y de bajada correspondiente.

Recorriendo las columnas de estas tablas desde arriba hacia abajo, se tiene la secuencia de tiempos que la señal de control del inversor ha de mantener en los niveles indicados, H y L, por cada periodo de la señal. Así, por ejemplo, para un tiempo de subida de la señal de 3 ms (columna 3.000), la secuencia es como sigue: 60,00 μs (41,67 μs) a nivel alto; 480,00 μs (416,67 μs) a nivel bajo; 180,00 μs (125,00 μs) a nivel alto; 360,00 μs (333,33 μs) a nivel bajo, y así sucesivamente.

3.5.1 El vector-semilla

Observando detalladamente las tablas 3.12 y 3.15, se deduce que hay un patrón que relaciona los valores de las diferentes columnas de los tiempos de subida y bajada, de forma que cada columna puede ser calculada a partir de cualquiera de las anteriores o de cualquiera de las siguientes. Si se toma como referencia los valores de una de las columnas, los valores de las demás columnas se obtienen multiplicando los de esta columna por un factor de conversión adimensional C tal que:

$$C = \frac{t_r}{t_{r_ref}} \quad (3.42)$$

donde t_r es el valor del tiempo de subida que se pretende obtener, y t_{r_ref} es el valor del tiempo de subida que se utiliza como referencia.

En el supuesto de tomar como referencia $t_{r_ref} = 1.000 \mu\text{s}$, los valores de tiempos para $t_r = 6.000 \mu\text{s}$ se obtienen multiplicando los valores de tiempos para $t_r = 1.000 \mu\text{s}$ por $C = 6$. Para obtener los valores de tiempos para $t_r = 2.500 \mu\text{s}$, el factor es $C = 2,5$. Esta característica de linealidad es la que permite que su implementación sobre un microcontrolador de bajo costo sea posible, comportándose además, como un modulador de señal generada en el dispositivo y permitiendo la modificación de los parámetros de la modulación en funcionamiento (on line). Al valor de referencia t_{r_ref} se denomina vector-semilla, y puede ser cualquiera de las columnas de la tabla 3.12, 3.15 u otros valores no incluidos en ellas, siempre que se hayan obtenido utilizando las ecuaciones de modulación de la señal TPWM-DM. El valor de C

depende de cual sea el **vector-semilla** utilizado, según la ecuación (3.42). Utilizando este método se obtienen los patrones de conmutación para cualquier valor de t_r y t_f .

Por otro lado, la simetría de la señal hace que los valores de las filas 1 a 11 de la tabla 3.12 (1 a 13 de la tabla 3.15) sean idénticos a los de las filas 12 a 22 (14 a 25), la diferencia entre ellos es el nivel. Así pues, no es necesario que el vector-semilla contenga 22 (26) datos, basta con 11(13), para los casos que se analizan, ya que los demás se deducen de estos. Además, los valores para t_H y t_L se pueden obtener por diferencia entre el semiperiodo de la señal y la suma de los valores obtenidos para t_r o t_f , con lo cual, el **vector-semilla** puede ser reducido a 10 (12) elementos.

Generalizado lo dicho en el párrafo anterior, el tamaño del vector-semilla, es decir, el número de datos que lo componen, se expresa como sigue:

$$N_{\text{vector-semilla}} = 2N \quad (3.43)$$

donde $N_{\text{vector-semilla}}$ es el número de elementos del vector-semilla y N es el número de pulsos en el tiempo de subida (y bajada).

3.6 Control de la frecuencia

Controlar la frecuencia de la señal modulada es importante en aplicaciones donde sea necesario, por ejemplo, modificar la velocidad de motores. En el caso de utilizar la modulación TPWM-DM, este control se basa en la ecuación (3.1) que se recuerda a continuación:

$$T = t_r + t_f + t_L + t_H$$

que, dada las simetrías necesarias expresadas por las ecuaciones (3.2), se puede reescribir como:

$$T = 2 \cdot t_r + 2 \cdot t_H \quad (3.44)$$

Así pues, para un determinado valor del tiempo de subida y de bajada, $t_r = t_f$, el periodo de la señal (T), y por lo tanto su frecuencia (f), puede ser modificada

dentro de un amplio rango de valores. La tabla 3.16 muestra la frecuencia máxima posible para algunos valores de los tiempos de subida y bajada. La frecuencia máxima se da cuando $t_H = t_L = 0$, es decir para la forma de onda triangular, en donde el periodo de la señal es $T = t_r + t_f$.

Para modificar la frecuencia en una señal modulada TPWM-DM, para un valor determinado de $t_r = t_f$, sólo hay que modificar el valor de t_H y t_L . La modificación de estos los valores de tiempo por parte de un sistema basado en microprocesador no resulta complicada. Utilizando una base de tiempos de un μs , la modificación del periodo de la señal se puede realizar a paso de dos μs , uno en t_H y otro en t_L , para mantener la simetría, lo que significa que es posible modificar la frecuencia en 0,005 Hz para el caso de una señal de 50 Hz, es decir 0,01%.

t_r (ms)	T_{min} (ms)	f_{max} (Hz)	t_r (ms)	T_{min} (ms)	f_{max} (Hz)	t_r (ms)	T_{min} (ms)	f_{max} (Hz)
0,25	0.50	2000,00	5,00	10,00	100,00	10,00	20,00	50,00
0,50	1.00	1000,00	5,50	11,00	90,91	10,50	21,00	47,62
1,00	2.00	500,00	6,00	12,00	83,33	11,00	22,00	45,45
1,50	3.00	333,33	6,50	13,00	76,92	11,50	23,00	43,48
2,00	4.00	250,00	7,00	14,00	71,43	12,00	24,00	41,67
2,50	5.00	200,00	7,50	15,00	66,67	12,50	25,00	40,00
3,00	6.00	166,67	8,00	16,00	62,50	13,00	26,00	38,46
3,50	7.00	142,86	8,50	17,00	58,82	13,50	27,00	37,04
4,00	8.00	125,00	9,00	18,00	55,56	14,00	28,00	35,71
4,50	9.00	111,11	9,50	19,00	52,63	14,50	29,00	34,48

Tabla 3.16. Valores máximos de la frecuencia de la señal TPWM-DM en función de t_r y t_f .

El error en la frecuencia de la señal debido al redondeo de los tiempos de los pulsos puede estimarse en valores máximos en caso peor suponiendo que todos los redondeos deriven en el mismo sentido. Así, por ejemplo, para una modulación con $M = 11$ ($N = 5$) hay 22 valores de tiempos que redondeados al mayor (o al menor) valor supondría un incremento (o disminución) de $22 \times 0,5 \mu s = 11 \mu s$. Suponiendo además, que t_H y t_L también sean redondeados al alza (o a la baja), el periodo de la señal se vería incrementado (o reducido) en $12 \mu s$. Es decir que el periodo de una

señal teórica de 50 Hz ($T = 20.000 \mu\text{s}$), sería en realidad de $20.012 \mu\text{s}$ (o $19.988 \mu\text{s}$), lo que significa una frecuencia de 49,97 Hz (o 50,03 Hz), es decir, una desviación máxima de 0,03 Hz (0,06 %).

Para una frecuencia de 500 Hz ($T = 2.000 \mu\text{s}$), suponiendo $N = 5$, el periodo máximo es de $2.012 \mu\text{s}$, con lo que la frecuencia es de 497,02 Hz, una diferencia de 2,98 Hz (0,6 %).

Conforme el valor de N se incrementa, el error máximo en caso peor se incrementa. En la tabla 3.17 se han calculado algunos valores de frecuencia en caso peor, según el criterio descrito antes para una señal de 50 Hz (nominales). En ella se puede ver que hasta un valor de $N = 50$ (101 pulsos por periodo), el error cometido es bastante inferior al 1%.

N	M	Δt μs	f Hz	Dif.	%	N	M	Δt μs	f Hz	Dif.	%
5	11	11	49,97	0,03	0,06	14	29	29	49,93	0,07	0,14
6	13	13	49,97	0,03	0,07	16	33	33	49,92	0,08	0,16
7	15	15	49,96	0,04	0,07	20	41	41	49,90	0,10	0,20
8	17	17	49,96	0,04	0,08	25	51	51	49,87	0,13	0,25
9	19	19	49,95	0,05	0,09	30	61	61	49,85	0,15	0,30
10	21	21	49,95	0,05	0,10	40	81	81	49,80	0,20	0,40
12	25	25	49,94	0,06	0,12	50	101	101	49,75	0,25	0,50

Tabla 3.17. Error en frecuencia debido al redondeo de los tiempos en caso peor.

Así mismo, este error se incrementa conforme disminuye el periodo de la señal (la frecuencia crece).

En cualquier caso, este error en la frecuencia debido al redondeo de los valores de los pulsos, puede ser minimizado haciendo que los valores de los tiempos t_H y t_L sean calculados por diferencia entre el semiperiodo de la señal y el valor redondeado del tiempo de subida (suma de todos los tiempos redondeados para t_r).

3.7 Control de la amplitud

La amplitud de la señal modulada es posible controlarla por dos métodos:

- Por cambio del tiempo de subida y bajada de la señal
- Por modulación de los intervalos t_H y t_L para $t_r = t_f = \text{constante}$

3.7.1 Control de la amplitud por cambio del tiempo de subida

Como ya se dijo en el apartado 3.3.3, cambiar el tiempo de subida de la señal modulada TPWM-DM implica modificar la amplitud de la señal. Como puede verse en la figura 3.6, conforme el tiempo de subida de la señal se incrementa, la amplitud de la componente fundamental de la misma se reduce. Este hecho permite modificar la amplitud de la señal en un rango que va del 100 %, para cuando el tiempo de subida es cero (señal cuadrada, figura 3.2) hasta el 64 % cuando el tiempo de subida es $T/2$ (señal triangular, figura 3.3), como se ve en la figura 3.6. Hay que observar que modificar la pendiente de la señal modulada consiste en moverse en la tabla 3.12 de los valores de una columna a los valores de otra.

3.7.2 Control de la amplitud por modulación de t_H y t_L

Cuando es necesario mantener constantes los tiempos de subida y bajada de la señal y controlar la amplitud de la señal de salida, se puede hacer uso del factor V_o/V_i que aparece en las ecuaciones de modulación, que calculan los tiempos de los pulsos, para recalcular los valores de las tablas 3.10 a 3.12, para $N = 5$ y las tablas 3.13 a 3.15, para $N = 6$. También hay que modificar la amplitud de la señal durante los intervalos t_H y t_L utilizando modulación PWM. En este caso se trata de la modulación de una tensión continua para reducir su valor. Esto se puede hacer aplicando técnicas similares a la utilizadas en los reductores de tensión por PWM. En esta tesis no desarrolla esta modulación, pero en el Capítulo 8 se propone esto como una futura línea de investigación.

Referencias

- [1] Yoone Ho Kim and Mehrdad Ehsani, “An Algebraic Algorithm for Microcomputer-Based (Direct) Inverter Pulse Width Modulation”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. Ia-23, No. 4, July/August 1987.
- [2] D. Grahame Holmes and Thomas A. Lipo, “Pulse Width Modulation For Power Converters”, IEEE Press, Wiley Interscience 2003, ISBN: 0-471-20814-0. Pag. 146.
- [3] M.J. Meco-Gutierrez, F. Perez- Hidalgo, F. Vargas-Merino and J.R. Heredia-Larrubia, “Pulse width modulation technique with harmonic injection and frequency modulated carrier: formulation and application to an induction motor”. IET Electr. Power Appl., 2007, 1, (5), pp. 714 714–726.
- [4] Mario Meco-Gutierrez, Juan-Ramon Heredia-Larrubia, Francisco Perez-Hidalgo, Antonio Ruiz-Gonzalez and Francisco Vargas-Merino, “Pulse width modulation technique parameter selection with harmonic injection and frequency modulated triangular carrier”. IET Power Electron., 2013, Vol. 6, Iss.5, pp. 954–962.
- [5] Francisco Vargas-Merino, Mario J. Meco-Gutiérrez, Juan R. Heredia-Larrubia, and Antonio Ruiz-Gonzalez, “Low Switching PWM Strategy Using a Carrier Wave Regulated by the Slope of a Trapezoidal Modulator Wave”. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 56, No. 6, June 2009.
- [6] Daniel W. Hart, “Electrónica de potencia”. Pearson Educación. 2001. ISBN: 84-205-3179-0.

Capítulo 4

Simulación

Índice

Capítulo 4. Simulación	4-1
4.1 Objetivos	4-1
4.2 Generador de un periodo de señal	4-2
4.2.1 Modulación de t_r y t_f	4-4
4.2.1.1 Cálculo de los vectores “Vr” y “Vf”	4-5
4.2.1.2 La señal durante t_r y t_f	4-6
4.2.1.3 La señal durante t_H y t_L	4-7
4.2.2 Generador de la señal modulada	4-9
4.3 Medidor de características	4-10
4.3.1 Preparación de la señal	4-10
4.4.1 Medida de los indicadores THD , $WTHD$, DF , V_1 pu y f_1 ...	4-14
4.4.2 Medida del indicador LOH	4-15
4.4.3 Medida del indicador $PF50160$	4-16
4.5 Automatización de las medidas	4-18
Referencias	4-22

Índice de figuras

Figura 4.1. Pantalla de usuario del generador de un periodo TPWM-DM para el caso de un inversor con alimentación doble.	4-3
Figura 4.2. Módulo de cálculo del tamaño y posición de los pulsos.	4-4
Figura 4.3. Valores de tiempos (μs) obtenidos del simulador.	4-4
Figura 4.4. Cálculo de los vectores V_r y V_f	4-5
Figura 4.5. Salida del bloque generador de los vectores V_r y V_f	4-6
Figura 4.6. Generador de la señal durante t_r y t_f	4-7
Figura 4.7. Generador de la señal durante t_H y t_L	4-8
Figura 4.8. Generador de un periodo de señal modulada.	4-9
Figura 4.9. Formas de onda TPWM-DM obtenidas a la salida “WF1T” para $f = 50$ Hz, $t_r = t_f = 3.500 \mu\text{s}$, $V_o/V_i = 1$ y $N = 4$	4-9
Figura 4.10. Conformación de la señal para las medidas de características.	4-11
Figura 4.11. Formas de onda TPWM-DM obtenida por el bloque de conformado de la señal para $f = 50$ Hz, $t_r = t_f = 3.500 \mu\text{s}$, $V_o/V_i = 1$ y $N = 4$ y alimentación simple.	4-12
Figura 4.12. Formas de onda TPWM-DM obtenida por el bloque de conformado de la señal para $f = 50$ Hz, $t_r = t_f = 3.500 \mu\text{s}$, $V_o/V_i = 1$ y $N = 4$ y alimentación doble.	4-13
Figura 4.13. Módulo para la medida de los indicadores THD , $WTHD$, DF , V_1 pu y f_1	4-14
Figura 4.14. Módulo para la detección de LOH	4-15
Figura 4.15. Módulo PF50160 para la verificación de la norma EN 50160.	4-16
Figura 4.16. Conexión del módulo PF50160 en la aplicación.	4-17
Figura 4.17. Pantalla principal con el módulo PF50160.	4-17

Figura 4.18. Automatización de las medidas. 4-18

Figura 4.19. Recopilación de todos los resultados en una única matriz de datos.
. 4-19

Figura 4.20. Panel de usuario de la aplicación de medida de indicadores. . . . 4-21

Capítulo 4. Simulación

Para evaluar las características de las señales generadas con la técnica TPWM-DM y antes de implementarla físicamente por medio de un sistema microcontrolador, se ha desarrollado una aplicación bajo entorno LabVIEW® [1, 2] que permite la simulación de todo el procedimiento de generación de la señal modulada y la evaluación de sus características.

LabVIEW es un entorno de programación gráfico muy utilizado en la industria que proporciona una colección de instrumentos virtuales que reproducen con fidelidad los instrumentos reales. La aplicación está formada por distintos módulos que realizan funciones específicas. Cada uno de estos módulos funcionales consta, a su vez, de una o más partes.

4.1 Objetivos

Antes de acometer el diseño de un modulador implementando la técnica descrita en el Capítulo 3, es necesario verificar que se obtienen resultados que puedan ser interesantes para su uso. Para esta misión se utiliza la simulación. En este trabajo se ha realizado una simulación partiendo de las ecuaciones de modulación que definen la técnica de modulación, aplicando a ellas las restricciones del sistema físico, obteniendo así unos resultados que deben ser idénticos a la aplicación física real sobre un sistema basado en microcontrolador.

La principal restricción que se aplica es la referida a los resultados numéricos teóricos que se obtienen de las ecuaciones de modulación. Estos resultados no son directamente aplicables a un sistema digital real ya que se tratan de tiempos y en estos sistemas el tiempo está cuantificado. Es decir, no es posible utilizar todos los decimales que se obtienen del cálculo matemático, siendo necesario redondearlos. El criterio utilizado para el redondeo de los valores teóricos se deduce de las

condiciones de funcionamiento del modulador real implementado por medio de un microprocesador.

Dado que la aplicación principal está orientada a obtener señales moduladas PWM de 50 Hz de frecuencia (para la red de suministro eléctrico industrial y doméstica), es decir, que la señal tiene un periodo de 20 ms, y observando los valores de tiempo obtenidos para los pulsos en las tablas 3.12 y 3.15, se decidió utilizar una base de tiempo de un microsegundo ($f = 1$ MHz). De esta forma, los valores calculados se redondean al valor entero más próximo en microsegundos.

Este valor de tiempo base es conveniente, además de por la razón apuntada antes, porque permite utilizar microcontroladores de bajo coste que dispongan de contadores binarios de 16 bits. Así, estos contadores pueden alcanzar una cuenta máxima de 65.536 μ s, lo que permite generar pulsos con la duración máxima de la cuenta más alta. Es decir, es posible conseguir, además de la modulación y el control de la amplitud, el control de la frecuencia en un rango bastante amplio, como se vió en el apartado 3.6.

En este capítulo, los nombres utilizados en la simulación aparecen en el texto entre comillas, por ejemplo; “Vr”, “Vf”, “Frec. fund”, etc., pudiendo ser distinguidos fácilmente de nombres similares utilizados en otros apartados.

4.2 Generador de un periodo de señal

La señal modulada se obtiene por medio de un bloque funcional identificado como “Generador TPWM 1 periodo.vi”. Este bloque genera un periodo de la señal modulada y su pantalla principal es la que se muestra en la figura 4.1. En ella se han identificado cinco zonas diferentes:

- A: Parámetros de la señal. Por medio de estos controles se especifican los parámetros deseados de la señal a generar, como son la frecuencia, “Frec.”, en Hz, la duración de los tiempos de subida y bajada, “tr”, en milisegundos, y el número de pulsos durante estos tiempos, “N”.
- B: Parámetros para el analizador de espectro. En este caso sólo es necesario un parámetro, el número de orden del armónico superior a analizar.

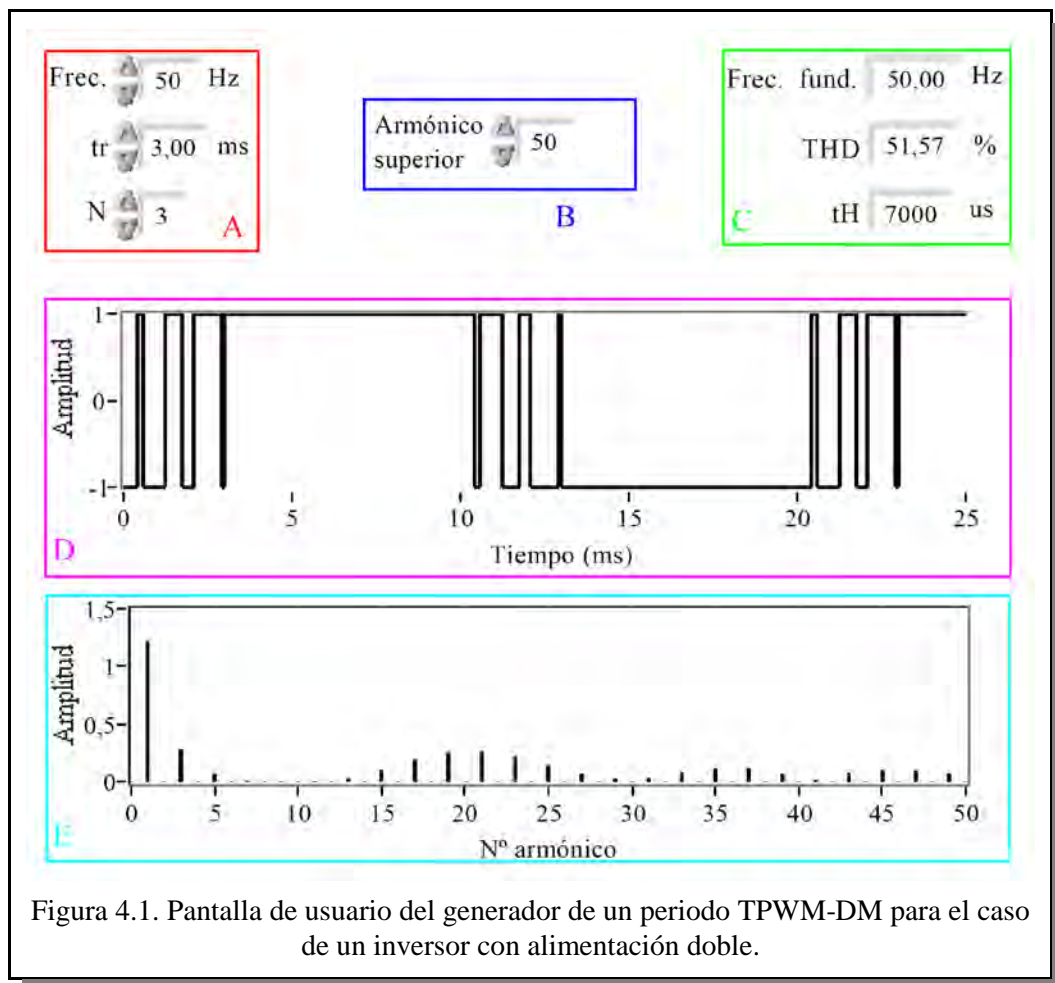


Figura 4.1. Pantalla de usuario del generador de un periodo TPWM-DM para el caso de un inversor con alimentación doble.

C: Resultados de la medida. En esta zona se muestran los valores de las medidas realizadas: valores de t_H y t_L , “tH”, en μs , la frecuencia fundamental, “Frec. fund”, en Hz, detectada en la señal TPWM-DM y la distorsión armónica total, “THD”, de la misma, en %.

D: Gráfica de la forma de onda TPWM-DM obtenida para un periodo de la señal de fase modulada, la que se obtiene a la salida de una rama del inversor.

E: Gráfica de la salida del analizador de espectro.

Este bloque se compone de varios módulos que, adecuadamente concatenados, realizan la simulación generando la señal modulada y midiendo sus parámetros característicos.

4.2.1 Modulación de t_r y t_f

La modulación de la señal durante el tiempo de subida y bajada se genera por medio del módulo que se muestra en la figura 4.2. En él se calcula la duración y la posición de cada uno de los pulsos a partir de los parámetros especificados para la señal, como son la duración del tiempo de subida y el número de pulsos en ella. Para estos cálculos, este módulo utiliza las ecuaciones de modulación obtenidas en el Capítulo 3.

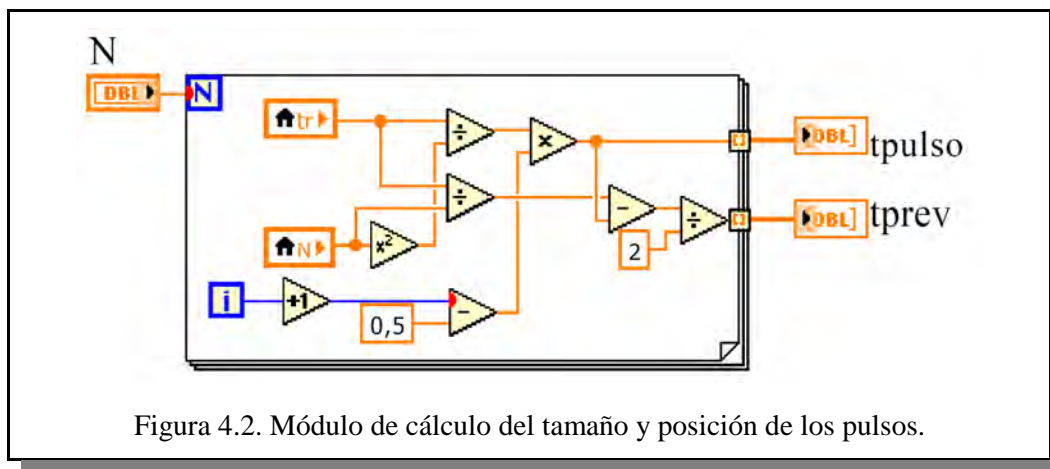


Figura 4.2. Módulo de cálculo del tamaño y posición de los pulsos.

Los resultados de este módulo se recopilan en dos matrices unidimensionales con “N” elementos cada una de ellas que contienen el tamaño de cada uno de los pulsos y su posición en el intervalo correspondiente del tiempo de subida, “tprev”. Dado que los valores de los tiempo durante t_f son iguales que durante t_r (ver las tablas

tprev	tpulso
152,78	27,78
125,00	83,33
97,22	138,89
69,44	194,44
41,67	250,00
13,89	305,56

Figura 4.3. Valores de tiempos (μ s) obtenidos del simulador.

3.7 y 3.9), no es necesario otros cálculos para obtener los valores para el tiempo de bajada. La figura 4.3 muestra un ejemplo de estas matrices para un caso concreto donde $t_r = 2.000 \mu\text{s}$ y $N = 6$. El resultado es idéntico a los calculados en las tablas 3.7 y 3.9.

4.2.1.1 Cálculo de los vectores “Vr” y “Vf”

Los vectores “Vr” y “Vf” definen la secuencia de tiempos de t_r y t_f respectivamente. El vector “Vr” se construye concatenando ordenadamente los valores de t_{prev_nr} , t_{pulso_nr} , t_{post_nr} de cada intervalo durante el tiempo de subida, calculados en el módulo anterior. El vector “Vf” tiene los mismos valores que el vector “Vr”. Los vectores “Vr” y “Vf” representan la señal modulada durante los tiempos de subida y bajada respectivamente de la señal TPWM-DM. La figura 4.4 muestra el contenido de este módulo.

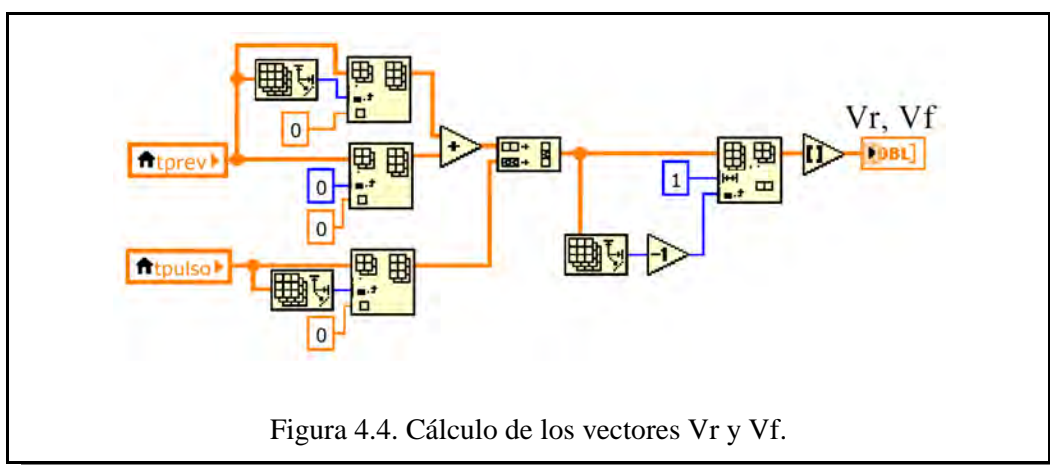
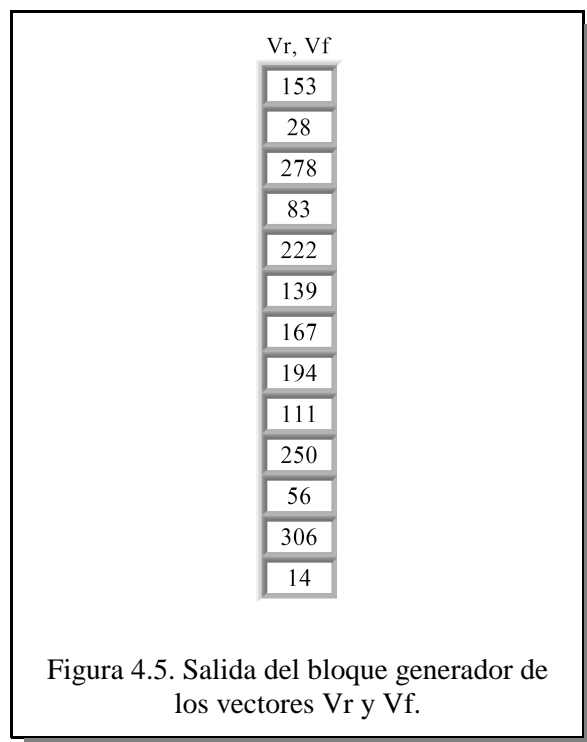


Figura 4.4. Cálculo de los vectores Vr y Vf.

La salida de este módulo es una matriz unidimensional denominada “Vr” (para el tiempo de subida) cuyo contenido numérico es el mismo que el de la matriz “Vf” (para el tiempo de bajada). Los valores de esta matriz son números enteros porque están redondeados al entero más próximo. La figura 4.5 muestra el valor de estos vectores para el caso $N = 6$ y $t_r = 2.000 \mu\text{s}$. Estos valores se corresponden con los valores redondeados de la tabla 3.14 en su columna 2.000, para el tiempo de subida y el de bajada.



Aunque “Vr” y “Vf” tienen los mismos valores numéricos, el significado de estos no es el mismo. La interpretación de los valores de “Vr” es como sigue: recorriendo la figura 4.5 de arriba hacia abajo, la señal está a nivel bajo durante 153 μ s, a nivel alto durante 28 μ s, a nivel bajo durante 278 μ s, a nivel alto durante 83 μ s, y así sucesivamente. Es decir, los valores de las filas impares son los que la señal está a nivel bajo y los de las filas pares son los pulsos a nivel alto.

La interpretación de los valores de “Vf” es diferente ya que ahora la señal pasa de estar en un nivel alto (t_H) al nivel bajo (t_L), y es como sigue: la señal está a nivel alto durante 153 μ s, a nivel bajo durante 28 μ s, a nivel alto durante 278 μ s, a nivel bajo durante 83 μ s, y así sucesivamente. Es decir los valores de las filas impares son los tiempos que la señal está a nivel alto y los de las filas pares son los tiempos que la señal está a nivel bajo.

4.2.1.2 La señal durante t_r y t_f

La señal durante t_r y t_f se construye a partir de los vectores “Vr” y “Vf” respectivamente asignando los valores de amplitud adecuados a cada uno de los

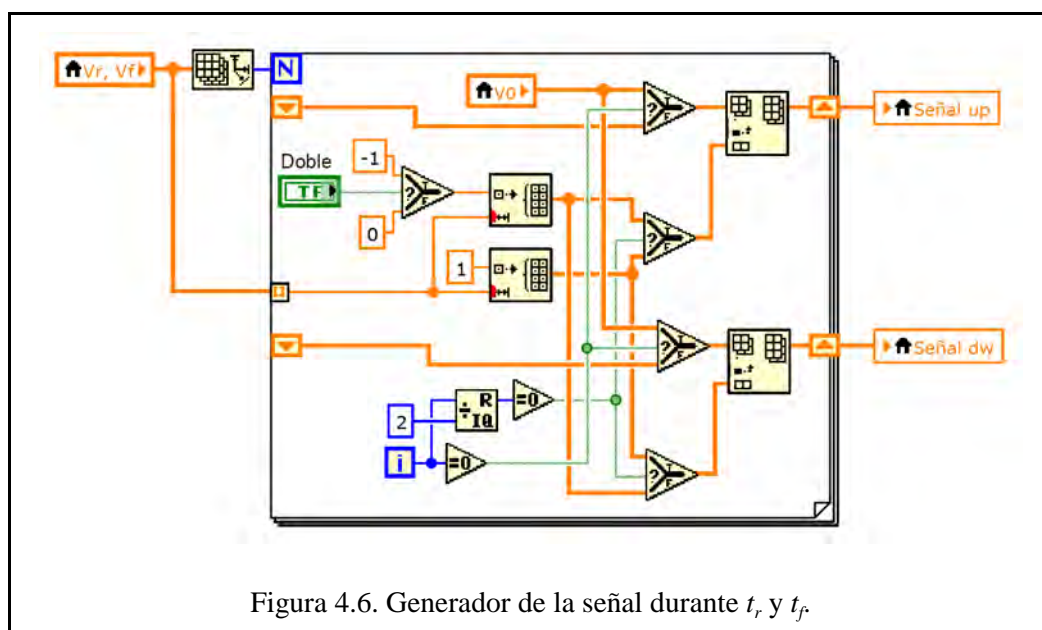


Figura 4.6. Generador de la señal durante t_r y t_f .

valores de tiempo, como se ha descrito en el apartado anterior. Como lo que se pretende es obtener una señal de amplitud normalizada a la unidad y se trata de una señal conmutada, ésta solamente tiene dos valores de amplitud, +1 y 0, cuando la alimentación del inversor es simple, y +1 y -1, cuando es doble. En la simulación se ha previsto un control denominado “Doble” que permite realizar la simulación con alimentación simple en el inversor (“Doble = False”) o alimentación doble (“Doble = True”). En la figura 4.6 se muestra el esquema del módulo que compone los valores de la señal durante t_r y t_f . Las salidas que produce este módulo son dos matrices unidimensionales denominadas “Señal up”, para el tiempo de subida, y “Señal dw”, para el tiempo de bajada. Estas matrices se componen de tantos elementos como indica el valor de t_r , expresado como un número entero de microsegundos. Los valores de cada elemento son +1 y 0, o, +1 y -1, según sea la alimentación en continua del inversor, simple o doble, respectivamente.

4.2.1.3 La señal durante t_H y t_L

La amplitud de la señal modulada durante t_H y t_L se deduce de la forma de onda de la señal modulada. En este caso, $V_{t_H} = +V_i$ y $V_{t_L} = 0$ V, cuando la alimentación del inversor es simple, y $V_{t_L} = -V_i$, cuando la alimentación del inversor es doble (utilizando el control “Doble”). En el caso de la simulación, los valores son +1 y 0,

o +1 y -1, respectivamente, ya que se trabaja con amplitudes normalizadas a la unidad.

La duración de t_H y t_L se deduce de las ecuaciones (3.1), (3.2) y (3.3), de las cuales se obtiene:

$$t_H = t_L = T - t_r - t_f = T - 2t_r \quad (4.1)$$

Es decir, que una vez establecidos el parámetro de modulación t_r y la frecuencia, f , de la señal, los valores de t_H y t_L son conocidos.

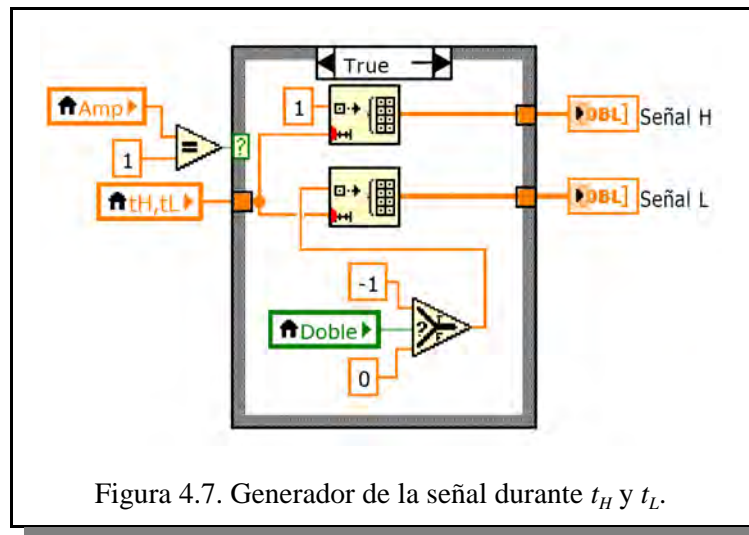


Figura 4.7. Generador de la señal durante t_H y t_L .

El bloque funcional que realiza este cálculo y asigna los valores de amplitud de la señal es el que se muestra en la figura 4.7. Las salidas de este bloque son dos matrices unidimensionales denominadas “Señal H” y Señal L”, formadas por tantos elementos como indica el valor del tiempo t_H o t_L , expresado como un número entero de microsegundos. En cada una de estas matrices todos los elementos tienen el mismo valor; +1, en “Señal H”, y 0 o -1, en “Señal L”, según sea el valor de la variable “Doble”, que identifica el tipo de alimentación del inversor.

4.2.2 Generador de la señal modulada

Hasta este momento, los bloques descritos han generado de forma independiente las distintas partes de la señal objetivo; la señal modulada durante los tiempos de subida y bajada y la señal durante los tiempos t_H y t_L . El módulo generador de la señal modulada se encarga de unir estas partes para obtener un periodo completo de la señal. Este módulo es el que se muestra en la figura 4.8. En él se concatenan la señal durante t_r , “Señal up”, durante t_H , “Señal H”, durante t_f , “Señal dw”, y durante t_L , “Señal L”. La salida que produce este módulo tiene la etiqueta “WF1T”, y es un periodo completo de la señal modulada TPWM-DM con los parámetros especificados.

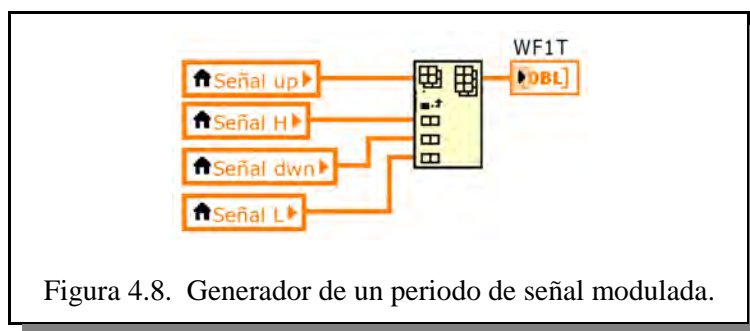


Figura 4.8. Generador de un periodo de señal modulada.

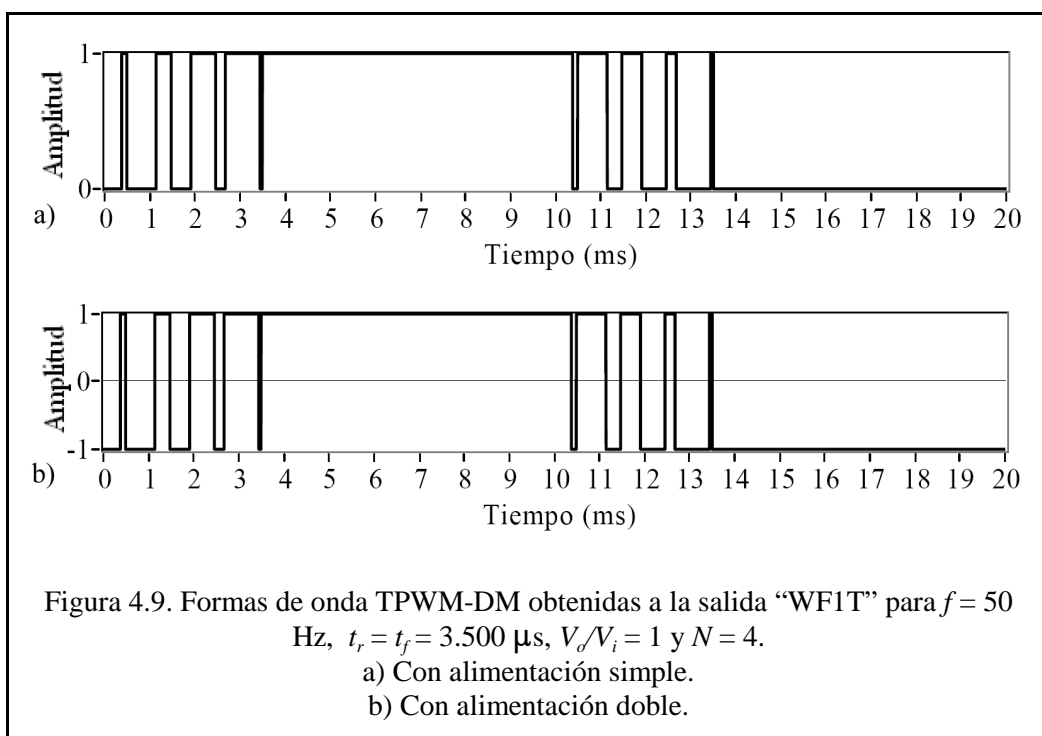


Figura 4.9. Formas de onda TPWM-DM obtenidas a la salida “WF1T” para $f = 50$ Hz, $t_r = t_f = 3.500 \mu\text{s}$, $V_o/V_i = 1$ y $N = 4$.
 a) Con alimentación simple.
 b) Con alimentación doble.

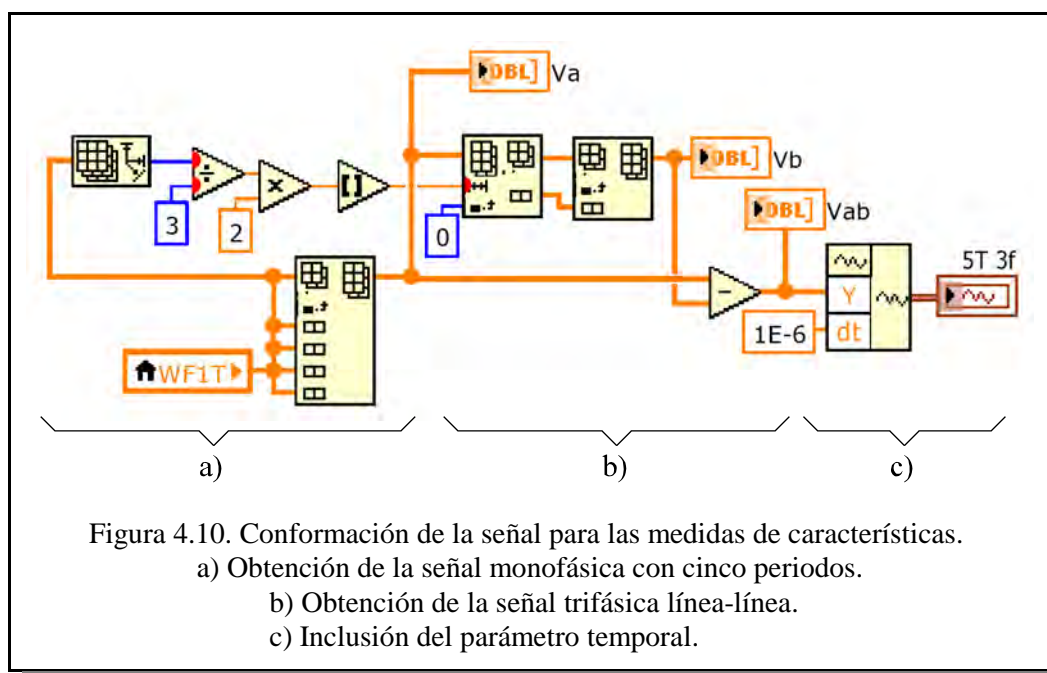
La figura 4.9 muestra gráficamente la forma de onda obtenida en la salida “WF1T” para una señal modulada de 50 Hz de frecuencia, con tiempos de subida y bajada de $3.500 \mu\text{s}$, $N = 4$ y $V_o/V_i = 1$, con alimentación simple (a) y doble (b).

4.3 Medidor de características

El objetivo de la simulación no es solamente obtener la forma de onda modulada sino, además, analizar sus características. Para ello se utiliza la instrumentación virtual que dispone LabVIEW para el análisis de armónicos. El analizador de armónicos necesita a su entrada una señal con sus parámetros temporales. Hasta ahora, lo que se ha generado en la simulación no tiene el formato adecuado para el analizador de armónicos ya que se trata de una matriz unidimensional que contiene todas las piezas que componen un periodo de la señal (20.000 datos) pero no se le ha especificado la duración de cada dato. Para que la señal tenga el formato adecuado para poder ser analizada, hay que definir la duración de cada muestra que, en este trabajo, se ha establecido en un microsegundo como se justificó en el apartado 4.1. Además, para el correcto funcionamiento del analizador de espectro, es necesario disponer de varios periodos de la señal. Por otro lado, el objetivo de este trabajo es la modulación para sistemas trifásicos. Hasta este momento solamente se ha conseguido un periodo de una señal monofásica.

4.3.1 Preparación de la señal

Para que la señal modulada pueda ser analizada correctamente ha de tener una duración de al menos cinco periodos, ha de ser trifásica y adecuada al medidor de armónicos. Para conseguir esto, se utiliza el módulo mostrado en la figura 4.10. En la sección a) de este módulo se concatenan cinco periodos de la señal monofásica, a partir de “WF1T”. La señal ha de tener cinco periodos o más ya que esta es la cantidad de información necesaria para el correcto funcionamiento del analizador de armónicos. En la sección b) se crea una segunda señal desfasada $2\pi/3$ respecto a la anterior para generar la señal línea - línea, sobre la que realizar las medidas.



Por último, en la sección c) de la figura 4.10, se incluye el parámetro temporal necesario ($1 \mu\text{s}$) para el análisis del espectro de frecuencias de la señal. Las figuras 4.11 y 4.12, son ejemplos que muestran las distintas formas de onda que genera este bloque funcional, así como el espectro de frecuencias de la señal trifásica (señal línea - línea) cuando la alimentación en continua del inversor es simple (figura 4.11), y doble (figura 4.12).

4.4 Medida de indicadores de calidad

Las medidas de los indicadores de calidad de la señal modulada como la distorsión armónica total (*THD*), la distorsión armónica total ponderada (*WTHD*), el factor de distorsión (*DF*), el indicador *LOH* y el indicador *PF50160*, así como la amplitud pu del armónico fundamental (V_1 pu) y la frecuencia fundamental de la señal, cuyas definiciones pueden verse en el Anexo A1, se obtienen a partir del espectro de frecuencias de la señal modulada, que se genera por medio del analizador de armónicos que provee LabVIEW, junto con las aplicaciones específicamente desarrolladas para este cometido que se describen a continuación.

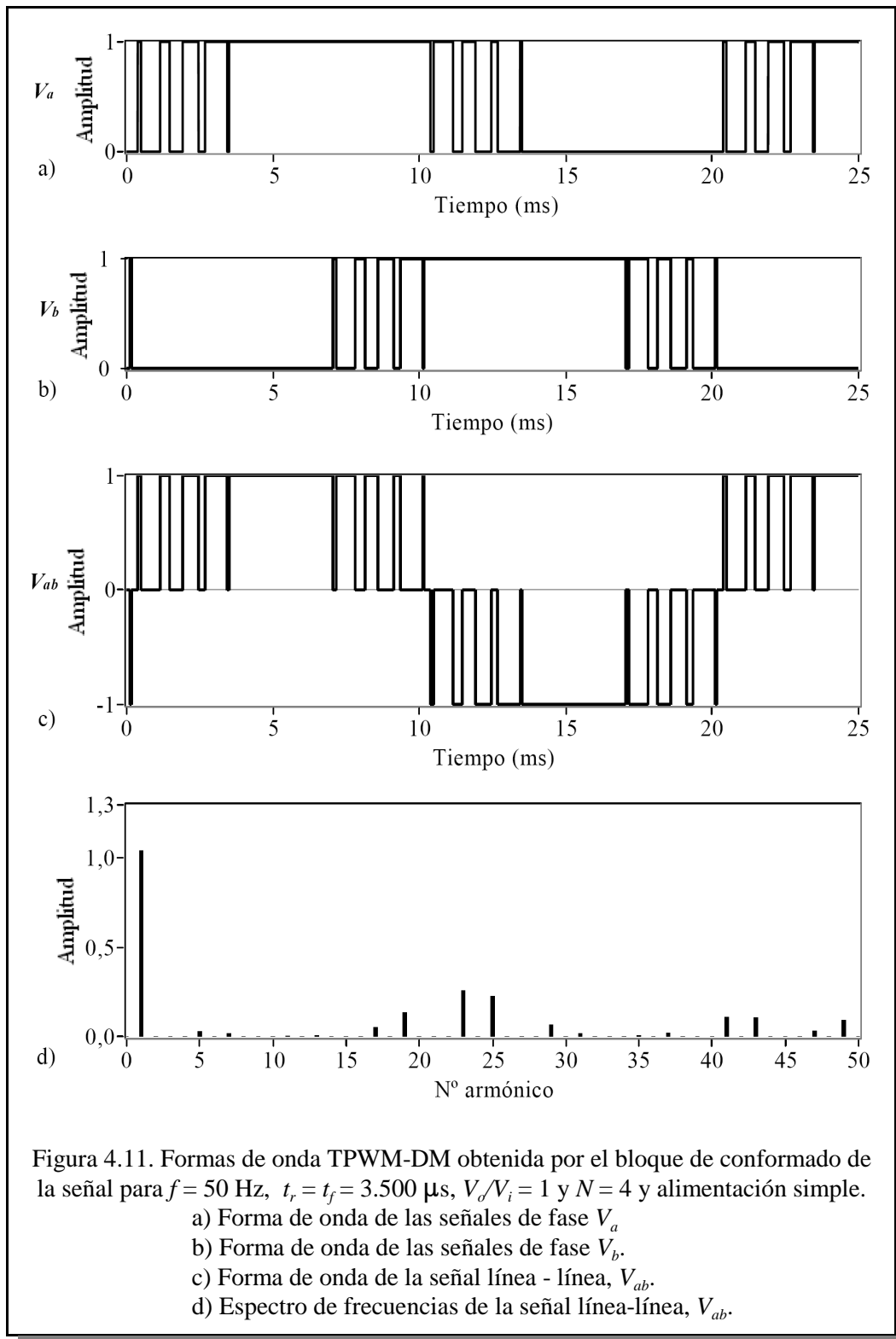
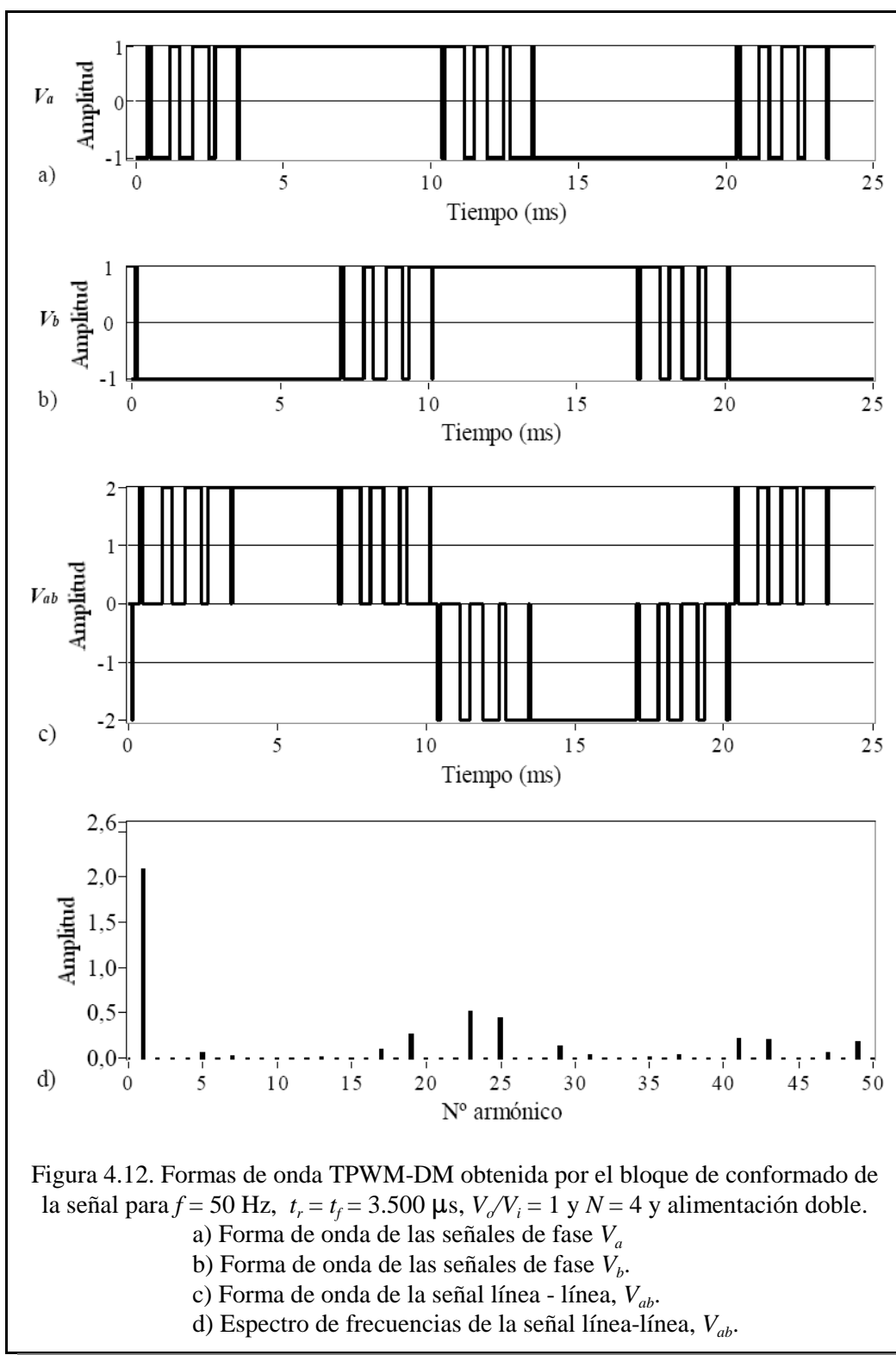


Figura 4.11. Formas de onda TPWM-DM obtenida por el bloque de conformado de la señal para $f = 50$ Hz, $t_r = t_f = 3.500 \mu\text{s}$, $V_o/V_i = 1$ y $N = 4$ y alimentación simple.

- a) Forma de onda de las señales de fase V_a
- b) Forma de onda de las señales de fase V_b .
- c) Forma de onda de la señal línea - línea, V_{ab} .
- d) Espectro de frecuencias de la señal línea-línea, V_{ab} .



4.4.1 Medida de los indicadores THD , $WTHD$, DF , V_1 pu y f_1

La medida de los indicadores de calidad se basa en el análisis de las componentes armónicas que forman la señal modulada. La figura 4.13 muestra cómo la señal trifásica TPWM-DM con cinco periodos, “5T 3f”, es la entrada al analizador de armónicos. De él se obtiene el valor de la frecuencia del armónico fundamental, “f1”, en Hz, el valor de THD , “THD (%)”, como tanto por ciento, y el espectro de frecuencias de la señal, “Espectro”, que es una matriz unidimensional que contiene los valores absolutos de las amplitudes de cada una de los armónicos medidos (hasta el armónico de orden 50, por defecto).

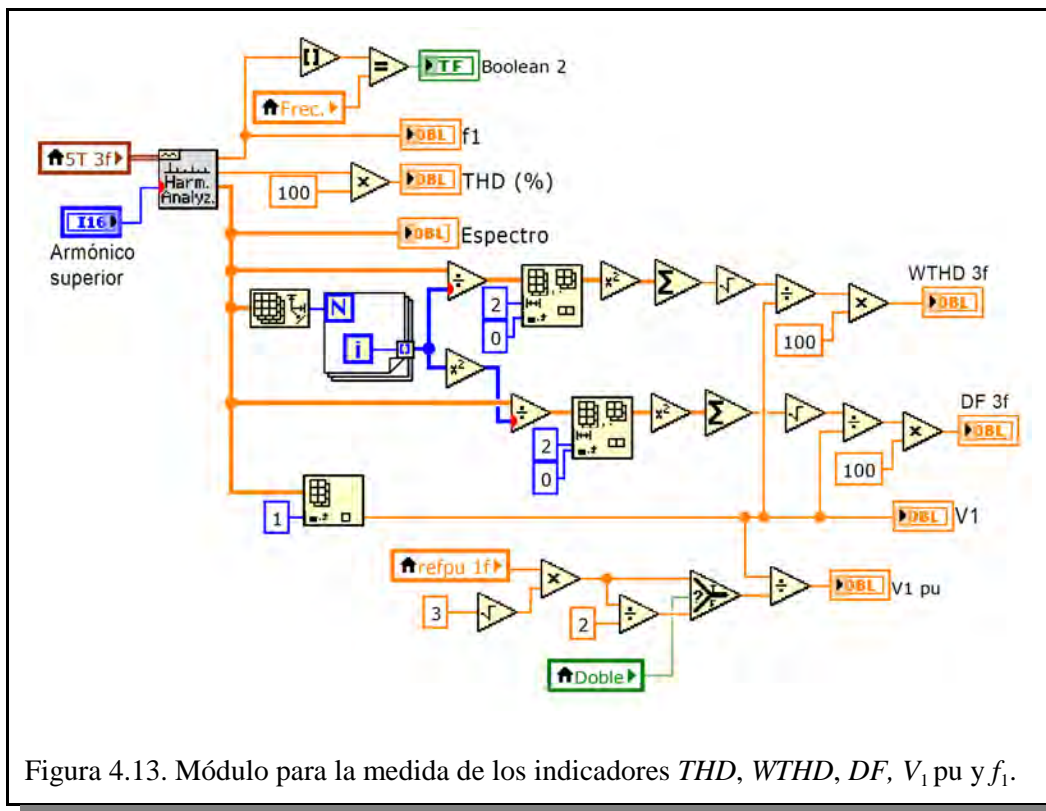


Figura 4.13. Módulo para la medida de los indicadores THD , $WTHD$, DF , V_1 pu y f_1 .

A partir de “Espectro” se obtienen los otros indicadores de calidad, $WTHD$, “ $WTHD$ 3f”, en %, DF , “ DF 3f”, en % y V_1 pu, “ V_1 pu”.

4.4.2 Medida del indicador *LOH*

Algunos autores utilizan, además de los indicadores de calidad del apartado anterior, otro indicador denominado *LOH* (Low Order Harmonic) que se define en el Anexo A1. La medida de este indicador se realiza por medio del módulo representado en la figura 4.14.

A partir del espectro de frecuencias, suministrado por el analizador de espectros, este módulo calcula el porcentaje de amplitud de cada uno de los armónicos respecto al armónico fundamental. Cada uno de estos valores porcentuales se compara con el nivel de referencia del indicador (3 % por defecto, aunque en la

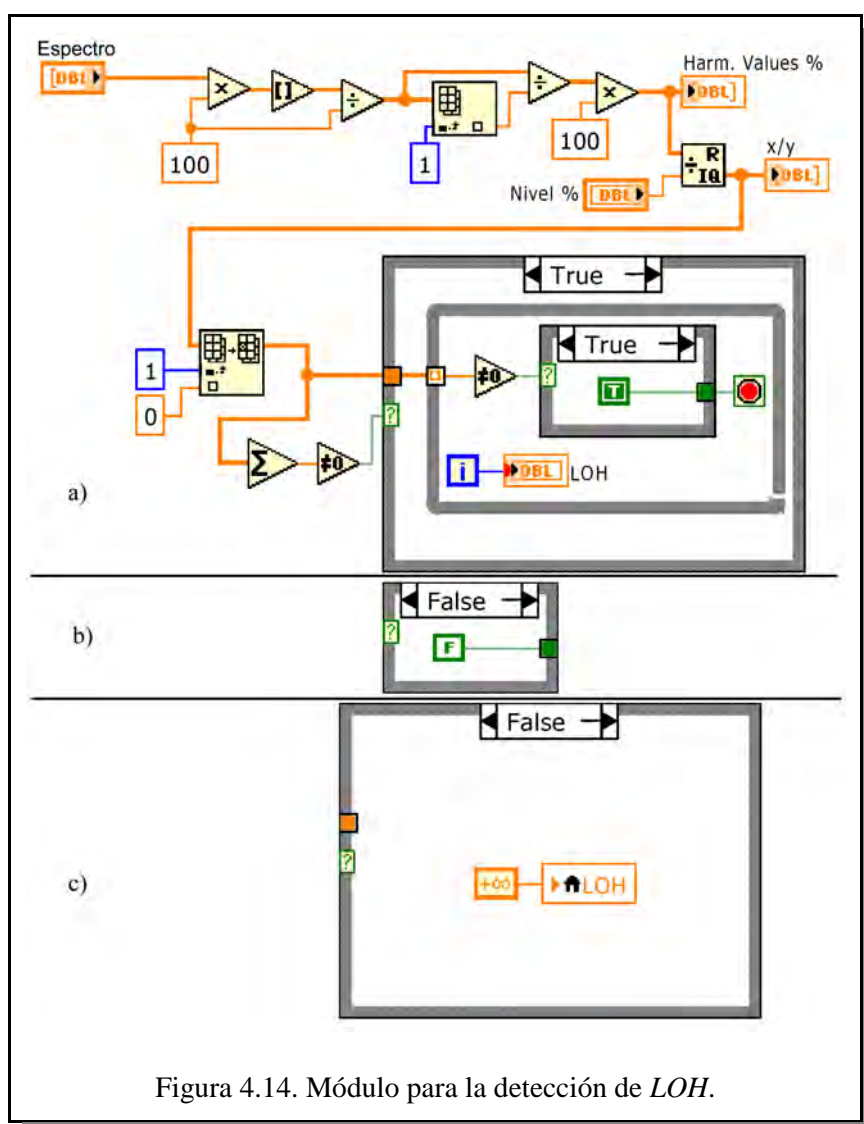


Figura 4.14. Módulo para la detección de *LOH*.

aplicación de simulación es programable) para, a continuación, sumar los resultados y si la suma es cero, es porque no hay un valor para *LOH*. En este caso la variable de salida *LOH* se rellena con el símbolo ∞ , indicando con ello que el valor de *LOH* se encuentra fuera del rango de medidas de armónicos (50 por defecto). En caso contrario se hace una búsqueda del primer valor distinto de cero. En cuanto se encuentra, se toma nota de su número de orden y se rellena con él la variable de salida *LOH*.

4.4.3 Medida del indicador *PF50160*

Por último, en el simulador se ha incluido una medida adicional de calidad que indica si la señal modulada cumple o no con los requerimientos establecidos por la norma EN 50160 de uso europeo en cuanto a niveles de armónicos, cuya definición se encuentra en el Anexo A1, y, si no los cumple, identifica cuales son los armónico que no cumplen. La figura 4.15 muestra el contenido de este módulo. En la figura 4.15 a) puede verse que se han introducido los valores límites de amplitud relativa a la frecuencia fundamental de la señal de los armónicos definidos por esta norma para restarlos de los valores de amplitud, relativa también a la frecuencia fundamental, de los armónicos obtenidos de la señal generada. Si el resultado es inferior o igual a cero es que la amplitud del armónico está por debajo de lo especificado en la norma. En caso contrario no se cumple y se muestra todos los número de orden de los armónicos que no cumplen.

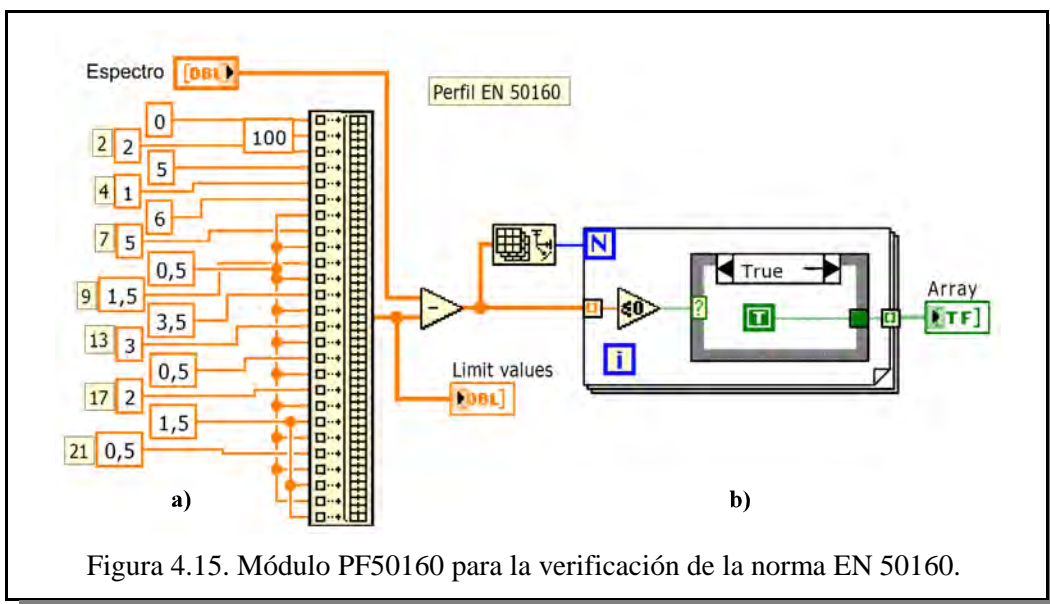


Figura 4.15. Módulo PF50160 para la verificación de la norma EN 50160.

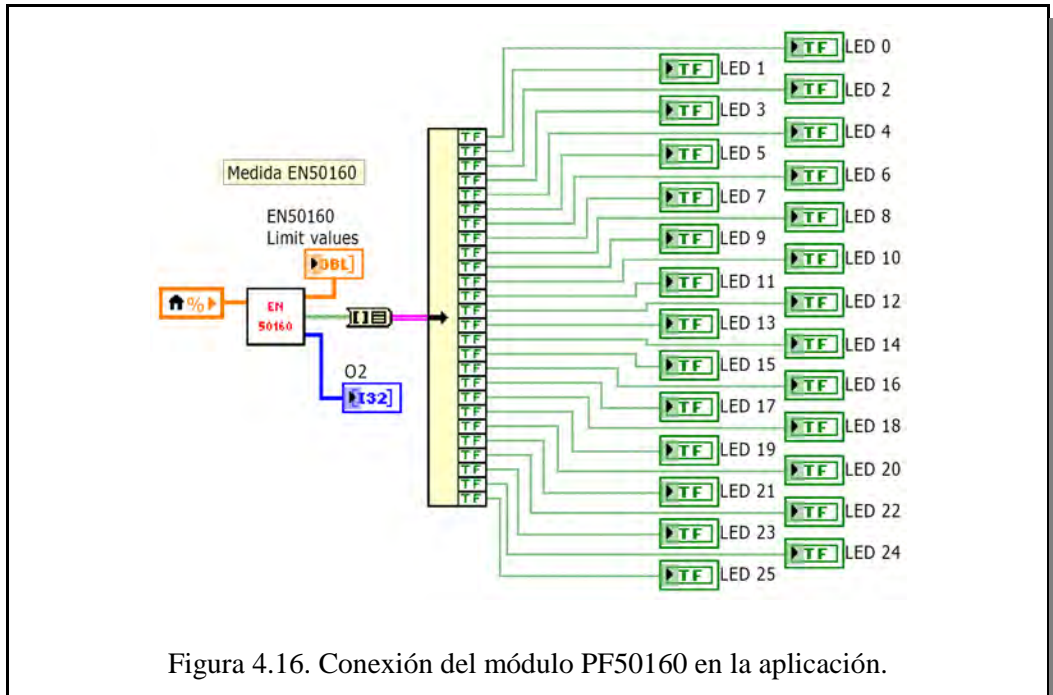


Figura 4.16. Conexión del módulo PF50160 en la aplicación.

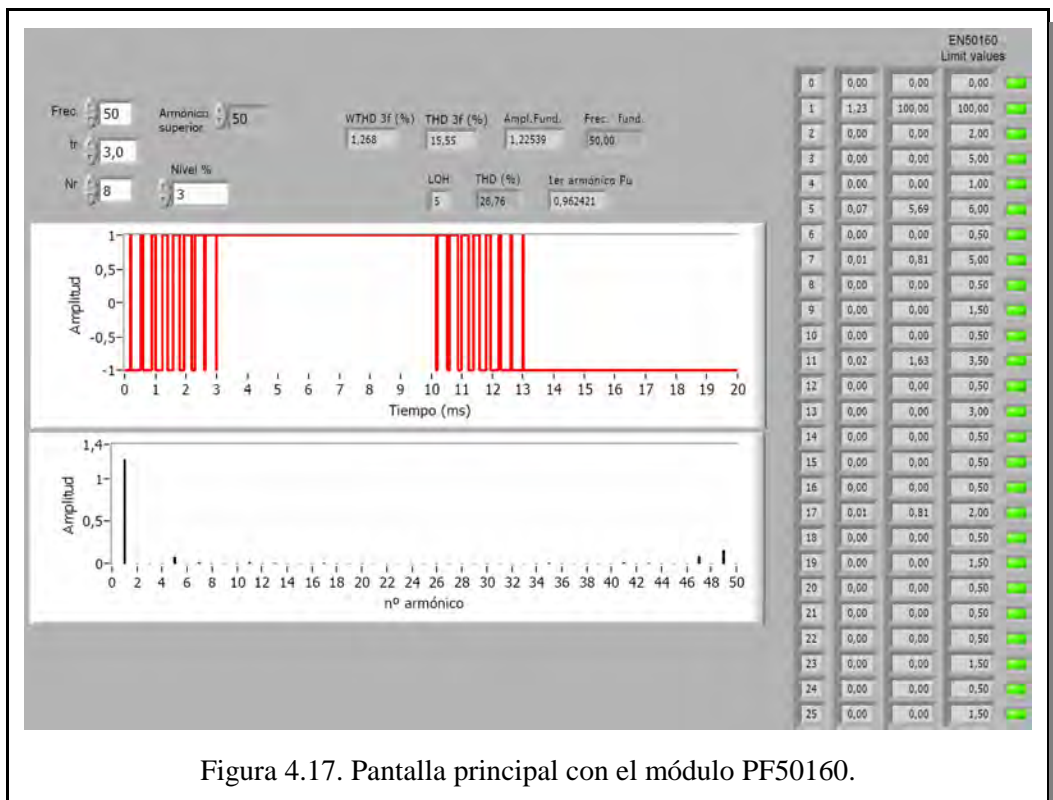


Figura 4.17. Pantalla principal con el módulo PF50160.

La salida de este módulo (figura 4.15 b), es una matriz de valores lógicos que se utilizan en la aplicación llamante para cambiar el color de un indicador a rojo si el armónico está fuera de la norma (excede del valor límite) o a verde si cumple con la norma. La figura 4.16 muestra la conexión descrita y la figura 4.17 muestra el aspecto del panel de control con esta medida.

4.5 Automatización de las medidas

Para llevar a cabo las numerosas medidas necesarias para certificar las características de la señal modulada, se ha desarrollado una aplicación que las automatiza parcialmente y obtiene, gráfica y numéricamente, los valores de cada uno de los indicadores utilizados. La figura 4.18 muestra el módulo que realiza estas medidas automatizadas. Se trata de un bucle que genera la señal modulada el número de veces establecido por los parámetros de control, recopilando toda la información

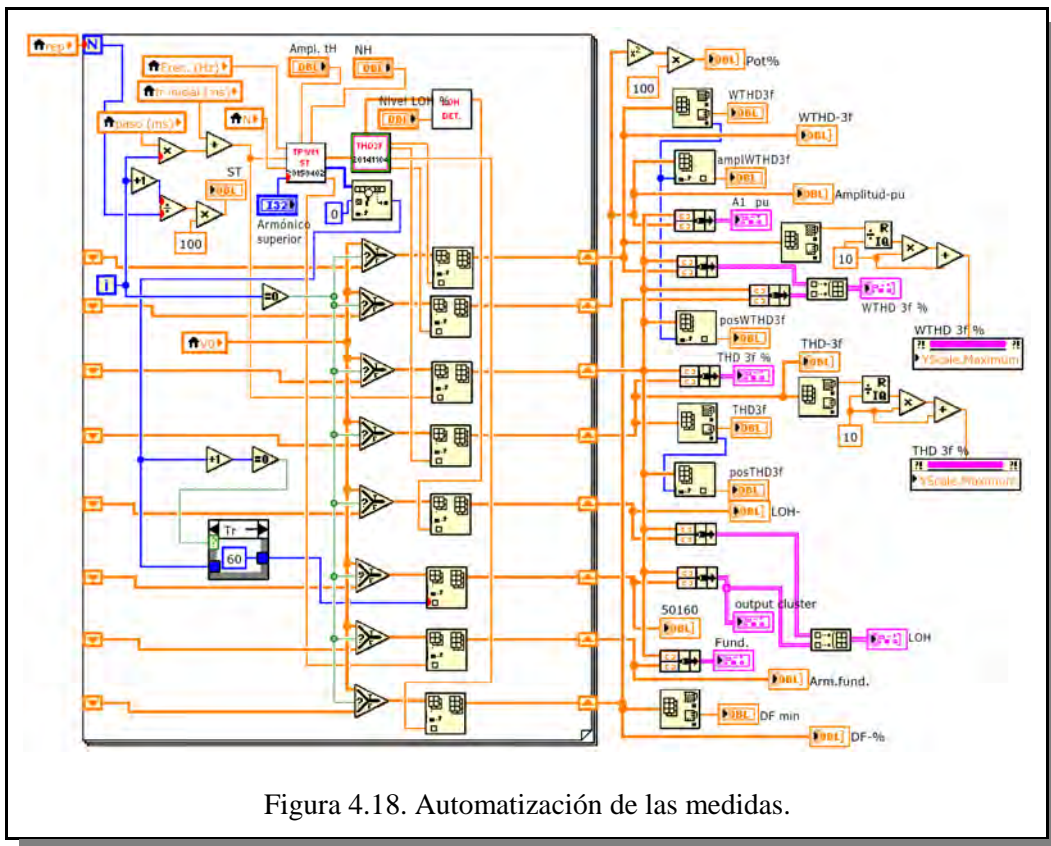
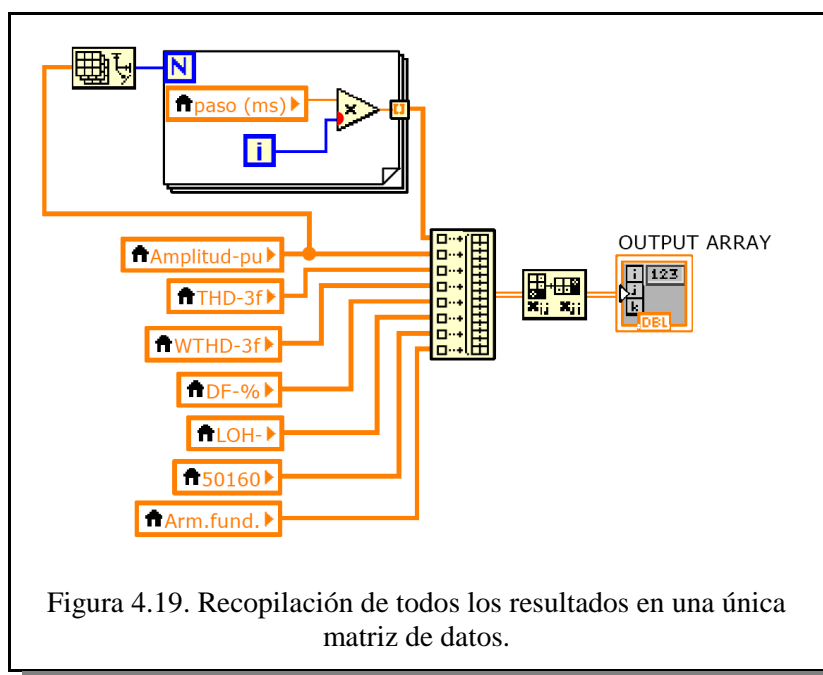


Figura 4.18. Automatización de las medidas.



de las medidas en una única matriz de salida, “Output array”, (figura 4.19) que es almacenada con formato de hoja de cálculo y representadas gráficamente como resultado de las medidas. La figura 4.20 muestra la pantalla de usuario de esta aplicación. Por cada grupo de medidas, se ha de especificar un conjunto de parámetros que definen la modulación. Éstos son los siguientes (lado izquierdo de la figura 4.20):

- Frecuencia de la señal modulada, “Frec. (Hz)”, en Hz, de donde se obtiene el periodo de la señal.
- Número de pulsos durante t_r y t_f (N), “ N ”, que es un parámetro propio de la modulación TPWM-DM.
- Valor del tiempo de subida (bajada) inicial, “ t_r inicial (ms)”, en ms, que sirve para establecer el punto de comienzo de las medidas
- Valor del tiempo de subida (bajada) final, “ t_r final (ms)”, en ms, que sirve para establecer el punto final de las medidas.
- Distancia, en tiempo, entre t_r actual y siguiente, “paso (ms)”, en ms, de donde se obtiene el número total de ciclos a realizar, número de señales moduladas distintas.

- Nivel de detección para *LOH* (%), “Nivel LOH %”, en %. Su valor por defecto es tres.
- Número de orden del armónico de orden superior a tener en cuenta en el análisis del espectro de frecuencias, “Armónico superior”. El valor por defecto es 50, aunque la norma EN 50160 lo establece en 40.

Todos los resultados que se presentan gráficamente en los apartados que siguen son los valores de los indicadores de calidad de la señal modulada TPWM-DM en función del valor de t_r , entre 0 ms y la mitad del periodo de la señal. Estos indicadores son los siguientes (en orden de arriba abajo, en la figura 4.20):

- *WTHD*. Línea negra y escala vertical izquierda, en %.
- *DF*. Línea roja y escala vertical derecha, en %.
- Amplitud del armónico fundamental V_1 pu.
- *THD*, en %.
- *LOH*, línea negra discontinua, en HO.
- *PF50160*, línea roja continua, en HO.
- Frecuencia fundamental de la señal, en Hz.

Cada figura contiene una colección de 700 medidas, cien medidas de cada uno de los siete indicadores.

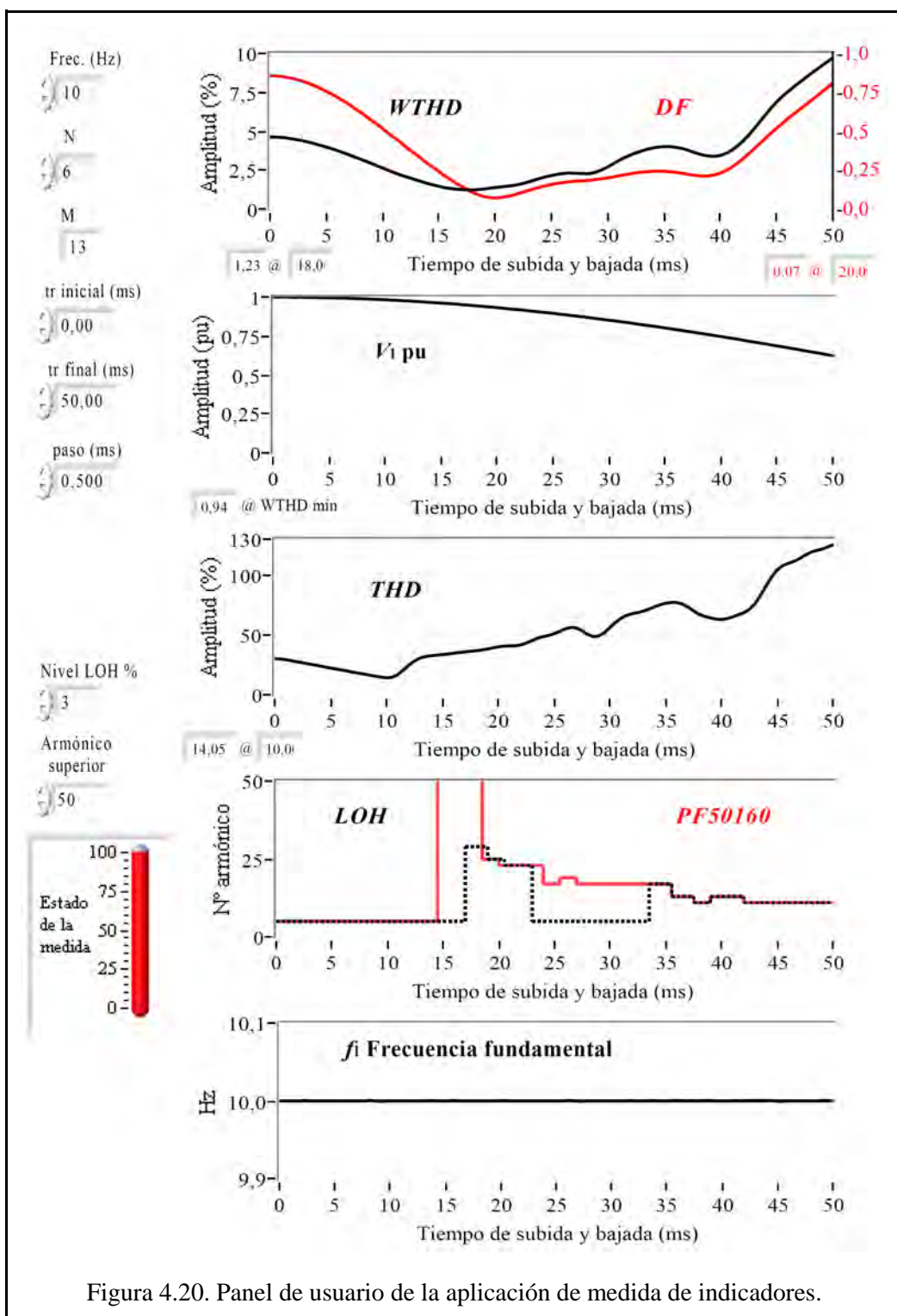


Figura 4.20. Panel de usuario de la aplicación de medida de indicadores.

Referencias

- [1] National Instruments, “LabVIEW User Manual”, April 2003, Edition, Part Number 320999E-01.
- [2] National Instruments, “Getting Started with LabVIEW”, June 2013, Edition, Part Number 373427J-01.

Capítulo 5

Implementación

Índice de figuras

Figura 5.1. Funcionamiento de las instrucciones de manejo de tablas	5-3
Figura 5.2. Temporizador 1 del microcontrolador	5-5
Figura 5.3. Bloque comparador digital CCP	5-7
Figura 5.4. Arquitectura de las interrupciones	5-8
Figura 5.5. Esquema básico del modulador.	5-11
Figura 5.6. Montaje real del modulador.	5-12
Figura 5.7. Flujograma de la rutina de interrupción INTMOD.	5-13
Figura 5.8. Esquema de bloques de la implementación 2.	5-18
Figura 5.9. Arquitectura de los temporizadores de la familia PIC24F	5-18
Figura 5.10. Arquitectura del módulo CCP en la familia PIC24F	5-19
Figura 5.11. Funcionamiento del módulo CCP en la familia de microcontroladores PIC24F	5-21
Figura 5.12. Placa utilizada para el prototipo de la implementación 2.	5-23
Figura 5.13. Banco de pruebas de la implementación 2.	5-25
Figura 5.14. Pantalla de control de LabVIEW.	5-26
Figura 5.15. Placa de desarrollo de la implementación 4.	5-28
Figura 5.16. Banco de pruebas utilizado en la implementación 4.	5-29

Índice de tablas

Tabla 5.1. Instrucciones específicas del microcontrolador PIC19F425 para el manejo de tablas	5-2
Tabla 5.2. Tamaño necesario de memoria por tabla de modulación según el valor de N	5-4
Tabla 5.3. Ejemplos de tamaños de la tabla de modulación (en bytes) para distintos valores de pasos de t_r y N	5-4
Tabla 5.4. Frecuencia máxima y mínima de la señal en función de N	5-6
Tabla 5.5. Valores mínimos de tiempos de modulación.	5-10
Tabla 5.6. Reorganización de la tabla de modulación para $N = 5$	5-21

Índice de listados

Listado 5.1. Rutina de interrupción de modulación.	5-15
---	------

Capítulo 5. Implementación

El método de modulación TPWM-DM, desarrollado en el Capítulo 3 y simulado en el Capítulo 4, se ha implementado utilizando microprocesadores comerciales de bajo costo de Microchip Inc.

La implementación se ha realizado de formas diferentes obteniendo siempre los mismos resultados. Las distintas formas realizadas son:

- a) Utilizando una tabla de valores.
- b) Bajo control de un ordenador personal.
- c) Funcionamiento autónomo con generación interna a partir de semilla.
- d) Funcionamiento autónomo por generación matemática.

Las implementaciones a), b) y c) se han realizado para una rama de un inversor trifásico, mientras que la d) es para las tres ramas de un inversor trifásico.

5.1 Implementación 1. Por tablas

La implementación por tabla de valores es el método que menos recursos necesita del microcontrolador (μC). En este caso se utiliza una tabla con los valores de los tiempos previo, posterior y pulso (lookup table) por cada una de las modulaciones que se necesiten que estén disponibles a la salida del modulador. Los valores de estas tablas se calculan a partir de las ecuaciones de modulación de la técnica, siendo necesaria una tabla por cada valor de tiempo de subida y bajada, cada valor de N y cada valor de frecuencia de la señal modulada. Cada tabla tiene el formato de la tabla 3.12 (o 3.15). En esta implementación, el μC no realiza ningún cálculo de valores de tiempos, por eso, los requerimientos computacionales son mínimos.

5.1.1 Requerimientos del sistema

Para la implementación por medio de tablas, los recursos necesarios en el microcontrolador son los siguientes:

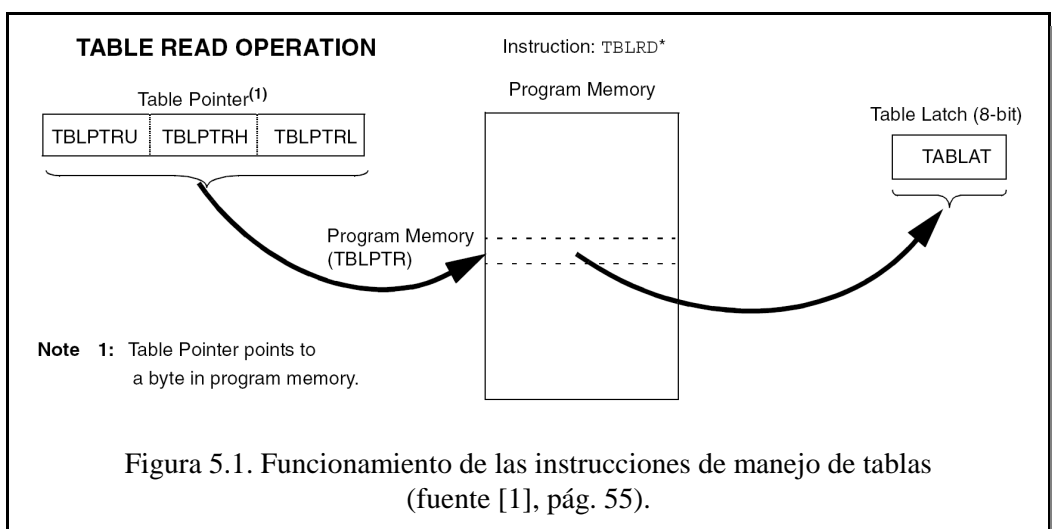
- a) Manejo de tablas.
- b) Espacio para las tablas.
- c) Temporizadores de 16 bits.
- d) Funcionamiento por interrupciones.

Manejo de tablas. Para poder manejar adecuadamente las tablas de datos, el juego de instrucciones del μC debe de disponer de algunas de ellas que permitan esta posibilidad. Concretamente, el modelo utilizado para esta implementación (PIC18F452 I/P), dispone de instrucciones específicas para ello, son las mostradas en la tabla 5.1.

DATA MEMORY ↔ PROGRAM MEMORY OPERATIONS	
TBLRD*	Table Read
TBLRD*+	Table Read with post-increment
TBLRD*-	Table Read with post-decrement
TBLRD+*	Table Read with pre-increment
TBLWT*	Table Write
TBLWT*+	Table Write with post-increment
TBLWT*-	Table Write with post-decrement
TBLWT+*	Table Write with pre-increment

Tabla 5.1. Instrucciones específicas del microcontrolador PIC19F425 para el manejo de tablas (fuente [1], pág. 216).

Estas instrucciones permiten leer (TBLRD) y escribir (TBLWR) datos en tablas. Para ello dispone de un puntero denominado TBLPTR formado por dos bytes (TBLPTRH y TBLPTRL) situados en las direcciones FF7h y FF6h respectivamente. El funcionamiento de estas instrucciones está resumido en la figura 5.1. La descripción completa se encuentra en [1], páginas 58 - 63 y páginas 249 - 250.



Espacio para las tablas de modulación. El tamaño de las tablas de modulación es función del número de pulsos, N , durante los tiempos de subida y bajada, t_r y t_f . La expresión que relaciona el tamaño de las tablas de modulación con el correspondiente valor de N es:

$$\text{Tamaño_tabla} = 4 \times N + 2 \quad (5.1)$$

Teniendo en cuenta que $M = 2N$, la ecuación anterior queda como sigue:

$$\text{Tamaño_tabla} = 2 \times M + 2 \quad (5.2)$$

Cada tabla de modulación necesita de una información complementaria, que es el tamaño de la tabla.

Cada dato de la tabla de modulación se encuentra en el rango de valores entre cero y diez mil. Por lo tanto, cada uno de ellos se representa por medio de dos bytes. No sucede igual para el valor del tamaño de la tabla. En este caso, un solo byte es suficiente. Es decir, el espacio que ocupa cada tabla de modulación en número de bytes (espacio necesario en la memoria del microcontrolador) es el doble de la cantidad de datos en ella más uno, como se muestra en la tabla 5.2.

N	Tamaño_tabla	Nº bytes	N	Tamaño_tabla	Nº bytes
3	14	29	9	38	77
4	18	37	10	42	85
5	22	45	11	46	93
6	26	53	12	50	101
7	30	61	13	54	109
8	34	69	14	58	117

Tabla 5.2. Tamaño necesario de memoria por tabla de modulación según el valor de N .

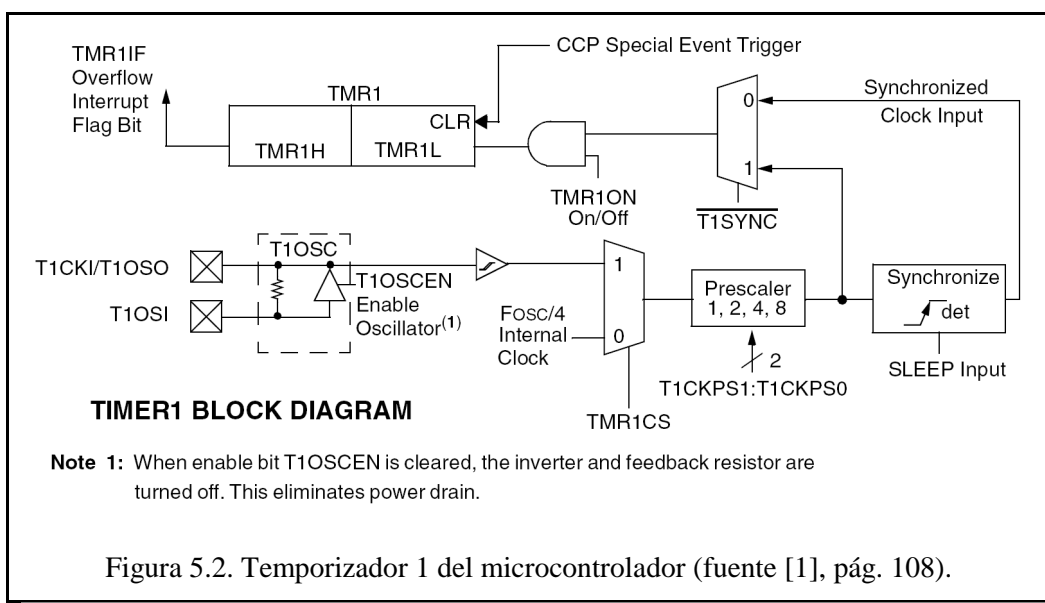
Por otro lado, para poder modular con n valores diferentes de tiempo de subida y bajada, por cada uno de estos valores es necesario disponer de una tabla de modulación diferente. Por ejemplo, si se quiere cambiar el tiempo de subida entre 1 y 9 ms a paso de 0,5 ms, es decir 17 pasos, son necesarias 17 tablas del tamaño correspondiente al valor de N . La tabla 5.3 recoge algunos ejemplos de tamaños de tabla de datos para modulación TPWM-DM con distintos casos de tiempos de subida y distinta cantidad de pulsos en ellos. Como puede verse en esta tabla, para $N = 9$ y 50 pasos de modulación, son necesarios casi 4 kB de memoria. Esto que puede parecer mucho no lo es si se tiene en cuenta que el dispositivo utilizado dispone de 32 kB de memoria Flash y que el programa de control ocupa menos de 2 kB, quedando disponible hasta 30 kB para albergar las tablas. Así, por ejemplo, un modulador que incorpore todas las tablas de conmutación de la tabla 5.3 con 50 pasos, utilizaría 14,89 kB para ellas, quedando libre 17,10 kB.

N	Pasos t_r					
	5	10	20	30	40	50
5	225	450	900	1350	1800	2250
6	265	530	1060	1590	2120	2650
7	305	610	1220	1830	2440	3050
8	345	690	1380	2070	2760	3450
9	385	770	1540	2310	3080	3850

Tabla 5.3. Ejemplos de tamaños de la tabla de modulación (en bytes) para distintos valores de pasos de t_r y N .

Temporizadores de 16 bits. Para poder establecer intervalos de tiempo con precisión se utilizan contadores digitales. Cuando estos contadores se utilizan con una señal de reloj que establece el tiempo base de la cuenta, se denominan temporizadores. En la implementación realizada se utiliza una base de tiempo de un microsegundo. En una aplicación para señal de 50 Hz, los temporizadores han de ser capaces de contar hasta 10.000 μ s (medio periodo de una señal cuadrada). Es decir, se requieren contadores de 14 bits, como mínimo. Lo habitual en los microcontroladores comerciales y en concreto en el que se utiliza en esta aplicación, es disponer de contadores de 8 y 16 bits. En este caso se utiliza uno de 16 bits, que cubre las necesidades de la frecuencia de 50 Hz y permite que la frecuencia de la señal de salida sea bastante más baja. Si se desea que la señal de salida tenga una frecuencia mayor, el contador necesario es siempre de menor tamaño, lo cual queda cubierto con uno de 16 bits. La figura 5.2 muestra el esquema de uno de los temporizadores del microcontrolador utilizado. Este temporizador, además de cumplir con el requisito de ser de 16 bits, trabaja por interrupciones, generando una interrupción al paso por cero de la cuenta. Además, permite seleccionar que la base de tiempo (el reloj del contador) sea interna o externa al μ C. Esta última posibilidad es la que se utiliza en esta aplicación.

La descripción detallada del control y el funcionamiento de este bloque funcional se encuentra en [1], páginas 108 -110. En esta implementación se



utiliza también el temporizador 3 que es similar al temporizador 1 y cuya descripción y funcionamiento se encuentra en [1], páginas 113 y siguientes. El temporizador 3 es el que se utiliza junto al bloque de comparación digital para realizar la modulación.

El hecho de que los temporizadores sean de 16 bits permite que la frecuencia mínima alcanzable por el sistema para una señal cuadrada (que es el peor caso) sea de 7,62 Hz.

Debido a las características de este bloque, la duración mínima de la cuenta es dos, lo que significa que la duración del pulso más pequeño es dos veces el tiempo base, es decir, dos microsegundos. De aquí se deduce que la frecuencia máxima posible para una señal cuadrada es de 250 kHz.

Suponiendo una señal modulada TPWM-DM con cinco pulsos durante t_r , el valor mínimo que se alcanza para t_r es 0,25 ms, lo que hace que la frecuencia máxima de la señal modulada sea:

$$f_{\max TPWM_DM} = \frac{1}{2 \times 0,25 \times 10^{-3}} = 2.000 \text{ Hz} \quad (5.3)$$

Para este cálculo se ha asumido $t_r = T/2$, para así lograr el valor más alto de la frecuencia. En la tabla 5.4 se han recopilado los valores de frecuencia máxima y mínima posibles según el valor de N . El valor de la máxima

N	$t_r \text{ min}$ (ms)	Frecuencia (Hz)		V_1 (pu)	N	$t_r \text{ min}$ (ms)	Frecuencia (Hz)		V_1 (pu)
		Max.	Min.				Max.	Min.	
1	0,01	50.000,00	0,0153	1,00	11	1,21	413,22	0,0155	0,99
2	0,04	12.500,00	0,0153	1,00	12	1,44	347,22	0,0156	0,99
3	0,09	5.555,56	0,0153	1,00	13	1,69	295,86	0,0157	0,99
4	0,16	3.125,00	0,0153	1,00	14	1,95	256,41	0,0157	0,98
5	0,25	2.000,00	0,0153	1,00	15	2,24	222,22	0,0158	0,98
6	0,36	1.388,89	0,0153	1,00	16	2,55	196,08	0,0159	0,97
7	0,49	1.020,41	0,0154	1,00	17	2,89	173,01	0,0160	0,97
8	0,64	781,25	0,0154	1,00	18	3,24	154,32	0,0161	0,96
9	0,81	617,28	0,0155	1,00	19	3,61	138,50	0,0161	0,95
10	1,01	495,05	0,0155	1,00	20	4,00	125,00	0,0163	0,94

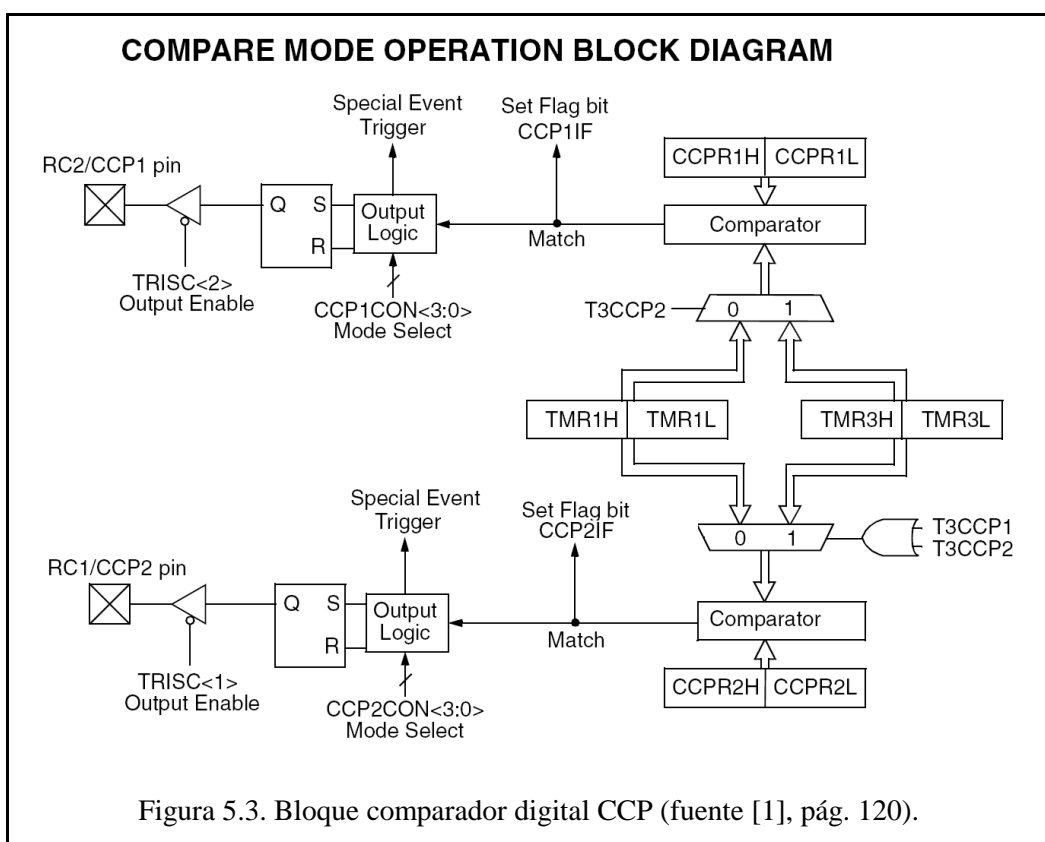
Tabla 5.4. Frecuencia máxima y mínima de la señal en función de N .

frecuencia se ha obtenido haciendo que el valor más pequeño de algún elemento del vector HL sea de dos microsegundos.

Estos valores de frecuencia mínima y máxima, así como el de t_r mínimo, sirven para concluir que la elección de una base de tiempo de un microsegundo es válida para un amplio rango de aplicaciones.

En el caso de que sea necesario aumentar la frecuencia de la señal modulada, siempre es posible reducir el valor del tiempo base hasta el valor mínimo permitido por el microcontrolador, que en este caso 60 ns (16,66 MHz).

Comparador digital. Es un bloque funcional muy útil para esta implementación puesto que permite programar el valor límite de la cuenta del contador, generando una interrupción cuando llega a ella y poniendo a cero el contador, quedando así preparado para la siguiente cuenta. La figura 5.3 muestra el diagrama de bloques del comparador digital (CCP) disponible en el



microcontrolador. Su descripción detallada y su programación se pueden encontrar en [1], páginas 117 a 123.

Como se muestra en la figura 5.3, este comparador digital puede funcionar junto con el temporizador 1 o el temporizador 3. En esta implementación se usa junto con el temporizador 3 (TMR3).

Funcionamiento por interrupciones. Para lograr una señal modulada igual a la simulada, los valores de tiempo de las tablas de conmutación calculadas para la modulación se han de cumplir con precisión. Para realizar esto, no basta con disponer de contadores binarios, comparadores y de una base de tiempo de alta precisión, sino que además, el programa que ejecuta el control de estos bloques funcionales y que ejecuta el microcontrolador durante la modulación ha de estar realizado de forma que esto se cumpla. El funcionamiento por interrupciones juega un papel fundamental para asegurar los valores de los tiempos en la señal modulada, ya que permite independizarlos del resto de los programas.

El dispositivo utilizado para esta implementación dispone de una arquitectura de interrupciones simple pero suficiente para el objetivo que se persigue. La figura 5.4 muestra la estructura del sistema de interrupciones en el microcontrolador. El funcionamiento de las interrupciones es en modo autovectorizado doble con dos niveles de prioridad, una de alta prioridad y otra de prioridad baja. Cada dispositivo causante de interrupción dispone de varios bits de control que permiten que la interrupción que genera tenga prioridad alta o baja. Estos bits de control se encuentran en un conjunto de registros denominados INTCON, PIR, PIE, IPR y RCON. La descripción del contenido de estos registros y de su funcionamiento se encuentra en [1], página 75 y siguientes. En la aplicación que se trata, a la interrupción que genera el comparador digital se le asigna prioridad alta.

De una forma general, es importante que la interrupción que genera los tiempos de la modulación sea la única interrupción de prioridad alta en el sistema. Todas las demás interrupciones, si las hay, deben de ser de prioridad baja. Este es un requisito de diseño para el programa ya que de no cumplirse no se puede asegurar que en todos los casos la duración de los pulsos sea la

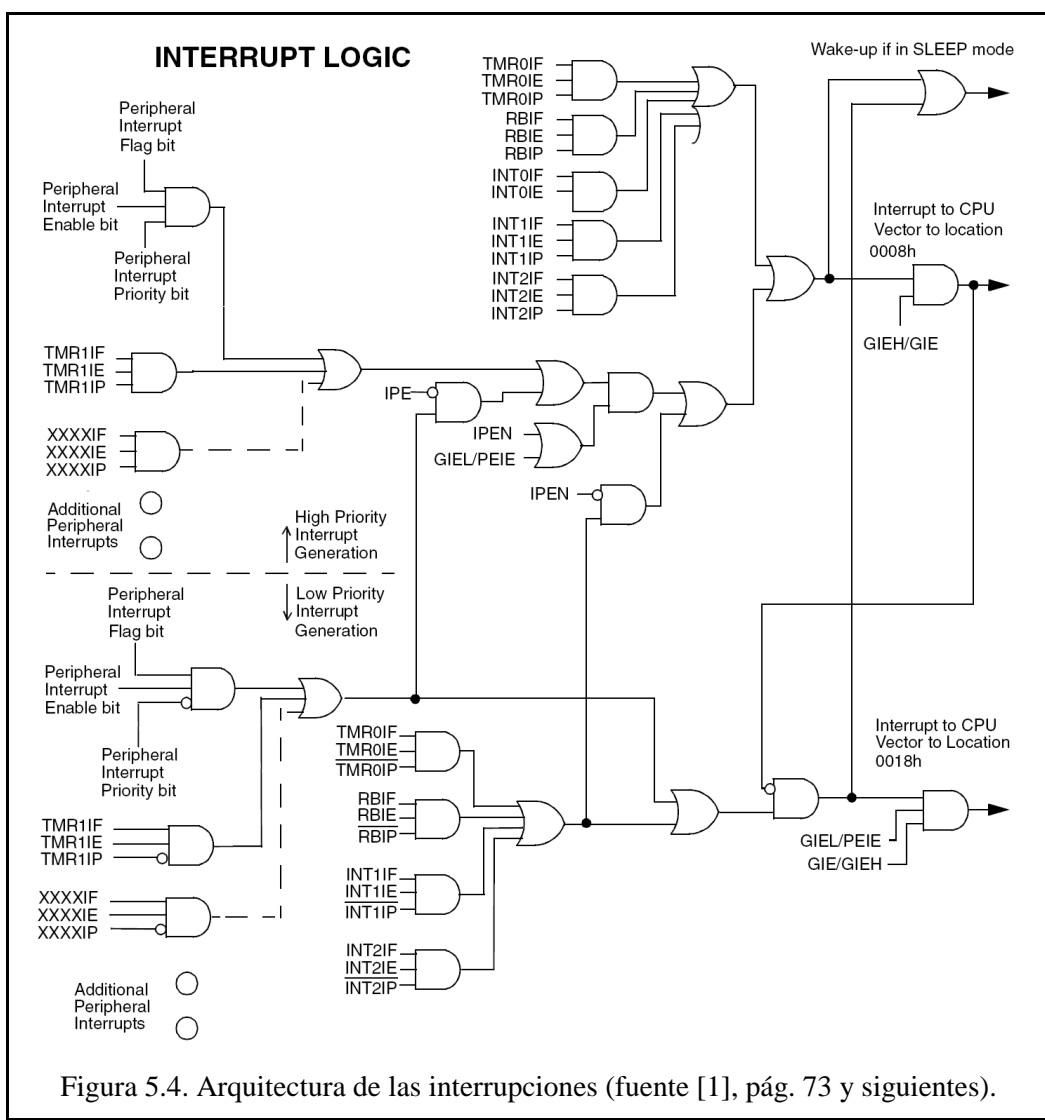


Figura 5.4. Arquitectura de las interrupciones (fuente [1], pág. 73 y siguientes).

calculada. Por otro lado, el fabricante del dispositivo asegura un tiempo de latencia constante para la interrupción. Esta es una característica muy importante para asegurar los tiempos.

Además, la rutina de interrupción de la modulación tiene otros requisitos:

- Ha de ser una rutina equilibrada en tiempo. Esto quiere decir que las diversas acciones que se desarrollen en la rutina hasta llegar al cambio de la señal modulada han de tener todas las mismas duraciones temporales.

- Su duración no puede ser mayor que el valor de tiempo más corto de la modulación. Esto implica una limitación a la frecuencia máxima discutida anteriormente ya que con el dispositivo que se ha realizado esta aplicación, la mayoría de las instrucciones se ejecutan en 100 ns, lo cual significa que para lograr los pulsos más pequeños posibles, los de 2 μ s, es necesario limitar el tiempo de ejecución de la rutina de interrupción a este valor, incluyendo el tiempo de latencia de la interrupción y el de retorno de la misma. Esto, a su vez, limita la longitud de la rutina a menos de 20 instrucciones de un ciclo máquina.

Los valores prácticos para N van de 3 a 15, ya que menos de 3 implica que los valores para THD mínimo y $WTHD$ mínimo son elevados, y mayor de 15 implica que la señal tiene muchas conmutaciones, lo que provoca pérdidas elevadas. En la tabla 5.5 se han recopilado los valores de tiempos de modulación mínimos para N entre 2 y 15. En ella puede verse que en el caso de $N = 12$, el tiempo más corto es de 7 μ s, lo que significa que la rutina de interrupción puede disponer de hasta 70 instrucciones de un ciclo máquina. Para valores superiores de N sería necesario utilizar otro dispositivo más rápido en ejecución, como los de la familia 24F que se utiliza en la implementación 2 y 3 y se describe más adelante.

a)				b)											
N	THD min %	t_r ms	t min μ s	N	THD min %	t_r ms	t min μ s	N	$WTHD$ min %	t_r ms	t min μ s	N	$WTHD$ min %	t_r ms	t min μ s
2	24,88	0,65	41	9	5,78	3,12	10	2	2,50	2,40	150	9	0,82	3,33	10
3	22,4	0,99	28	10	4,11	3,50	9	3	2,03	2,9	80	10	0,56	3,68	9
4	19,72	1,33	21	11	3,85	3,71	8	4	1,68	3,06	48	11	0,46	3,87	8
5	16,89	1,68	17	12	3,34	3,90	7	5	1,41	3,34	33	12	0,45	3,94	7
6	14,00	2,01	14	13	3,33	3,90	6	6	1,23	3,48	24	13	0,46	3,89	6
7	11,12	2,38	12	14	3,38	3,87	5	7	1,10	3,56	18	14	0,46	3,92	5
8	8,26	2,76	11	15	3,40	3,88	4	8	1,01	3,65	14	15	0,46	3,97	4

Tabla 5.5. Valores mínimos de tiempos de modulación.
a) Para THD mínimo.
b) Para $WTHD$ mínimo.

5.1.2 Esquema del sistema

La figura 5.5 muestra el esquema de la implementación realizada. En ella puede verse que se ha dispuesto de un oscilador externo que genera la base de tiempo de la modulación. La figura 5.6 muestra el montaje real sobre una placa PICDEM2 [2], que permite la conexión con el sistema de programación MPLAB ICD2 [3] y con el traductor, editor y depurador MPLAB [4].

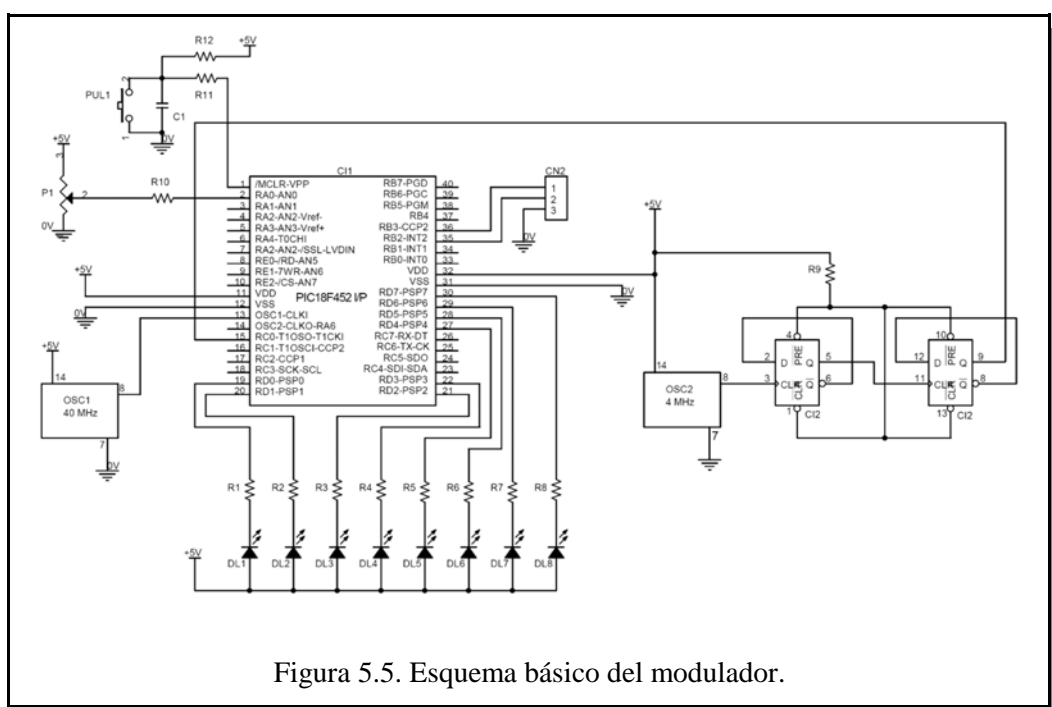


Figura 5.5. Esquema básico del modulador.

La implementación por tablas es una solución muy simple de realizar y responde exactamente a los requerimientos mínimos del modulador. En esta implementación se han incluido, además, las funciones complementarias siguientes:

- **Control de la amplitud de la frecuencia fundamental.** Se ha dispuesto un mando rotatorio que permite controlar la amplitud de la frecuencia fundamental de la señal de salida entre 0,6 pu o 0,9 pu. Para ello se hace uso del convertidor analógico - digital que dispone el μC .
- **Arranque suave.** Es un procedimiento automático que hace que a la conexión del sistema comience entregando una señal modulada TPWM-DM con la amplitud mínima (0,6 pu) para crecer hasta el valor establecido por el mando de control de amplitud. Para esta tarea se ha dispuesto de un

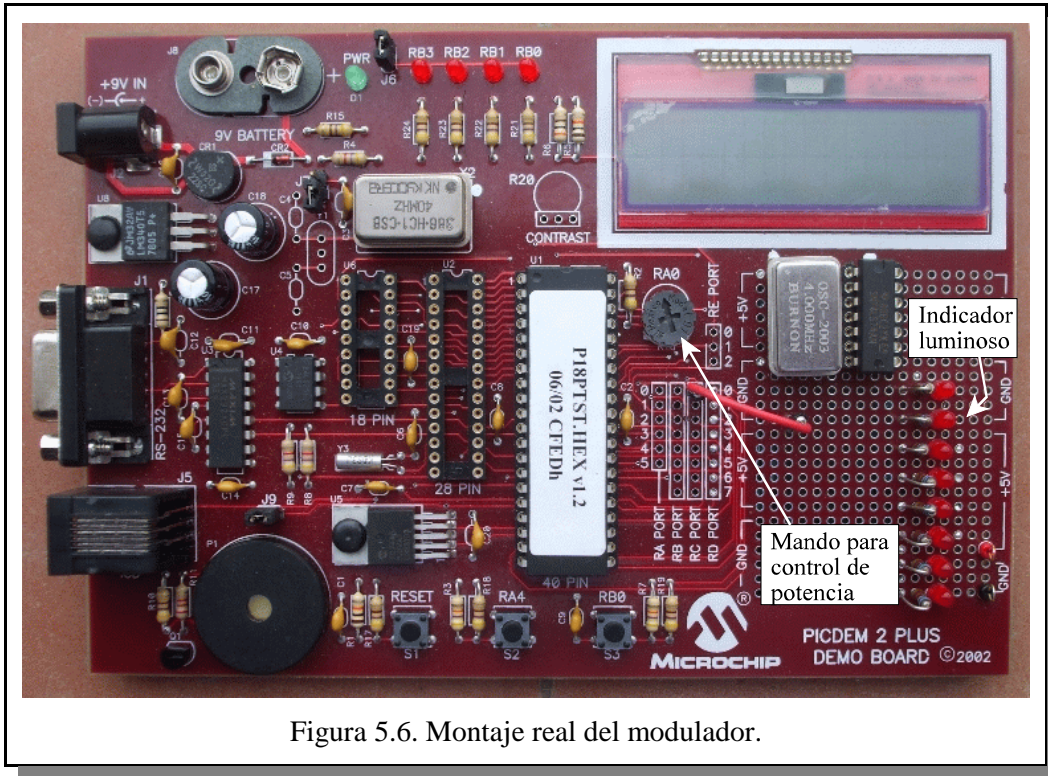


Figura 5.6. Montaje real del modulador.

segundo temporizador (de los cuatro que dispone el μC) para crear intervalos de tiempo durante los cuales se mantiene un valor determinado de amplitud en el rango indicado antes. El arranque suave se lleva a cabo iniciando la modulación con un tiempo de subida de 9 ms (amplitud mínima) y pasando cada 1,25 segundos a tiempos de subida de 8 ms, 7 ms, 6 ms, etc., hasta alcanzar el valor final definido por la posición del mando de control de amplitud.

- **Indicador luminoso.** Para poder conocer la amplitud de la señal de salida en cada momento, se ha dispuesto de un indicador luminoso compuesto por una barra de ocho diodos LED, cuyo encendido indica la amplitud de la señal. Este indicador está conectado al puerto D del μC .
- **Señal de sincronismo.** Esta es una utilidad orientada a poder visualizar de forma correcta la señal modulada en el osciloscopio, proporcionando una señal de disparo sincronizada con cada periodo de la señal modulada.

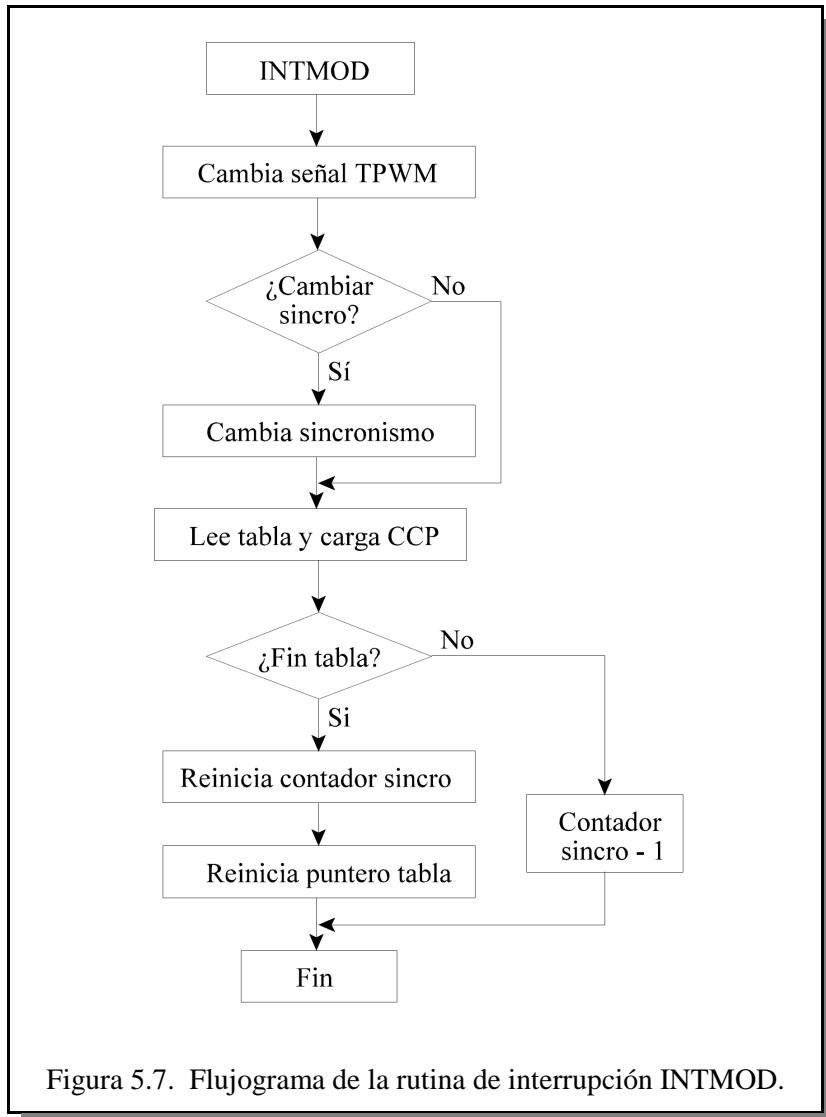
5.1.3 Programación

La programación necesaria para la implementación del modulador con la técnica TPWM-DM, descrita en el Capítulo 4, se ha realizado íntegramente en lenguaje máquina (nemónico o ensamblador) sobre un microcontrolador PIC18F452, utilizando para ello una placa PICDEM2.

La señal modulada con la técnica TPWM-DM se genera utilizando los recursos descritos antes: un oscilador externo que suministra una base de tiempo precisa de 1 μ s (frecuencia de 1 MHz), el temporizador 3 (TMR3) del μ C y el bloque de comparación digital 1 (CCP1) del μ C. La coordinación del funcionamiento y las variaciones en los tiempos de la modulación se controla por medio de una rutina de interrupción de alta prioridad denominada rutina de interrupción de la modulación (INTMOD), que es la sección más importante del programa para la modulación. Es por esta razón por la que se comienza la descripción del programa por esta rutina. El resto de rutinas y programas no se han incluido en este capítulo ya que no forman parte del núcleo de la modulación en sí misma, aunque son partes igualmente necesarias para el funcionamiento del sistema. En el Anexo A3 se encuentra la descripción de toda la programación realizada a excepción de la rutina de interrupción de modulación.

5.1.3.1 Funcionamiento de la rutina de interrupción de la modulación

El funcionamiento de la rutina de interrupción que genera la señal modulada (INTMOD) se puede describir por medio del diagrama de flujo que se muestra en la figura 5.7. Esta rutina entra en funcionamiento cada vez que termina el tiempo programado en el CCP del μ C. En ella la primera acción es cambiar el nivel de la señal de salida TPWM; si está en nivel H lo pasa a nivel L y viceversa. De esta forma, los niveles H y L se mantienen durante los tiempos establecidos en la tabla de modulación. A continuación comprueba si ha de cambiar la señal de sincronismo y procede a ello o no. La siguiente acción es leer el valor de tiempo siguiente de la tabla de tiempos y cargarlo en el comparador (CCP). A continuación comprueba si ha llegado al final de la tabla. Para ello utiliza una variable que informa de cuantas posiciones de la tabla han sido utilizadas y deduce si está en el final de la tabla o no ya que la longitud de ésta es conocida. Si no ha llegado al final de la tabla, disminuye en uno el valor del contador de tabla. Si ha llegado al final de la tabla, cambia el



estado de la señal de sincronismo y reinicia el contador de tabla y también el del puntero de la tabla. La secuencia es realmente corta y, por lo tanto, muy robusta desde el punto de vista del funcionamiento. Este diagrama de flujo se lleva a cabo por medio del programa que se muestra en el listado 5.1. Este listado corresponde a la generación de una señal con modulación TPWM-DM, $N = 5$ y $V_o/V_i = 1$.

5.1.3.2 Descripción de la rutina de interrupción de modulación

En base a los elementos descritos en los apartados anteriores, el oscilador externo, el temporizador TMR3 y el comparador digital CCP1, fundamentalmente,

esta rutina carga los registros de comparación, CCPR1H y CCPR1L, con los valores adecuados, contenidos en la tabla de modulación, para que la salida se mantenga en el estado que corresponda durante el tiempo calculado para él. Estos valores se encuentran almacenados en distintas tablas de datos que previamente han sido calculadas y descargadas en la memoria de programa. Para localizar los distintos valores en la tabla, se utiliza un puntero de dos bytes (TBLPTRH y TBLPTRL) y de ella obtiene el valor del tiempo que la señal se ha de mantener en cada estado. El listado 5.1 contiene el programa de esta rutina. Esta rutina es una parte del programa completo del modulador cuyo listado y descripción se encuentra en el Anexo A3. Los distintos nombres utilizados como etiquetas para identificar los registros, las variables y las constantes en esta y todas las otras rutinas se han recopilado también en el Anexo A3.

```

00026 ; *****
00027 ; Interrupcion de modulacion
000900          00028          org      0x900
000900 6E00          00029 INTMOD      movwf  W_TEMP
000902 CFD8 F001    00030          movff  STATUS,STATUS_TEMP
000906 0000          00031          nop
000908 0000          00032          nop
00090A 0000          00033          nop
00090C 7281          00034          btg    PORTB,2          ;TPWM
00090E 6A0A          00035          clrf  ACTUAR
000910 C009 FFE8    00036          movff  CONTADOR1,WREG
000914 0816          00037          sublw 0x16          ;22
000916 E101          00038          bnz   INTMOD_1
000918 7681          00039          btg    PORTB,3          ;50Hz
00091A C009 FFE8    00040 INTMOD_1    movff  CONTADOR1,WREG
00091E 080B          00041          sublw 0x0B          ;11
000920 E101          00042          bnz   INTMOD_2
000922 7681          00043          btg    PORTB,3          ;50Hz
000924 2A0B          00044          incf  CUENTAINT
000926 0009          00045 INTMOD_2
000928 CFF5 FFBE    00046          tblrd*+
00092C 0009          00047          movff  TABLAT,CCPR1L
00092E CFF5 FFBF    00048          tblrd*+
000932 0609          00049          movff  TABLAT,CCPR1H
000934 E00E          00050          decf  CONTADOR1
000936 949E          00051          bz    INTMOD_3
000938 B09E          00052          00053
00093A EF03 F004    00054 FIN_INTMOD  bcf    PIR1,2          ;desactiva ind.int
00093E 5000          00055          btfsc PIR1,0
000940 C001 FFD8    00056          goto  INTTEM1B
000944 0011          00057          movf  W_TEMP,W
000946 C00C F009    00058          movff  STATUS_TEMP,STATUS
00094A C01E FFF7    00059          retfie 1
00094E C01D FFF6    00060          00060
000952 680A          00061 INTMOD_3    movff  LONGTABLA,CONTADOR1
000954 EF9C F004    00062          movff  DIRTABLAH,TBLPTRH
00063          movff  DIRTABLAL,TBLPTRL
00064          setf  ACTUAR
00065          goto  FIN_INTMOD

```

Listado 5.1. Rutina de interrupción de modulación.

La rutina de interrupción de modulación comienza guardando el registro de trabajo (WREG) y el registro de estado (STATUS) en la memoria (líneas 30 y 31 del listado) para, a continuación, cambiar el estado de la señal de salida TPWM ($H \rightarrow L$ o $L \rightarrow H$, según sea) (línea 34 del listado). A continuación (línea 35), pone a cero la variable ACTUAR. Esta variable se utiliza para permitir que se pueda cambiar de tabla de modulación o no. Este cambio sólo se permite en esta aplicación al finalizar cada periodo de la señal, para evitar transitorios que generarían armónicos no deseados. A continuación (líneas 36 a 43) se comprueba si es necesario cambiar el estado de la señal de sincronización de 50 Hz. Para ello el valor de la variable CONTADOR1 lleva la cuenta del número de interrupciones de modulación que han sucedido e indica si se ha de cambiar la señal de salida. Dado que en esta aplicación la modulación se realiza con $N = 5$, suceden 11 interrupciones en un semiperiodo y 22 en un periodo completo. Por lo tanto, cuando este contador llega al valor 11 (0x0B) o al valor 22 (0x16), el estado de la señal de salida de 50 Hz se cambia (líneas 39 y 43).

En la línea 45 se incrementa en una unidad el valor de CUENTAINTE. Esta es una variable auxiliar de control que sirve para poder hacer las verificaciones funcionales necesarias durante la depuración y puesta a punto del prototipo y no tiene que ver con la modulación en sí misma.

En las líneas 47 a 50 se transfieren los valores de las posiciones correspondientes de la tabla en uso a los registros CCPR1L y CCPR1H. Una vez ejecutadas estas instrucciones, queda cargado el nuevo valor de tiempo en los registros del comparador. Sin embargo, el temporizador comenzó a contar cuando sucedió el final de la cuenta anterior, cuando se produjo la interrupción del CCP, ya que es en ese instante cuando se produce la puesta a cero del temporizador. Por lo tanto, cuando el valor de tiempo nuevo es cargado (líneas 48 y 50), el valor del contador no es cero sino el número de microsegundos transcurridos desde el final de la cuenta anterior. Como el reloj del procesador es de 40 MHz y cada ciclo básico se compone de cuatro periodos de reloj, el ciclo básico tiene una duración de $0,1 \mu\text{s}$.

En este caso, el tiempo más corto en la tabla corresponde a $t_r = 2 \text{ ms}$ y tiene una duración de $14 \mu\text{s}$. Es decir, se dispone de hasta 140 instrucciones de un ciclo hasta este instante. En la realidad se han utilizado el equivalente a 25 instrucciones de un ciclo (un 17,9 % del máximo posible), por lo que el valor del temporizador debe de ser 2 en el instante de la última escritura en el CCP (línea 50). Se concluye que sobra

bastante tiempo en este caso. Si fuera necesario reducir este número de 25 instrucciones equivalentes, es posible reordenar el listado colocando las ocho instrucciones que manejan la señal de 50 Hz después de la carga del módulo CCP1. Esto no modifica la sincronización, sino que la retrasa (la desfasa) levemente. Otra posibilidad es mover la instrucción de la línea 45.

En la línea 51 se reduce en una unidad el valor de la variable CONTADOR1 y en la línea 52 se comprueba si su valor ha llegado a cero. Si es así, es porque se ha llegado al final de la tabla y en tal caso hay que saltar (línea 52) a INTMOD_3 (línea 61). En las líneas 61 a 63 se recargan los valores de CONTADOR1 y del puntero de la tabla (TBLPTRH y TBLPTRL) a sus valores de comienzo para recorrer de nuevo la tabla. En la línea 64 se carga 0xFF en la variable ACTUAR, indicando con ello que se ha llegado al final del ciclo de modulación.

El trozo de programa que queda, líneas 54 a 59, constituye el final de la rutina. En la línea 54 se desactiva el indicador de la interrupción del CCP, permitiendo con ello la llegada de otra interrupción. En las líneas 55 y 56 se comprueba si hay una interrupción pendiente del temporizador 1 y si la hay salta a ella (INTTEM1B) pero de una forma especial, evitando las primeras instrucciones de esta rutina (ver listado A3.1 en el Anexo A3).

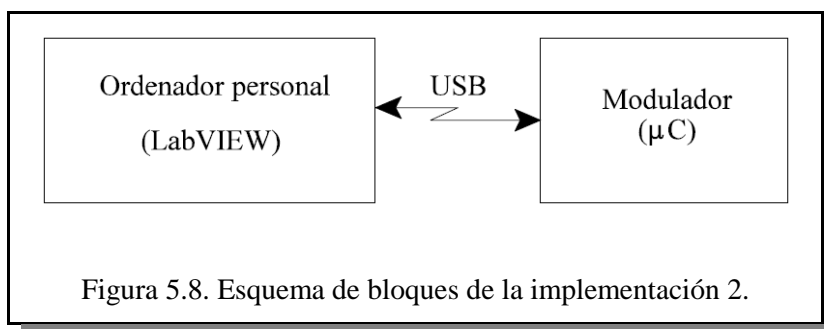
La duración máxima de esta rutina es de 4,5 μ s, por lo que aún durante los pulsos más cortos (14 μ s), sobra tiempo para que el procesador pueda atender a otras rutinas.

5.2 Implementación 2. Bajo control de un ordenador personal

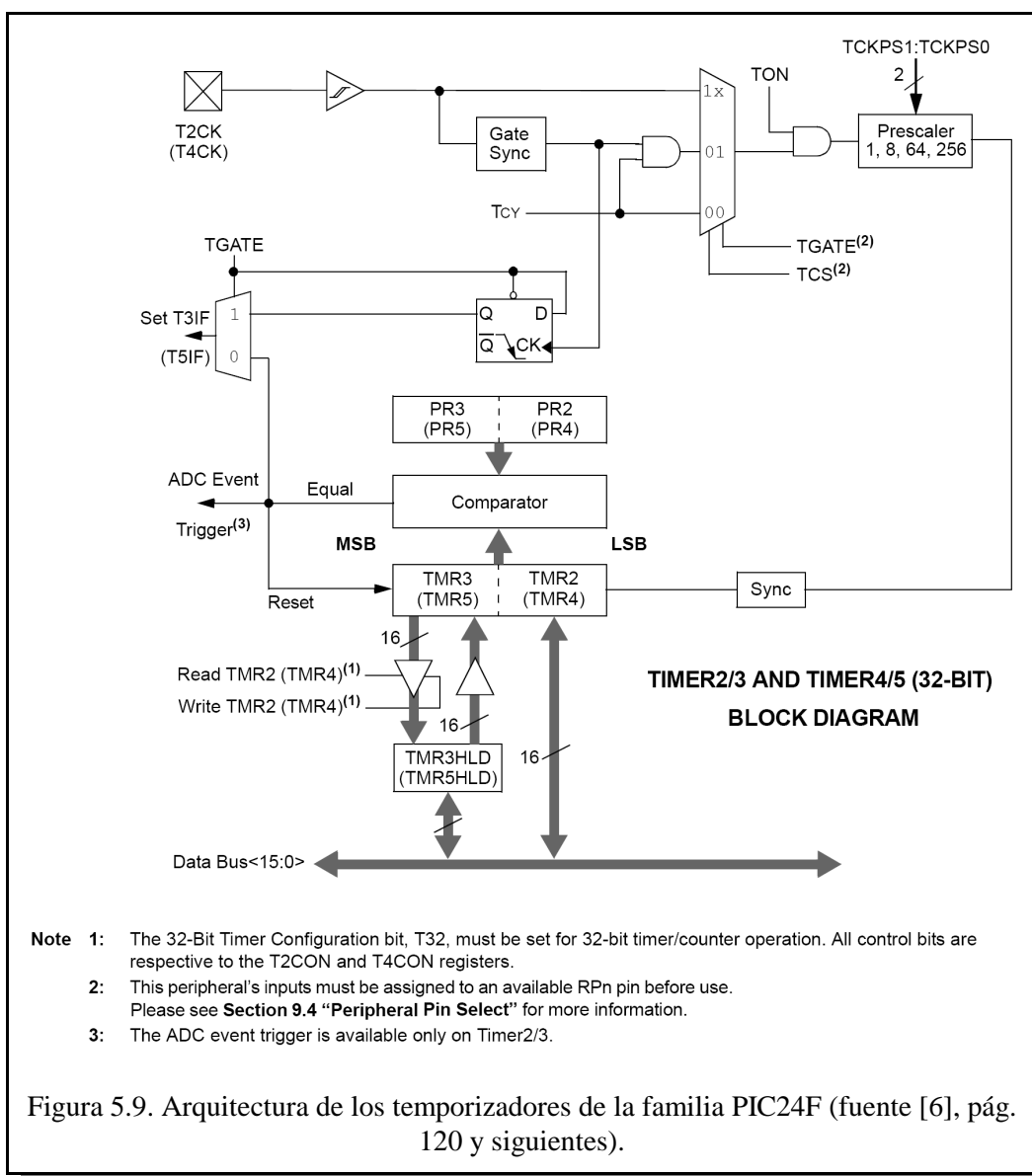
La implementación 1, descrita en el apartado 5.1, tiene como principal inconveniente la rigidez en cuanto al cambio de algunos parámetros de modulación como M o el número de pasos entre diferentes valores de t_r , ya que se basa en tablas de valores constantes almacenadas en el μ C. Aunque esta forma de hacer resulta válida en cuanto a la verificación de las características de la señal modulada obtenida, con vista a poder experimentar más resultados y con mayor facilidad, debería ser

posible cambiar el valor de M , a voluntad. Esto puede complicar mucho la programación del sistema utilizando la implementación primera puesto que si, por ejemplo, se desea realizar medidas sobre una señal de 50 Hz con tiempos de subida entre 0 y 10 ms a paso de 0,1 ms, es necesario disponer de 100 tablas. Si además es necesario que esto se realice con $M = 3$, $M = 5$, etc., el número anterior de tablas hay que multiplicarlo por el número de valores diferentes de M . Tampoco hay que olvidar que las tablas tienen diferente longitud para cada valor de M , lo cual complica la programación de control del modulador.

Para solucionar este inconveniente y ampliar la flexibilidad de experimentación con esta técnica de modulación, se ha realizado una segunda implementación en la que los valores de las tablas son calculados en un ordenador personal bajo entorno LabVIEW, que permite descargarlas al microcontrolador por medio de una conexión USB (Universal Serial Bus) entre el ordenador y el μC . La figura 5.8 muestra el esquema de bloques de esta implementación. Para ello se ha utilizado una unidad específica de desarrollo (16-bit 28-pin Starter Development Board) [5] que dispone de un microcontrolador de la familia PIC24FJ64GA004 [6] cuyo precio para cantidades industriales es de 1,94 €. Esta familia dispone, como en el caso descrito antes, de temporizadores de 16 bits (TMRy) y módulos de comparación digital (CCPx), que son los elementos que se utilizan, también en este caso, para la modulación de la señal.

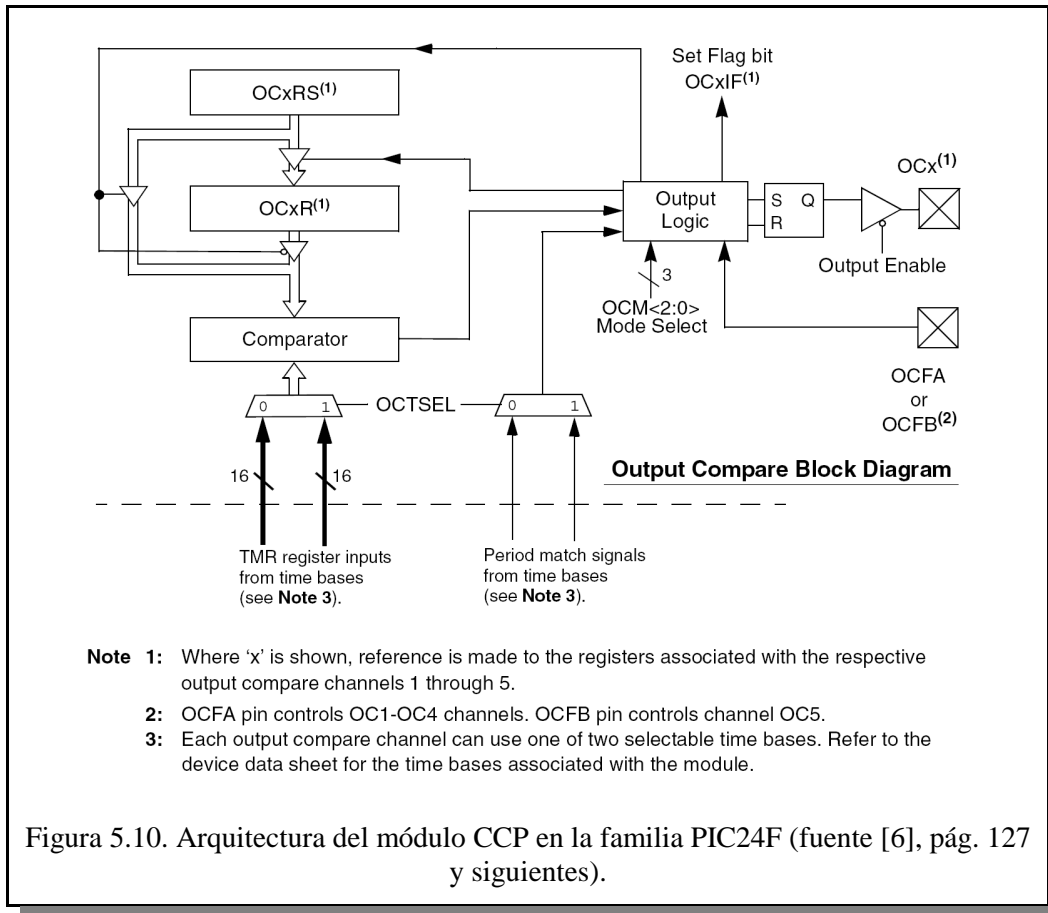


Los temporizadores de esta familia de μC tienen la estructura que se muestra en la figura 5.9 y se diferencian de los de la familia PIC18F en que disponen de un registro que limita el valor máximo de la cuenta del temporizador denominado PRy (Period Register del temporizador y) de forma que al llegar al número programado en este registro, el temporizador se pone a cero y comienza de nuevo la cuenta. Esta funcionalidad no está en los temporizadores de la familia PIC18F. Además pueden



ser configurados como temporizadores de 16 y 32 bits, aunque la configuración de 32 bits no se utiliza en esta implementación.

Los módulos de comparación digital, CCPx, de esta familia de μ Cs son ligeramente diferentes al descrito en los apartados anteriores. La figura 5.10 muestra su arquitectura. En ella puede verse que es muy parecida a la descrita para el microcontrolador PIC 18F. Sin embargo tiene diferencias funcionales que hacen que su utilización sea más simple. Dispone de dos registros de 16 bits para el control de cuenta denominados OCxR (Output Compare Register) y OCxRS (Secondary Output



Compare Register), que permiten realizar una doble comparación. Además la señal de salida del módulo (patilla OCx) evoluciona respecto a los valores de estos registros de comparación como se muestra en la figura 5.11. En ella puede verse que la utilización de los registros OCxR, OCxRS y PRy hace que la señal de salida se mantenga a nivel bajo y alto durante intervalos de tiempo claramente definidos. En el ejemplo que describe la figura, la patilla OCx se mantiene a nivel bajo desde el comienzo de la cuenta hasta que esta alcanza el valor cargado en el registro OCxR; en este momento la salida OCx pasa a nivel alto y se mantiene así hasta que la cuenta alcanza el valor del registro OCxRS, instante en el que pasa de nuevo a nivel bajo.

Observando las tablas de tiempos de modulación, se deduce que éstas siempre están formadas por un número par de valores; 14 para $M = 6$, 22 para $M = 11$, 26 para $M = 13$, etc., ya que cada tiempo a nivel alto lleva asociado un tiempo a nivel bajo. Con el objetivo de adaptar estas tablas al funcionamiento del módulo CCPx del μC , conviene reordenar los valores de las tablas de modulación para formar una nueva

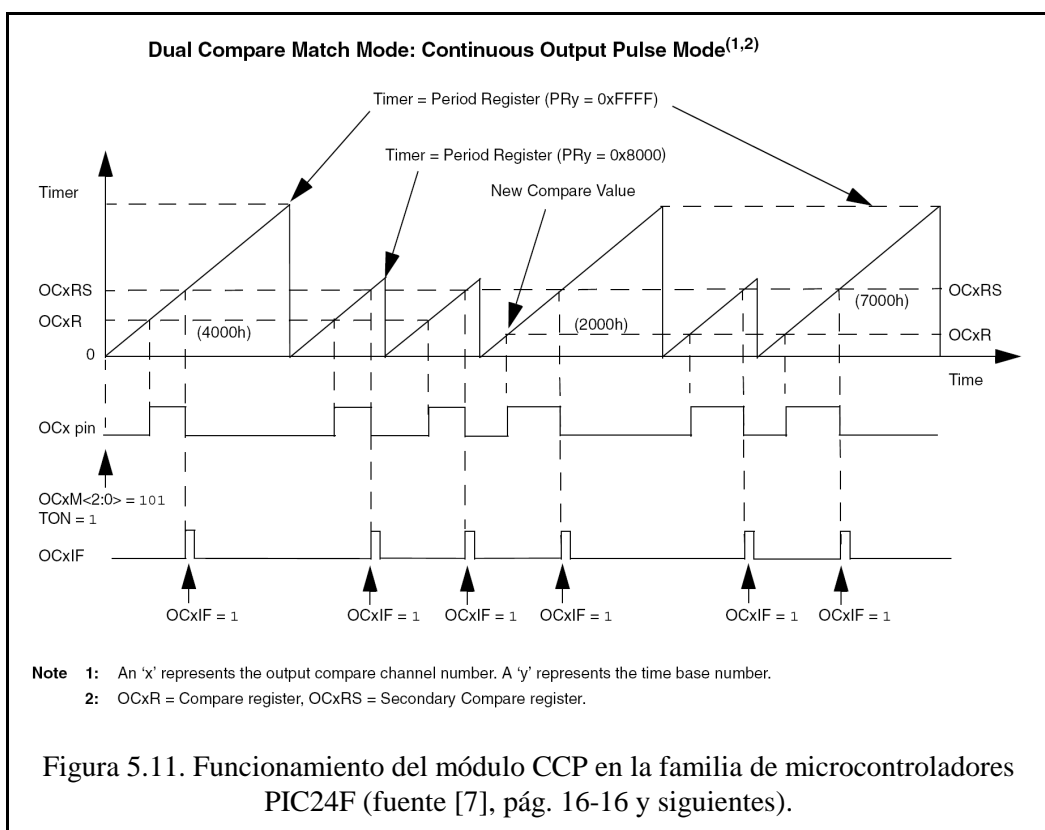


tabla constituida por pares de valores $\{t_{nivel_bajo_n}; t_{nivel_alto_n}\}$. La tabla 5.6 muestra un ejemplo de esta reorganización de valores para el caso de una señal modulada de 50 Hz con $M = 11$. Así, la nueva tabla de modulación contiene $M + 1$ pares de valores.

Para acoplar estos valores al módulo CCP es necesario comenzar con un valor de tiempo de señal a nivel bajo; por eso se ha formado el primer par de valores de la tabla 5.6 b) tomando el valor del nivel bajo de la fila 22 de la tabla 5.6 a), que es el valor de $t_L + t_{prev_1}$, y el valor de la fila 1 de esta tabla. Las siguientes filas de la tabla b) se han formado con la agrupación consecutiva de las filas siguientes de la tabla a). Esta operación sólo cambia el orden de los datos, pero no la forma de la señal modulada. La diferencia física es que en el caso de la tabla 5.6 a), el primer periodo de la señal modulada comienza con un pulso a nivel alto, mientras que en el caso de la tabla 5.6 b) comienza con un nivel bajo.

La necesidad de reordenar los valores de tiempo de la tabla 5.6 a) a la tabla 5.6 b) es consecuencia del funcionamiento del módulo CPPx del μC . Para transcribir estos valores de tiempo a la forma de onda modulada se cargan los pares de valores

		t_r (ms)			
	Nivel	2	3	4	5
1	H	40	60	80	100
2	L	320	480	640	800
3	H	120	180	240	300
4	L	240	360	480	600
5	H	200	300	400	500
6	L	160	240	320	400
7	H	280	420	560	700
8	L	80	120	160	200
9	H	360	540	720	900
10	L	20	30	40	50
11	H	8180	7270	6360	5450
12	L	40	60	80	100
13	H	320	480	640	800
14	L	120	180	240	300
15	H	240	360	480	600
16	L	200	300	400	500
17	H	160	240	320	400
18	L	280	420	560	700
19	H	80	120	160	200
20	L	360	540	720	900
21	H	20	30	40	50
22	L	8180	7270	6360	5450

a)

		t_r (ms)			
	Nivel	2	3	4	5
1	L ; H	8180 ; 40	7270 ; 60	6360 ; 80	5450 ; 100
2	L ; H	320 ; 120	480 ; 180	640 ; 240	800 ; 300
3	L ; H	240 ; 200	360 ; 300	480 ; 400	600 ; 500
4	L ; H	160 ; 280	240 ; 420	320 ; 560	400 ; 700
5	L ; H	80 ; 360	120 ; 540	160 ; 720	200 ; 900
6	L ; H	20 ; 8180	30 ; 7270	40 ; 6360	50 ; 5450
7	L ; H	40 ; 320	60 ; 480	80 ; 640	100 ; 800
8	L ; H	120 ; 240	180 ; 360	240 ; 480	300 ; 600
9	L ; H	200 ; 160	300 ; 240	400 ; 320	500 ; 400
10	L ; H	280 ; 80	420 ; 120	560 ; 160	700 ; 200
11	L ; H	360 ; 20	540 ; 30	720 ; 40	900 ; 50

b)

Tabla 5.6. Reorganización de la tabla de modulación para $N = 5$. a) Tabla original. b) Tabla reorganizada.

de la tabla 5.6 b) como sigue; el valor de $t_{nivel_bajo_n}$ en el registro OCxR y el valor de $t_{nivel_alto_n}$ en los registros OCxRS y PRy correspondientes.

La ordenación de los valores de la tabla de modulación en la memoria del μC es tal y como se muestra en la tabla 5.6 b). En este caso, los valores de cuenta se escriben de dos en dos (datos de 16 bits) en los registros indicados de CCPx y TMPy.

Este modo de utilizar el módulo CCPx y el temporizador asociado, TMRy, es el que se ha llevado a cabo en esta segunda implementación. En este caso, ya que la señal modulada se obtiene directamente de los circuitos (hardware), la parte de programación que en la implementación anterior tenía que poner a nivel bajo o alto la señal de salida, ya no es necesaria. Esto significa que con esta implementación no hay que compensar ninguno de los valores de las tablas puesto que no hay retraso al

no haber intervención directa del programa (rutina de modulación) sobre la señal de salida.

Utilizando de esta forma los recursos disponibles se reduce la intervención del programa, no sólo sobre la señal de salida, sino que en lugar de cargar un registro en cada ocasión (para la señal en alto y en bajo) en la implementación anterior, ahora se cargan los tres registros implicados en cada par de tiempos. Esto hace que la UCP (Unidad Central de Proceso) del μC reciba la mitad de interrupciones del módulo CCP que en el caso anterior, y cada más tiempo (la suma de los valores de cada par), quedando más tiempo de UCP para otras actividades, como por ejemplo mantener la comunicación vía USB con el ordenador personal para informar del estado del modulador o para recibir nuevas configuraciones de modulación. Esto también permite que la frecuencia de la señal de salida pueda ser superior y que los tiempos más cortos en la señal modulada puedan ser inferiores a cinco microsegundos, lo que, a su vez, permite incrementar el número de pulsos por periodo.

En esta implementación se ha utilizado la placa de desarrollo de Microchip Inc., que se muestra en la figura 5.12.

Aunque no se ha citado antes, no deja de ser importante que esta familia de microcontroladores tiene características superiores a la familia PIC18 que afectan directamente a la modulación. Estas son las siguientes, según las especificaciones del fabricante:

- UCP de 16 bits en lugar de 8 bits. Lo que significa, entre otras cosas, que la carga de los registros del módulo CCPx y TMRy se realizan en una sola instrucción, lo cual reduce el tiempo de ejecución. Además, la lectura de la tabla se hace también en una sola instrucción.
- Mayor velocidad de ejecución; 16 MIPs (Mega Instrucciones por segundo) frente a 10 MIPs (+60 % respecto al caso anterior).
- Mayor velocidad de conversión analógico - digital; hasta 500.000 muestras/s.

Sin embargo, aunque el sistema tiene bastante mejores prestaciones técnicas, la señal modulada que se logra tiene las características esperadas a partir del

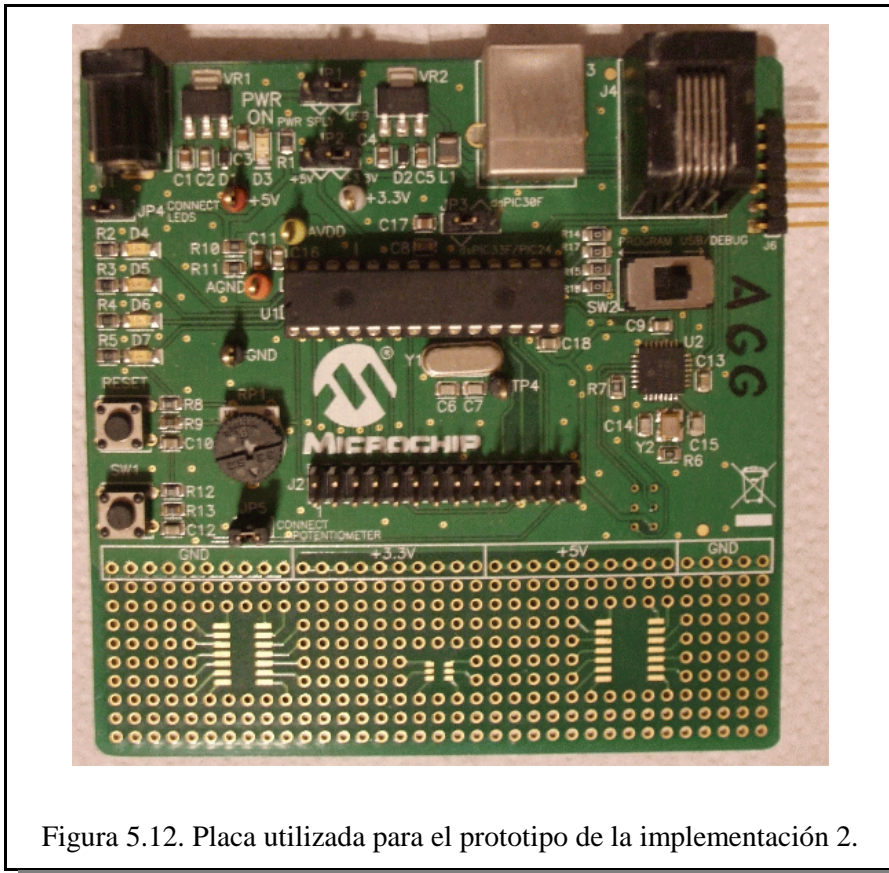


Figura 5.12. Placa utilizada para el prototipo de la implementación 2.

desarrollo teórico realizado en el Capítulo 3, verificadas en la simulación (capítulo 4) y comprobadas en el primer prototipo. Es decir que las mejoras producidas por el cambio de modelo de microcontrolador no afectan a la base de la modulación en sí misma. Sin embargo, esta implementación ha permitido la experimentación y verificación de un mayor número de opciones de modulación ya que, gracias a la conexión USB con un ordenador personal, los valores de las tablas que se desean verificar sólo requiere su cálculo en el ordenador y su descarga del ordenador al μC , unos segundos en total. En el caso de la primera implementación era necesario rehacer la parte del programa correspondiente a las tablas.

La figura 5.13 muestra el aspecto del banco de trabajo de esta implementación. En ella se han identificado las diferentes partes:

- A. Ordenador personal donde se establecen los parámetros de la modulación requerida y se calculan los valores de tiempo bajo entorno LabVIEW.

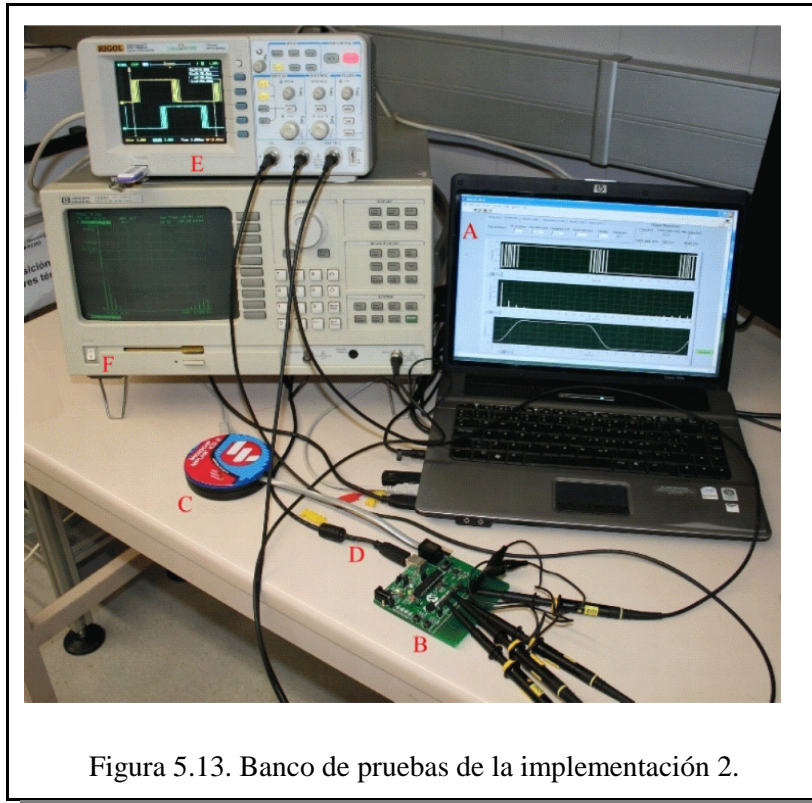


Figura 5.13. Banco de pruebas de la implementación 2.

- B. Modulador TPWM-DM, realizado con μC PIC24F.
- C. Equipo para la programación y depuración de los programas del μC (ICD3).
- D. Conexión USB entre el modulador y el ordenador.
- E. Osciloscopio.
- F. Analizador de espectro.

Esta forma de trabajar permite la simulación de la señal con los valores establecidos antes de generarlos eléctricamente, aportando una información exacta de las características finales de la señal obtenida. La pantalla de control de la aplicación bajo LabVIEW es lo que se muestra en la figura 5.14. En ella se puede ver que arriba a la izquierda se pueden introducir los parámetros deseados para la modulación, obteniéndose como resultado los valores de los tiempos y las medidas de las características realizadas sobre simulación.

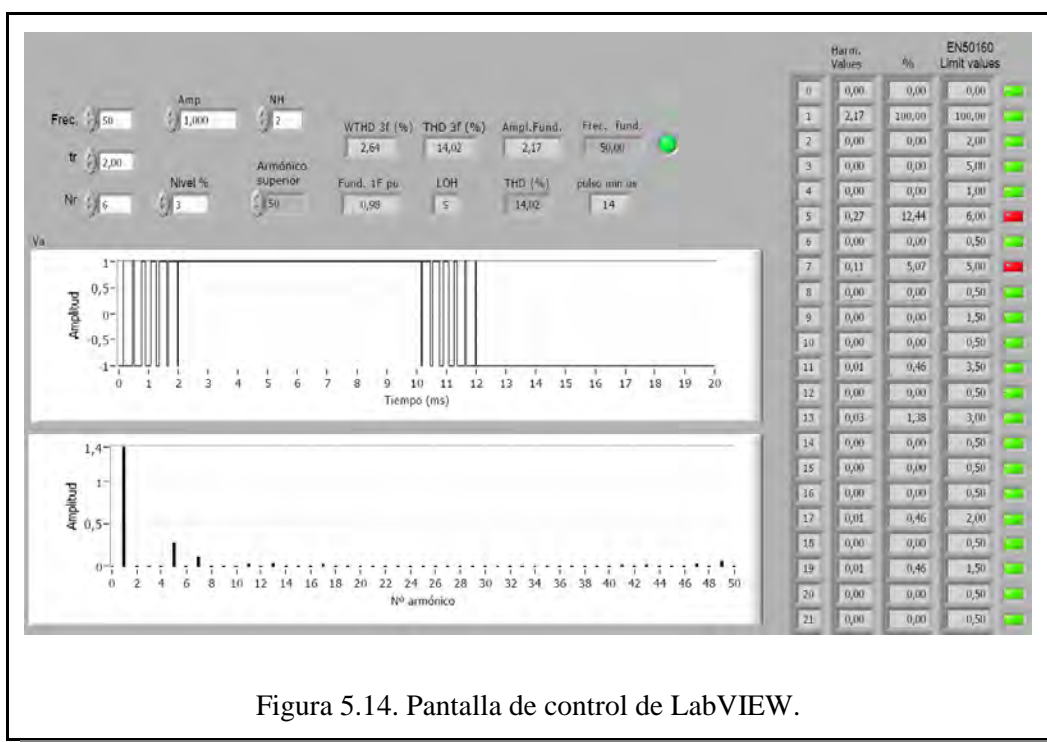


Figura 5.14. Pantalla de control de LabVIEW.

5.3 Implementación 3. Autónoma

La implementación descrita en el apartado anterior tiene una dependencia importante del ordenador personal externo para cambiar el esquema de conmutaciones de la señal modulada. Esta implementación es interesante para poder experimentar con diferentes combinaciones de los parámetros de modulación, pero no es tolerable en una aplicación industrial ya que el sistema debe funcionar por sí solo. Es por esta razón por la que se ha realizado una implementación en la que se ha eliminado esta dependencia sin perder las prestaciones. A esta implementación se ha denominado implementación autónoma.

Para llevarla a cabo, se ha utilizado la observación final hecha en el apartado 3.5.1 acerca del vector-semilla. De ella se deduce que si el sistema μC dispone de recursos computacionales suficientes, no es necesario que en la memoria existan en todo momento todas las tablas posibles de modulación, sino que basta con la semilla de cada una de ellas.

Para realizar esta implementación se ha utilizado el mismo dispositivo que en el caso anterior, ya que tiene los recursos necesarios para la modulación y los recursos computacionales necesarios para obtener todos los valores de las tablas a partir de sus semillas. Para esto, lo único necesario es disponer de una ULA (Unidad Lógica y Aritmética) con multiplicador aritmético. La programación, en este caso se ha realizado en lenguaje C y en lenguaje máquina (nemónico o ensamblador). En C se ha hecho toda la parte de cálculo de las tablas a partir de la semilla correspondiente y las rutinas de control que no tienen prioridad de ejecución. El lenguaje máquina se ha utilizado, como en las implementaciones anteriores, en la rutina de interrupción de modulación. Dado que el modelo de μC utilizado dispone de 64 kB de memoria de programa y 8 kB de memoria RAM, el número de esquemas de modulación (combinaciones diferentes de los parámetros de modulación) que soporta excede en mucho a una necesidad industrial real.

Con esta implementación es posible mantener la señal modulada en el valor de *THD* mínimo o el valor mínimo de *WTHD* en función de la amplitud requerida para la señal de salida. Para ello, conociendo las curvas de respuesta de *THD* y *WTHD* con el tiempo de subida, mostradas en apartados anteriores (Capítulo 4) y los Anexos A2 y A4, el programa selecciona la mejor opción (tiempo de subida) para la amplitud requerida.

5.4 Implementación 4. Trifásica completa

En las implementaciones anteriores se ha realizado la modulación de una rama de un inversor trifásico y los resultados se han extrapolado a las tres ramas, obteniendo los resultados trifásicos finales por cálculo. Hay una excepción al párrafo anterior y es que con la implementación primera se hizo una versión trifásica utilizando dos μC de la familia PIC18 con funcionamiento sincronizado. Uno de ellos actuó como maestro y el otro como esclavo. En el maestro se generaron dos de las fases y en el esclavo la tercera. Sin embargo, a pesar de que los resultados fueron buenos, la implementación fue complicada.

En la implementación que se describe en este apartado se generan las tres fases por medio de un sólo dispositivo. Para ello se utiliza un μC dsPIC33FJ256GP710A

[8] ya que los dispositivos utilizados en las implementaciones anteriores no tienen los recursos necesarios.

En este caso, la programación del μC se ha realizado en lenguaje C y lenguaje máquina. En esta implementación las tablas de modulación no se calculan a partir de semillas sino a partir de las ecuaciones de modulación obtenidas en el Capítulo 3. Esto es posible hacerlo gracias a que el dispositivo utilizado tiene recursos más que suficientes para ello, algunos de estos recursos son los siguientes:

- 40 MIPS, frente a 16 del caso anterior.
- Multiplicador aritmético 16 x 16 bits.
- 256 kB de memoria de programa.
- 30 kB de memoria RAM.
- 9 temporizadores de 16 bits, reconfigurables a 32 bits.
- 8 Módulos CCP.

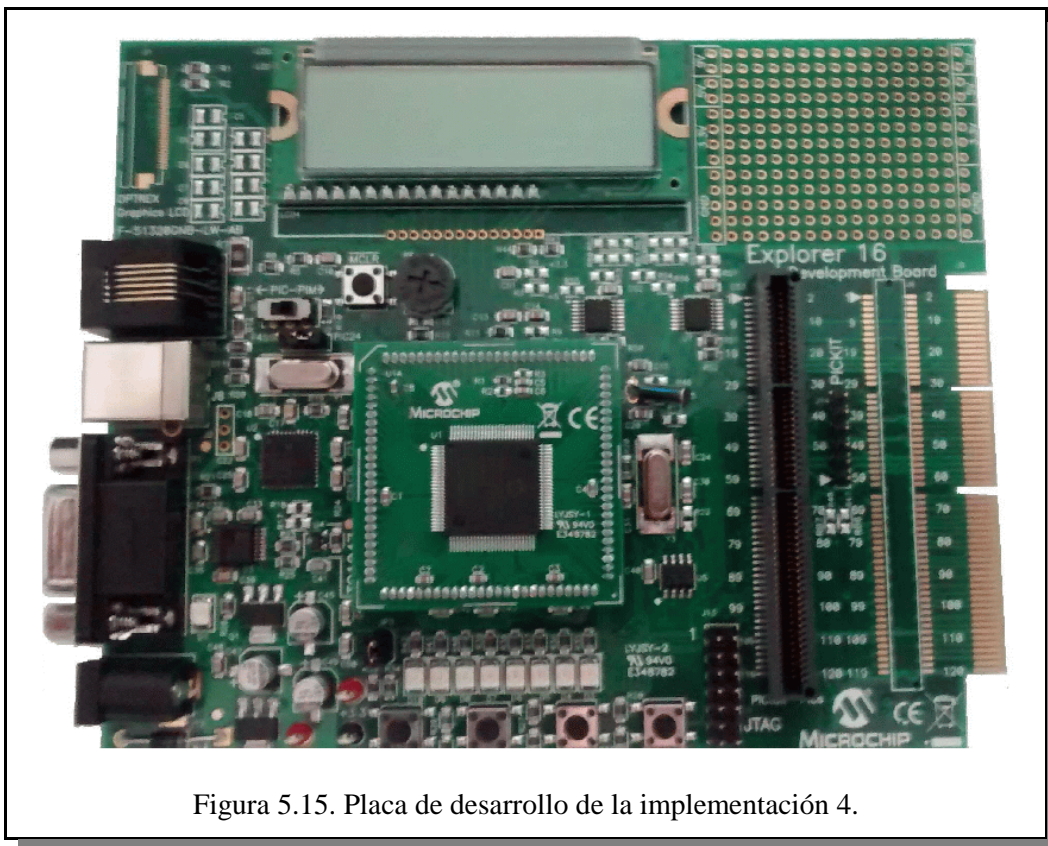


Figura 5.15. Placa de desarrollo de la implementación 4.

Este dispositivo, para cantidades industriales, tiene un precio de 5,02 €.

Para su programación y puesta en marcha se ha utilizado una placa de desarrollo específica denominada “Explorer 16 Development Board” [9], también de Microchip Inc. (figura 5.15).

En este caso se ha utilizado el entorno de desarrollo de última generación MPLAB® X IDE para Windows, de Microchip Inc. [10].

La figura 5.16 muestra el banco de pruebas utilizado. Las pruebas se han realizado utilizando un inversor de Semikron, modelo SKS_140F_B6CI_92_V12.

Las características de la señal modulada TPWM-DM obtenida con esta implementación son iguales a las obtenidas con las implementaciones anteriores, como era de esperar, ya que la base teórica es la misma.

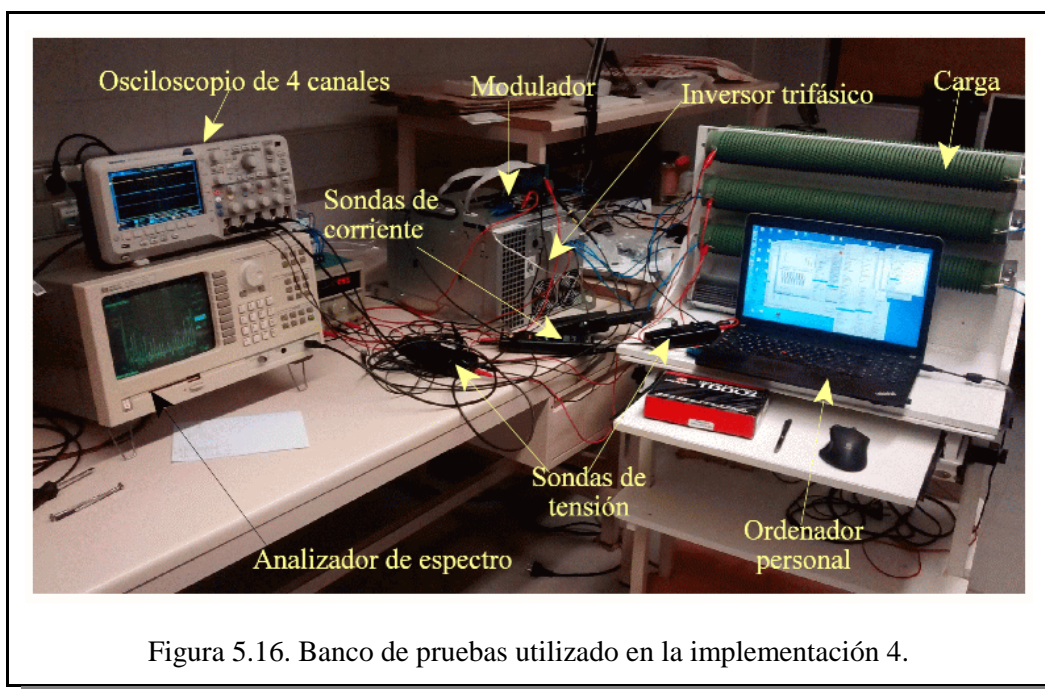


Figura 5.16. Banco de pruebas utilizado en la implementación 4.

Referencias

- [1] Microchip Technology Inc., “PIC18FXX2 Data Sheet, High-Performance, Enhanced Flash Microcontrollers with 10-Bit A/D”, 2006, DS39564C.
- [2] Microchip Technology Inc., “PICDEM™ 2 Plus Demonstration Board User’s Guide”, 2011, DS41584B.
- [3] Microchip Technology Inc., “MPLAB® ICD 2 In-Circuit Debugger User’s Guide”, 2007, DS51331C.
- [4] Microchip Technology Inc., “MPASMT Assembler, MPLINKT Object Linker, MPLIBT Object Librarian”, 2005, DS33014J.
- [5] Microchip Technology Inc., “16-Bit 28-Pin Starter Development Board User’s Guide”, 2008, DS51656B.
- [6] Microchip Technology Inc., “PIC24FJ64GA004 Family Data Sheet, 28/44-Pin General Purpose, 16-Bit Flash Microcontrollers”, 2010, DS39881D.
- [7] Microchip Technology Inc., “PIC24F Family Reference Manual, Section 16. Output Compare”, 2006, DS39706A.
- [8] Microchip Technology Inc., “dsPIC33FJXXXGPX06A/X08A/X10A, Data Sheet”, 2009, DS70593B.
- [9] Microchip Technology Inc., “Explorer 16 Development Board User’s Guide”, 2014, DS50001589B.
- [10] Microchip Technology Inc., “MPLAB® X IDE User’s Guide”, 2014, DS50002027C.

Capítulo 6

Resultados

Índice

Capítulo 6. Resultados	6-1
6.1 Resultados de la simulación	6-1
6.2 Resultados de la implementación	6-19
6.2.1 Formas de onda obtenidas	6-19
6.2.2 Medidas de tiempos	6-24
6.2.3 Medidas de frecuencia y armónicos	6-25
6.3 Comparativas de calidad de la señal	6-30
6.3.1 Caso de estudio 1: Análisis para $M = 7$	6-33
6.3.2 Caso de estudio 2: Análisis para $M = 11$	6-34
6.3.3 Caso de estudio 3: Análisis para $M = 15$	6-35
6.3.4 Caso de estudio 4: Análisis para $M = 21$	6-36
6.3.5 Caso de estudio 5: Análisis para $M = 27$	6-37
Referencias	6-38

Índice de figuras

Figura 6.1. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 10$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$	6-4
Figura 6.2. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 25$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$	6-5
Figura 6.3. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$	6-6
Figura 6.4. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 75$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$	6-7
Figura 6.5. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 100$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$	6-8
Figura 6.6. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 150$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$	6-9
Figura 6.7. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 200$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$	6-10
Figura 6.8. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 10$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$	6-12
Figura 6.9. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 25$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$	6-13
Figura 6.10. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$	6-14
Figura 6.11. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 75$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$	6-15
Figura 6.12. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 100$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$	6-16
Figura 6.13. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 150$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$	6-17

Figura 6.14. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 200$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$ 6-18

Figura 6.15. Formas de onda de la señal TPWM-DM para $f = 50$ Hz, $N = 5$.
a) $t_r = t_f = 2$ ms. b) $t_r = t_f = 3$ ms. 6-20

Figura 6.16. Formas de onda de la señal TPWM-DM para $f = 50$ Hz, $N = 5$.
a) $t_r = t_f = 4$ ms. b) $t_r = t_f = 5$ ms. 6-21

Figura 6.17. Formas de onda de la señal TPWM-DM para $f = 50$ Hz, $N = 5$.
a) $t_r = t_f = 6$ ms. b) $t_r = t_f = 7$ ms. 6-22

Figura 6.18. Formas de onda de la señal TPWM-DM para $f = 50$ Hz, $N = 5$.
a) $t_r = t_f = 8$ ms. b) $t_r = t_f = 9$ ms. 6-23

Figura 6.19. Analizador de espectro HP 3588A. 6-25

Figura 6.20. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 2$ ms. . . 6-27

Figura 6.21. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 3$ ms. . . 6-28

Figura 6.22. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 4$ ms. . . 6-28

Figura 6.23. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 5$ ms. . . 6-28

Figura 6.24. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 6$ ms. . . 6-29

Figura 6.25. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 7$ ms. . . 6-29

Figura 6.26. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 8$ ms. . . 6-29

Figura 6.27. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 9$ ms. . . 6-30

Índice de tablas

Tabla 6.1. Resumen de los valores obtenidos en la simulación para $N = 6$ y $N = 9$	6-3
Tabla 6.2. Valores de tiempos medidos en la señal modulada.	6-24
Tabla 6.3. Medidas de la frecuencia de la señal modulada.	6-25
Tabla 6.4. Medidas de armónicos en una señal modulada TPWM-DM de 50 Hz para $N = 5$ y $t_r = t_f$ de 2 a 9 ms.	6-26
Tabla 6.5. Comparativa de valores medidos y simulados de THD y $WTHD$ para una señal TPWM-DM de 50 Hz para $N = 5$ y $t_r = t_f$ de 2 a 9 ms.	6-27
Tabla 6.6. Comparativa de indicadores de calidad para varias técnicas de modulación.	6-31
Tabla 6.7. Comparativa de indicadores de calidad para $M = 7$	6-33
Tabla 6.8. Comparativa de indicadores de calidad para $M = 11$	6-34
Tabla 6.9. Comparativa de indicadores de calidad para $M = 15$	6-35
Tabla 6.10. Comparativa de indicadores de calidad para $M = 21$	6-36
Tabla 6.11. Comparativa de indicadores de calidad para $M = 27$	6-38

Capítulo 6. Resultados

En los capítulos anteriores se ha desarrollado la modulación TPWM-DM desde el punto de vista teórico (Capítulo 3), a continuación se ha realizado la simulación de este desarrollo (Capítulo 4) como paso previo a la implementación real (Capítulo 5). En este capítulo se recogen los resultados obtenidos en las fases de simulación e implementación para realizar una comparativa de estos resultados para poder ver lo próximo o lejano que se encuentran los resultados obtenidos por medio de la simulación de los resultados reales.

La última parte de este capítulo se dedica a comparar de los resultados obtenidos con la técnica TPWM-DM con los de otras técnicas de modulación.

6.1 Resultados de la simulación

La herramienta de simulación descrita en el Capítulo 4, se ha utilizado para obtener las medidas de los indicadores de calidad descritos en el Anexo A1 y así poder analizar las características de la señal TPWM-DM obtenida.

Las figuras 6.1 a 6.14 muestran los resultados de las medidas realizadas por medio de la simulación para distintos parámetros de la señal trifásica para $V_o/V_i=1$. En todas ellas hay cinco gráficas en cuyo eje x se ha representado el valor del tiempo de subida y bajada de la señal, mientras que el eje y representa los valores medidos en simulación de los indicadores de calidad de la señal como siguen: la distorsión armónica ponderada ($WTHD$) y el factor de distorsión (DF), expresados como tanto por ciento; la amplitud del armónico fundamental (V_{1pu}); la distorsión armónica total (THD) expresada en tanto por ciento; el valor de los indicadores LOH y $PF50160$ expresados en unidades HO (Harmonic Order), y, por último, el valor de la frecuencia fundamental de la señal, en Hz.

Los indicadores LOH y $PF50160$ sirven de ayuda para definir las características de respuesta en frecuencia del filtro de salida, necesario para adecuar la señal a la normativa correspondiente.

Al pie de la gráfica de $WTHD$ y DF , en el lado izquierdo (en color negro) hay dos números que son el valor mínimo de $WTHD$ y el valor de t_r para el que se obtiene, y en el lado derecho (en rojo) está el valor mínimo de DF y el valor de t_r para el que se obtiene. Es decir, haciendo referencia a la figura 6.1, estas lecturas indican que para una frecuencia de señal modulada de 10 Hz y $N = 6$, el valor mínimo para $WTHD$ es 1,23 % cuando $t_r = t_f = 18,0$ ms, y que el valor mínimo para DF es 0,07 % cuando $t_r = t_f = 20,0$ ms.

Al pie de la gráfica de la amplitud pu hay un número que es el valor de la amplitud cuando $WTHD$ tiene el valor mínimo. En la figura 6.1, el valor de la amplitud pu es 0,94 pu, para el valor mínimo de $WTHD$ ($t_r = t_f = 18,0$ ms).

Al pie de la gráfica THD hay dos números cuyos significados son similares a lo descrito para la gráfica $WTHD$ y DF , pero aplicado a THD , es decir, el valor mínimo de THD y el valor de t_r en el que sucede.

Estas figuras son casos de estudio específicos a distintas frecuencias de la señal para poder realizar comparativas entre ellas. Otros valores de frecuencia presentan un comportamiento similar. En el Anexo A2 hay otras medidas con otros valores de estos parámetros que sirven para complementar este capítulo.

1. Las figuras 6.1 a 6.7 muestran los valores de los indicadores de calidad para una señal alterna TPWM-DM de 10 Hz, 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz, 100 Hz, 150 Hz y 200 Hz, respectivamente. En todas ellas se tiene; $V_o/V_i = 1$, $N = 6$ y $t_r = t_f$ entre 0 y $T/2$. Como puede verse en ellas, la variación de la amplitud de la frecuencia fundamental (V_1 pu) es independiente del valor de la frecuencia en sí misma. En todos los casos es posible controlar la amplitud de la frecuencia fundamental de la señal modulada entre el 100 % y el 60 %. Así mismo, la linealidad de la modulación proporciona una relación, también lineal, entre los valores de tiempos de subida y bajada donde se obtienen los valores mínimos para $WTHD$, DF y THD en las distintas figuras. La tabla 6.1 resume los valores de estos indicadores para varias frecuencias.

N	f (Hz)	WTHD (%)	t_r (ms)	V_1 (pu)	DF (%)	t_r (ms)	V_1 (pu)	THD (%)	t_r (ms)	V_1 (pu)
6	10	1,23	18,00	0,94	0,07	20,00	0,93	14,05	10,00	0,98
	25	1,23	7,20	0,94	0,07	8,00	0,93	14,03	4,00	0,98
	50	1,23	3,60	0,94	0,07	4,00	0,93	14,02	2,00	0,98
	75	1,23	2,40	0,94	0,07	2,66	0,93	14,09	1,32	0,98
	100	1,23	1,80	0,94	0,07	2,00	0,93	13,99	1,00	0,98
	150	1,23	1,20	0,94	0,07	1,33	0,93	14,08	0,66	0,98
	200	1,24	0,90	0,95	0,07	1,00	0,93	14,10	0,50	0,98
N	f (Hz)	WTHD (%)	t_r (ms)	V_1 (pu)	DF (%)	t_r (ms)	V_1 (pu)	THD (%)	t_r (ms)	V_1 (pu)
9	10	0,82	17,50	0,95	0,06	20,00	0,93	5,86	15,50	0,96
	25	0,82	7,00	0,95	0,06	8,00	0,93	5,87	6,20	0,96
	50	0,82	3,50	0,95	0,06	4,00	0,93	5,87	3,10	0,96
	75	0,82	2,33	0,95	0,07	2,66	0,93	5,94	2,06	0,96
	100	0,82	1,75	0,95	0,07	2,00	0,93	5,87	1,55	0,96
	150	0,81	1,17	0,95	0,07	1,33	0,93	5,83	1,03	0,96
	200	0,82	0,88	0,95	0,07	1,03	0,93	5,89	0,78	0,96

Tabla 6.1. Resumen de los valores obtenidos en la simulación para $N = 6$ y $N = 9$.

De esta tabla se deduce lo siguiente:

- Los valores de los indicadores *WTHD*, *THD*, *DF* y V_1 no son dependiente de la frecuencia de la señal, sólo dependen de los parámetros de la modulación, t_r y N .
- La relación existente entre los valores de los indicadores de calidad a distinta frecuencia es la misma relación existente entre los valores de los tiempos de subida y bajada de la señal. Esto significa que es posible generar una única gráfica en la que el eje x esté en función del periodo de la señal en lugar de valores de tiempo.

En las figuras 6.1 a 6.14, se puede ver que la frecuencia del armónico fundamental se encuentra dentro de un rango de variación muy estrecho. Esta variación de frecuencia es debida al redondeo de los valores de tiempo de los pulsos y es más acusado conforme se incrementa la frecuencia.

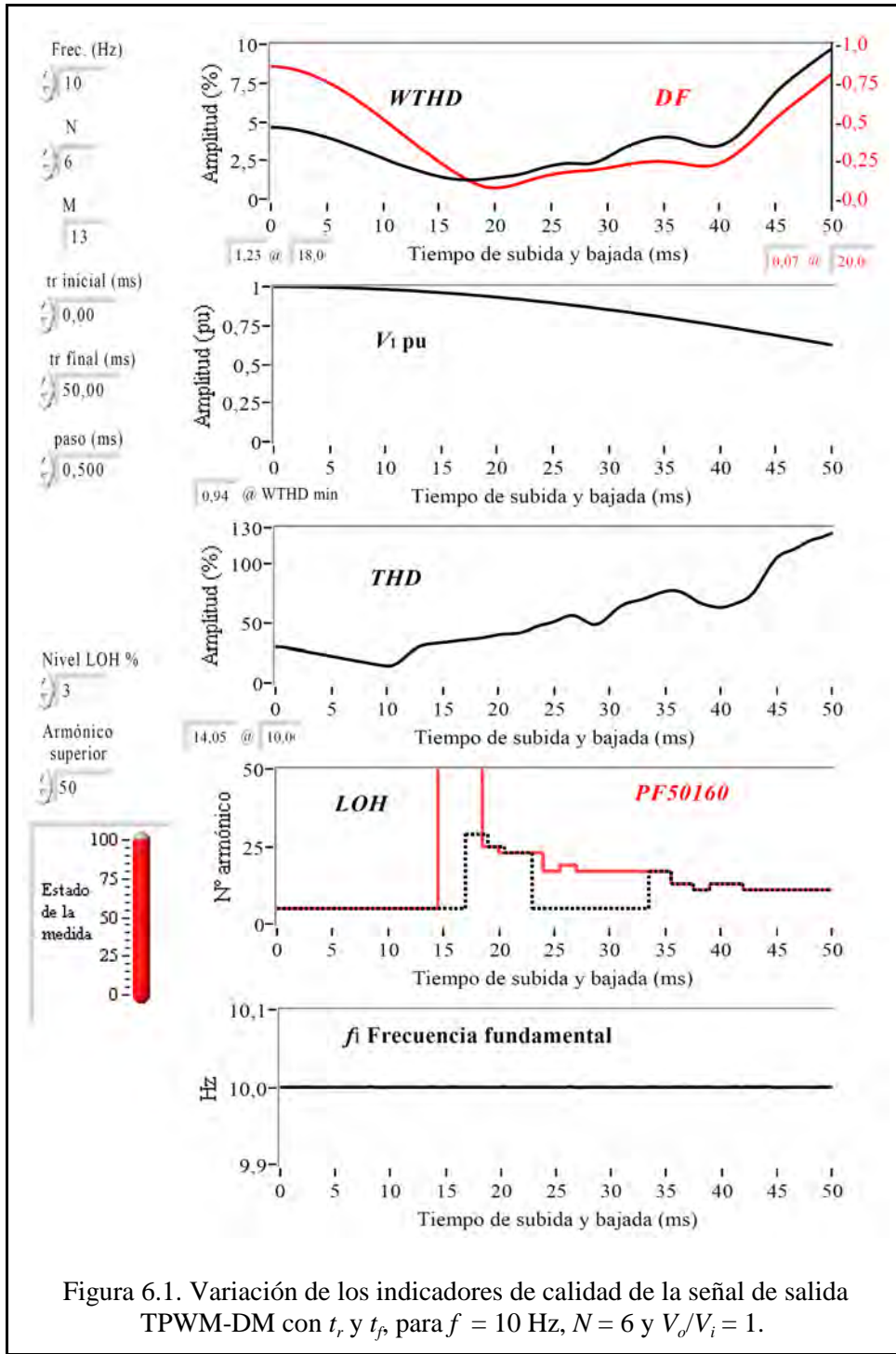


Figura 6.1. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_p , para $f = 10$ Hz, $N = 6$ y $V_d/V_i = 1$.

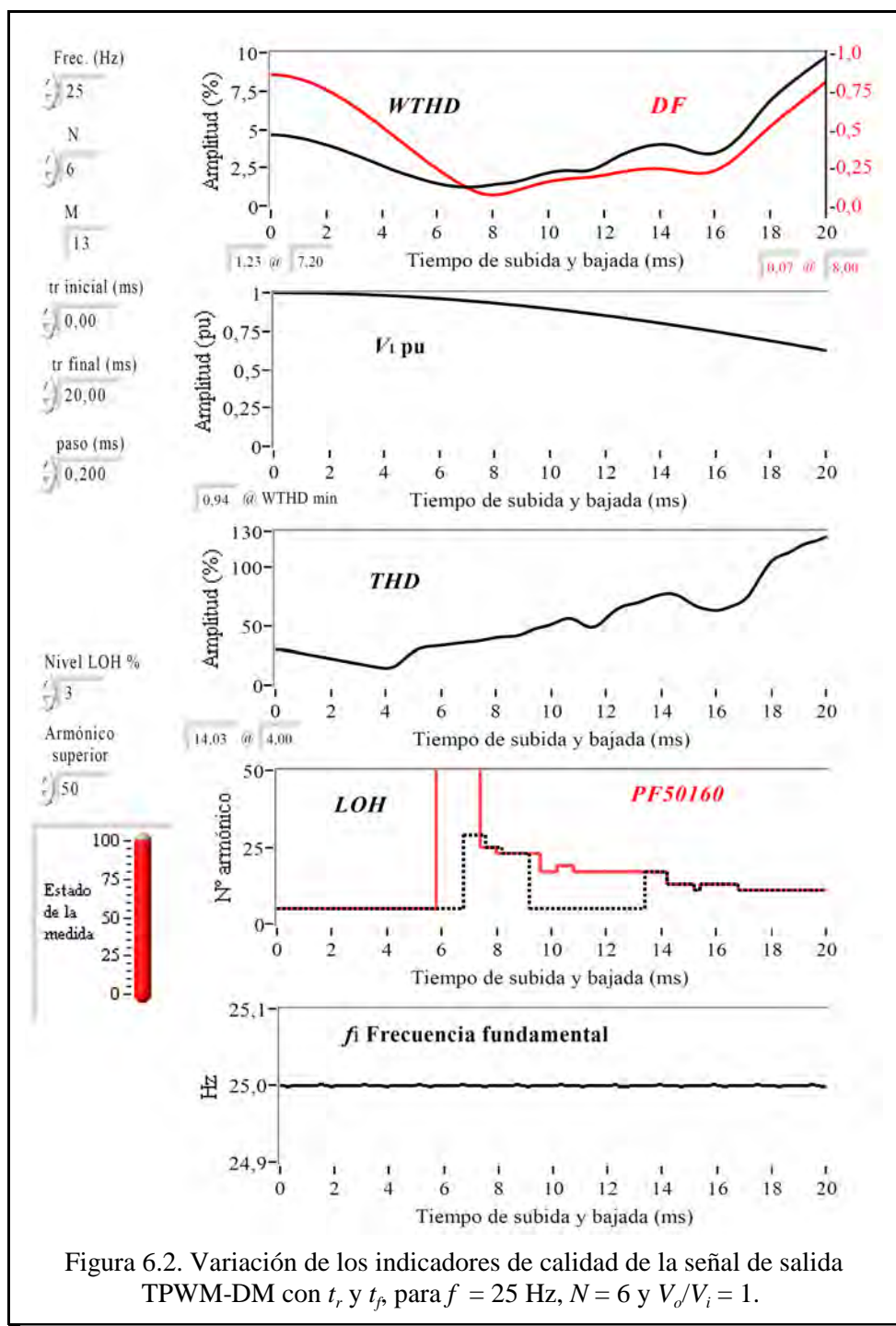


Figura 6.2. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 25$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$.

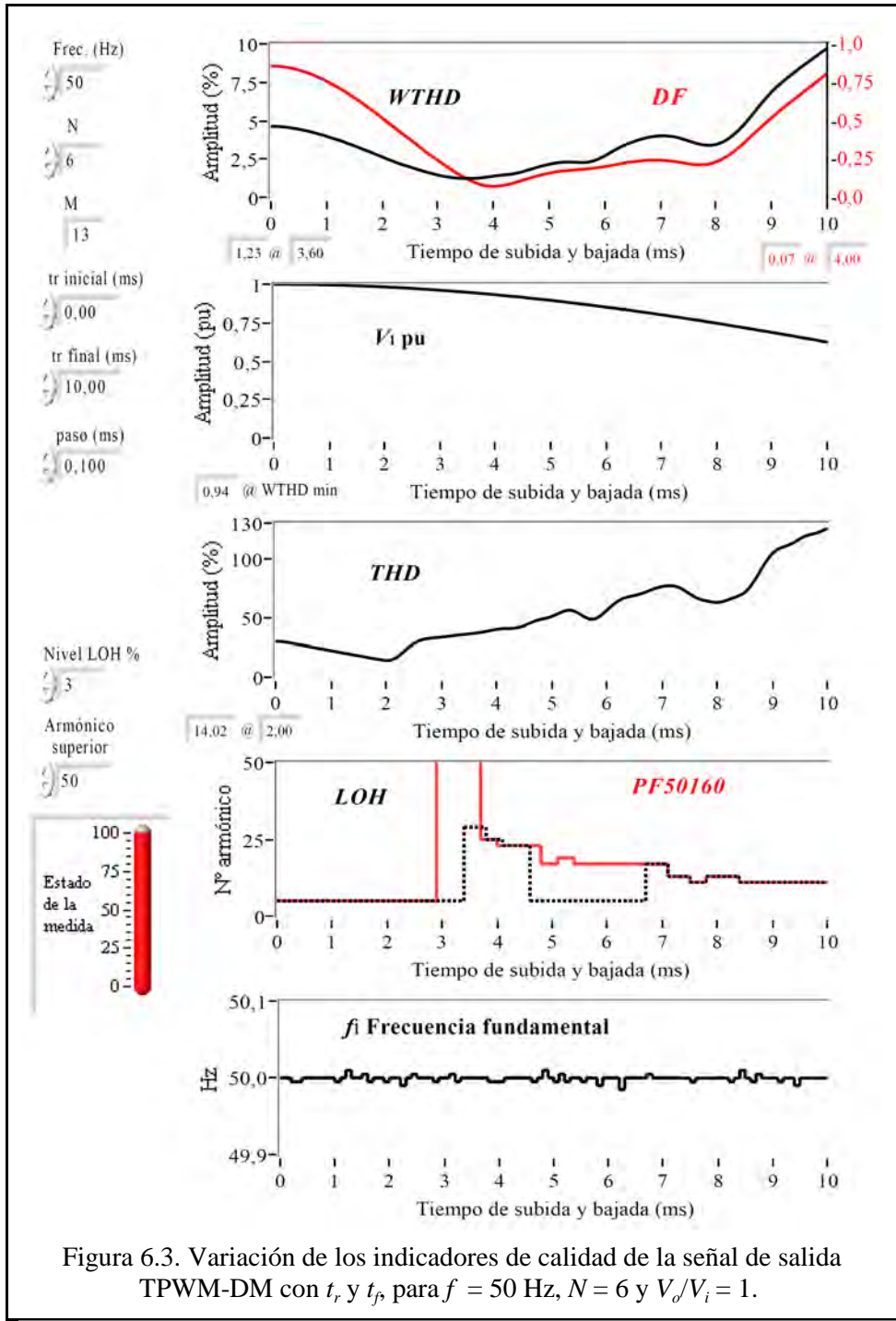


Figura 6.3. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$.

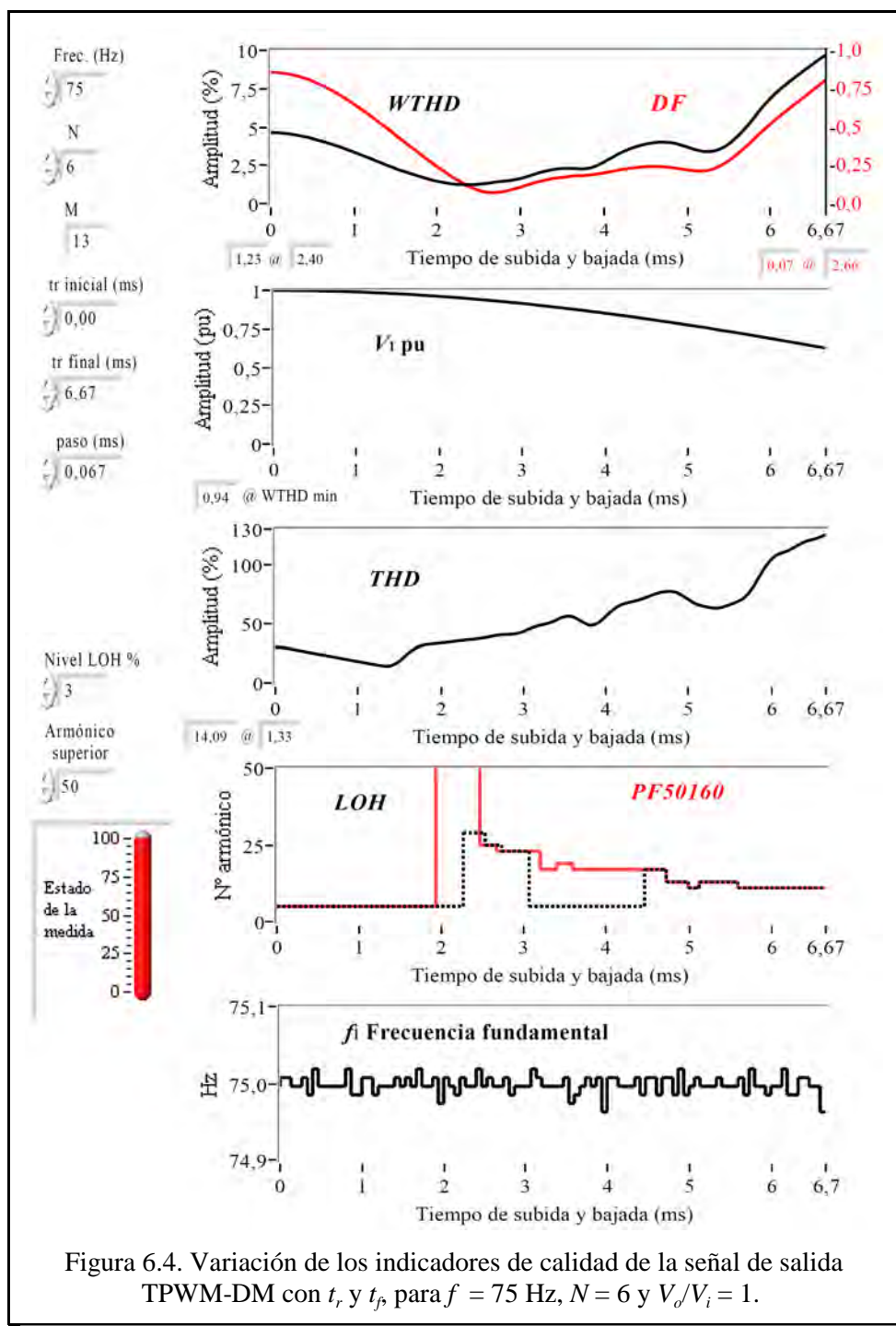
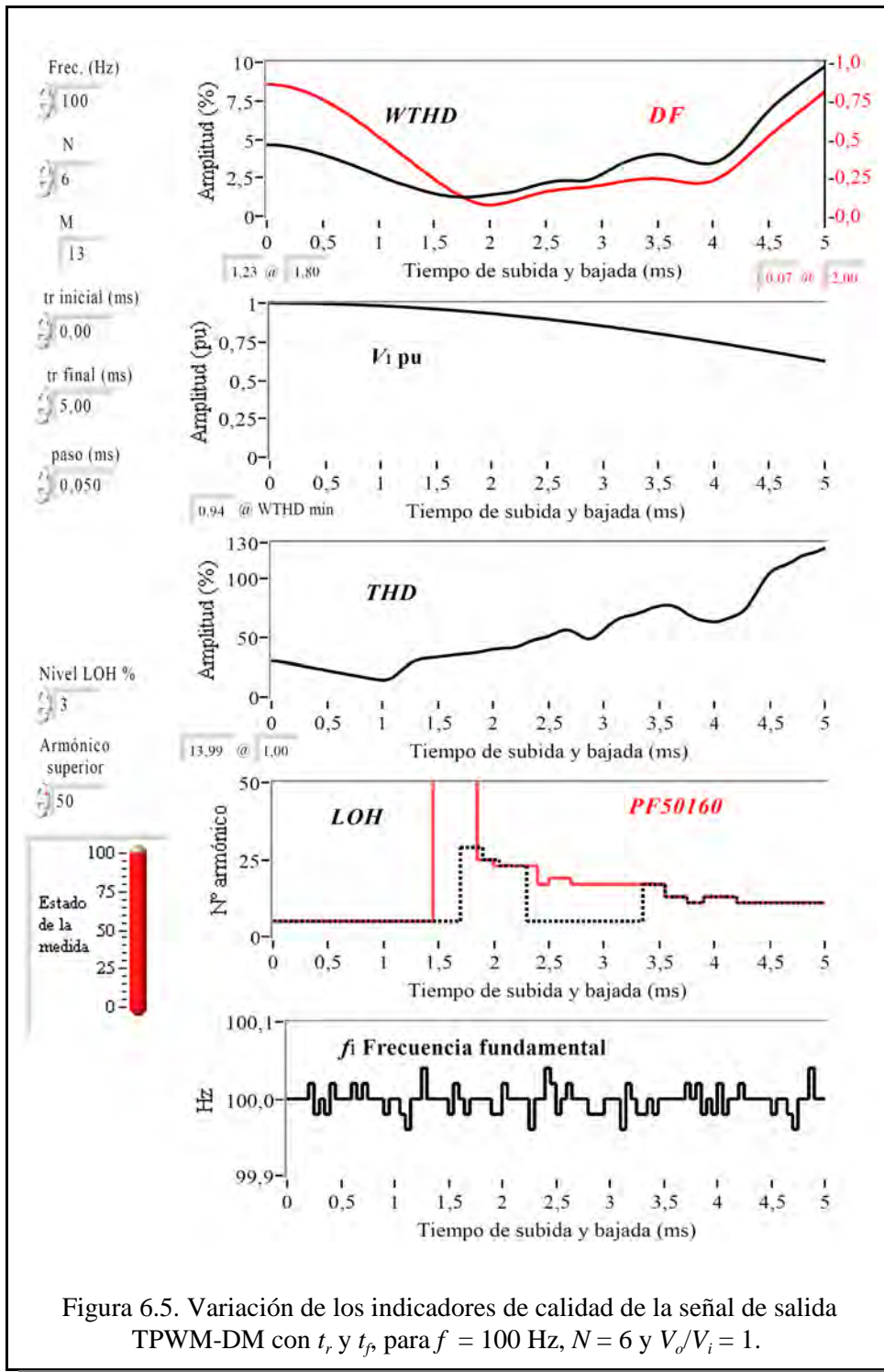


Figura 6.4. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 75$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$.



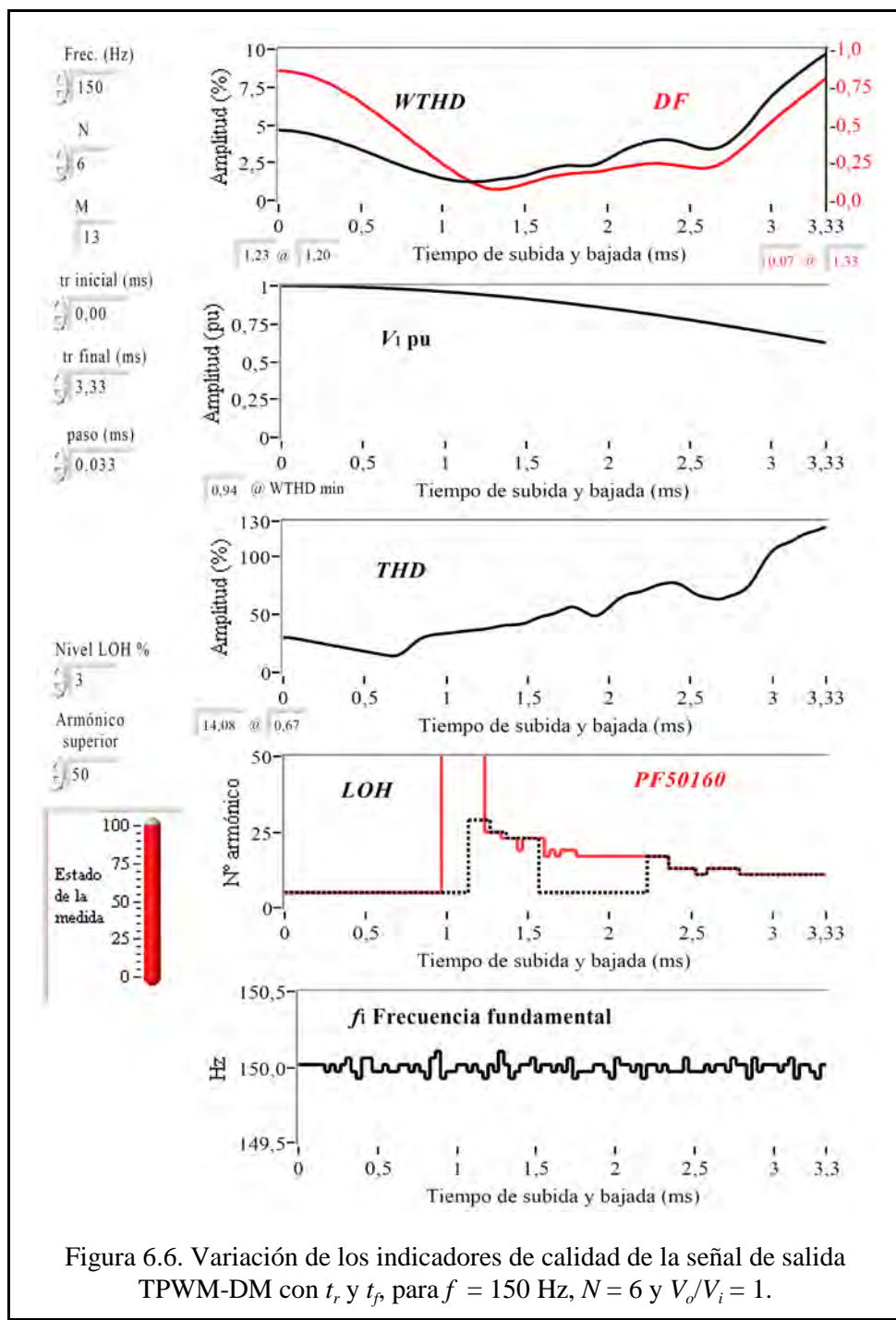


Figura 6.6. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 150$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$.

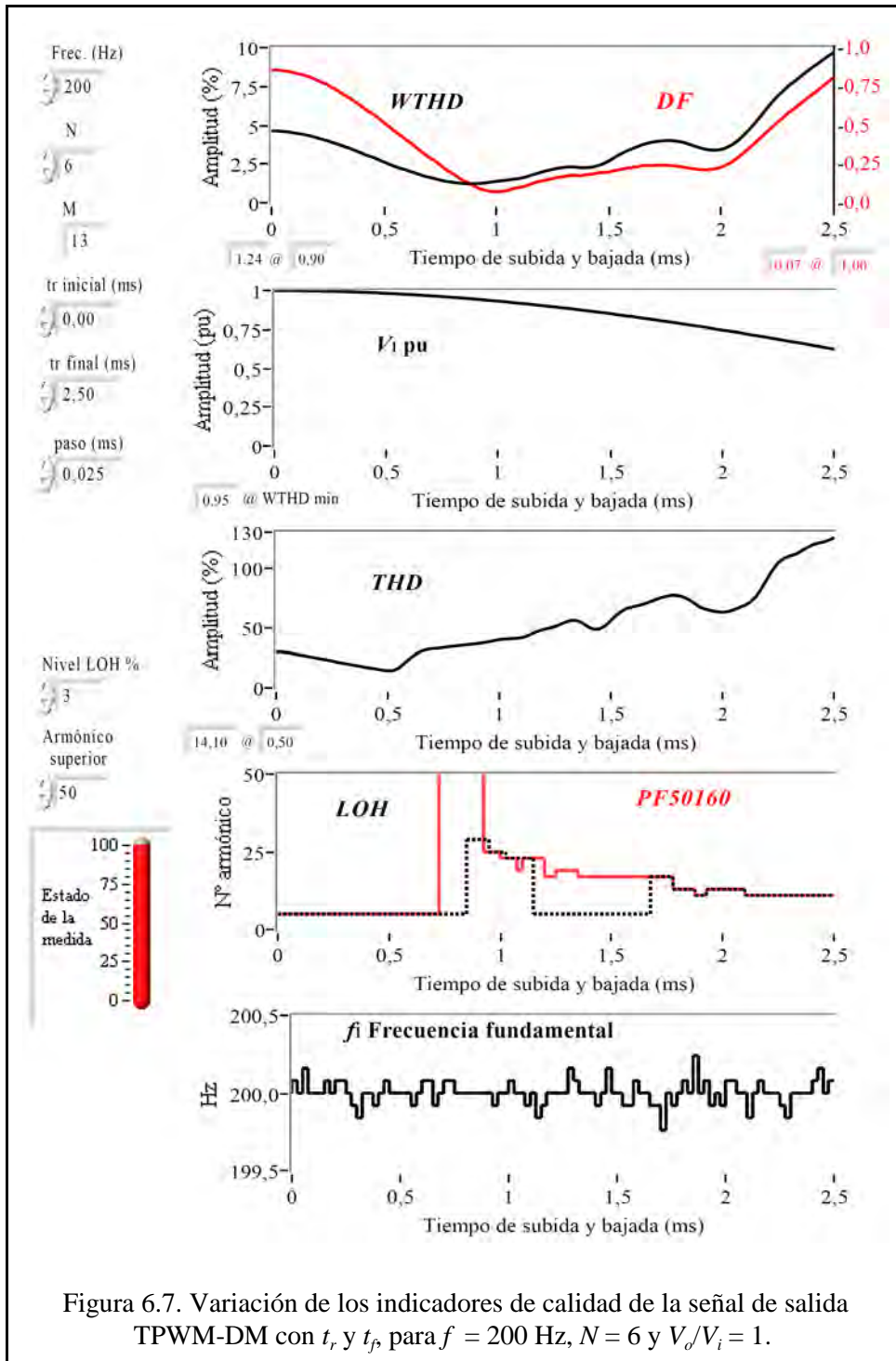


Figura 6.7. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 200$ Hz, $N = 6$ y $V_o/V_i = 1$.

Las figuras 6.8 a 6.14 muestran los resultados de medidas similares a las anteriores pero con $N = 9$ (impar, ya que en las anteriores es par). En estas figuras se puede comprobar que, como era de esperar, el incremento del valor de N , número de pulsos en la modulación durante t_r y t_f , mejora las características de la señal. Se mejoran todos los parámetros de calidad medidos. Concretamente, el indicador *WTHD* pasa del valor mínimo 1,23 %, cuando $N = 6$, al valor mínimo 0,82 %, cuando $N = 9$, lo que significa una mejora del 33,33 %. El indicador *DF* pasa del valor mínimo 0,07 % a 0,06 %, lo que significa una mejora del 14,28 %. El indicador *THD* pasa del valor mínimo 14,05 % a 5,86 %, lo que significa una mejora del 58,22 %. El perfil de la curva del indicador *LOH* también mejora, tomando valores superiores durante mayor rango de valores de t_r . Así mismo, el perfil del indicador *PF50160* también mejora ya que con $N = 9$ el rango de valores de t_r para los cuales cumple el perfil de frecuencias es más amplio. Por ejemplo, para $f = 50$ Hz el valor *PF50160* > 25 se encuentra entre $t_r = 3,10$ ms y $t_r = 3,70$ ms, para $N = 6$, mientras que para $N = 9$ pasa a estar entre $t_r = 3,10$ ms y $t_r = 5,40$ ms. También es cierto esto para las demás frecuencias.

En el Anexo A2 se recogen más medidas resultantes de la simulación para una señal de 50 y 60 Hz de frecuencia y distintos valores de N .

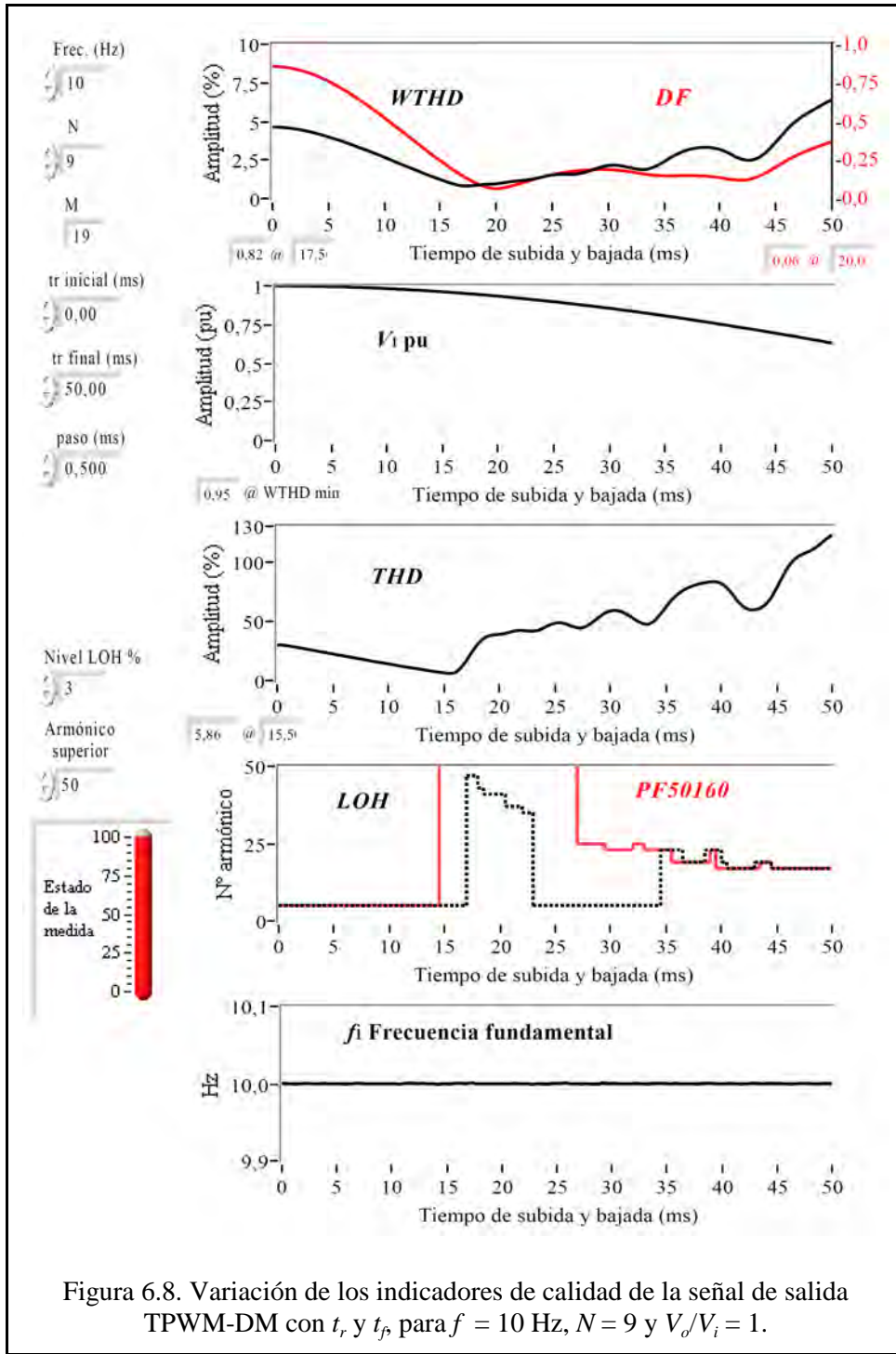


Figura 6.8. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 10$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$.

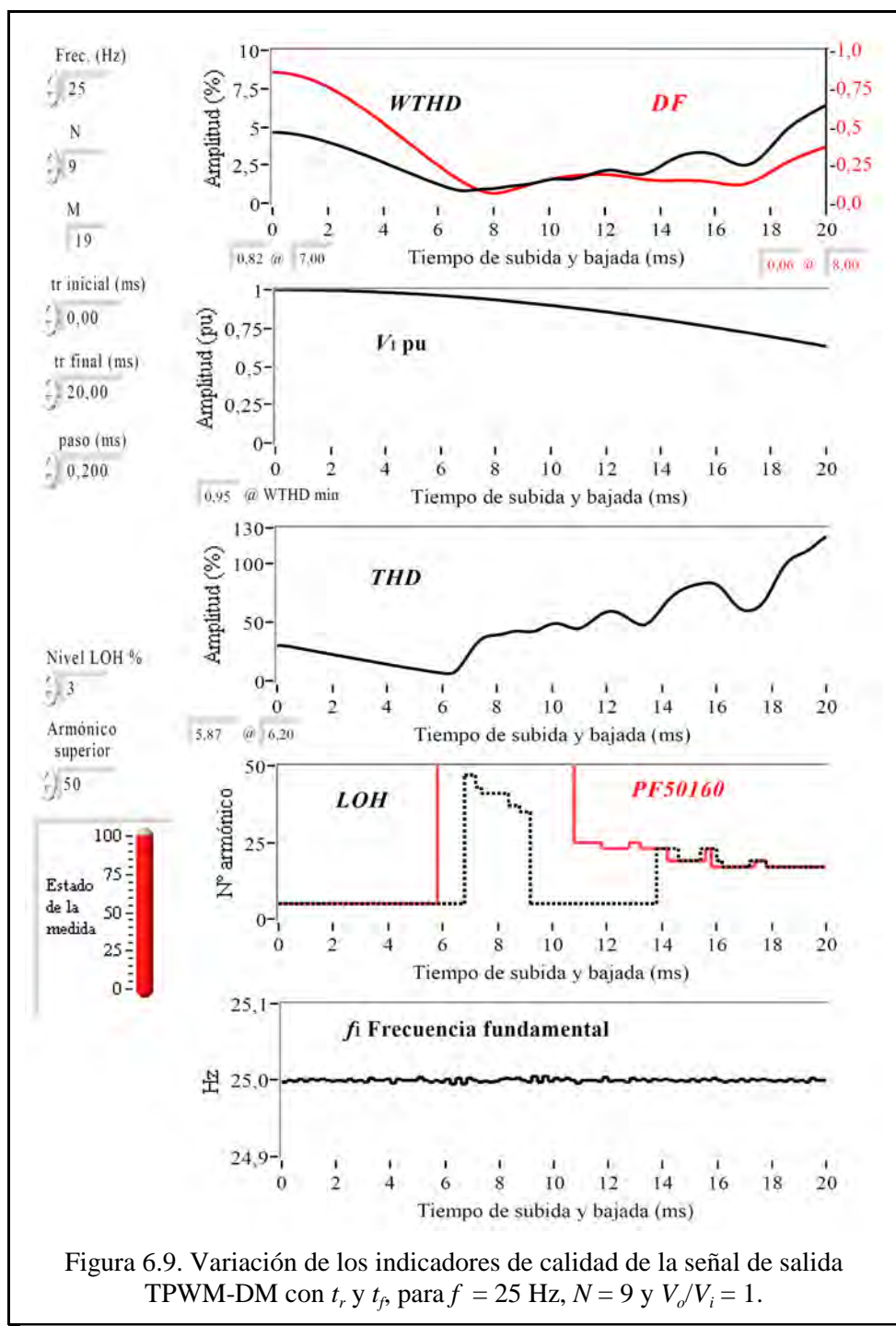


Figura 6.9. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_p , para $f = 25$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$.

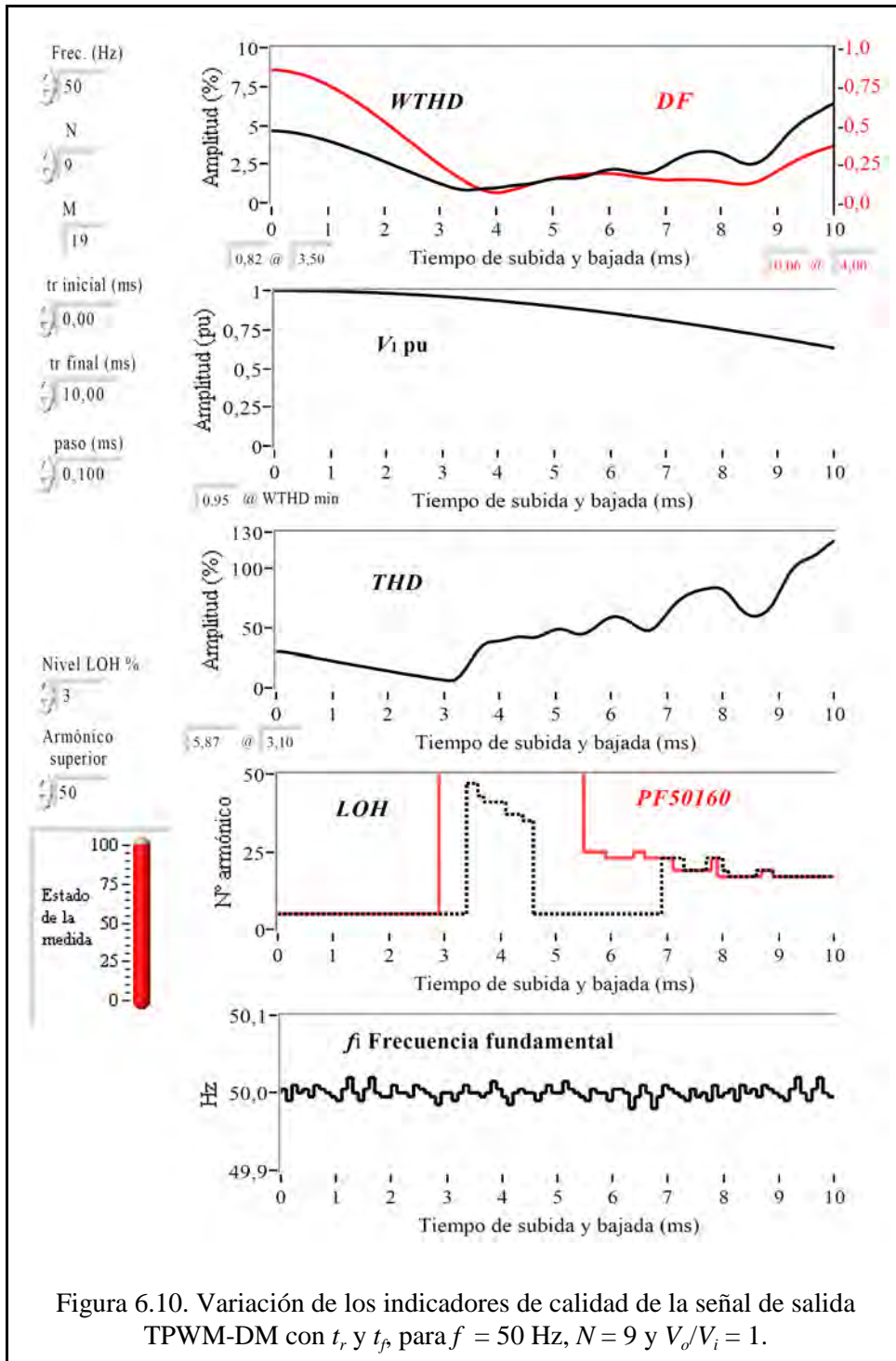


Figura 6.10. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$.

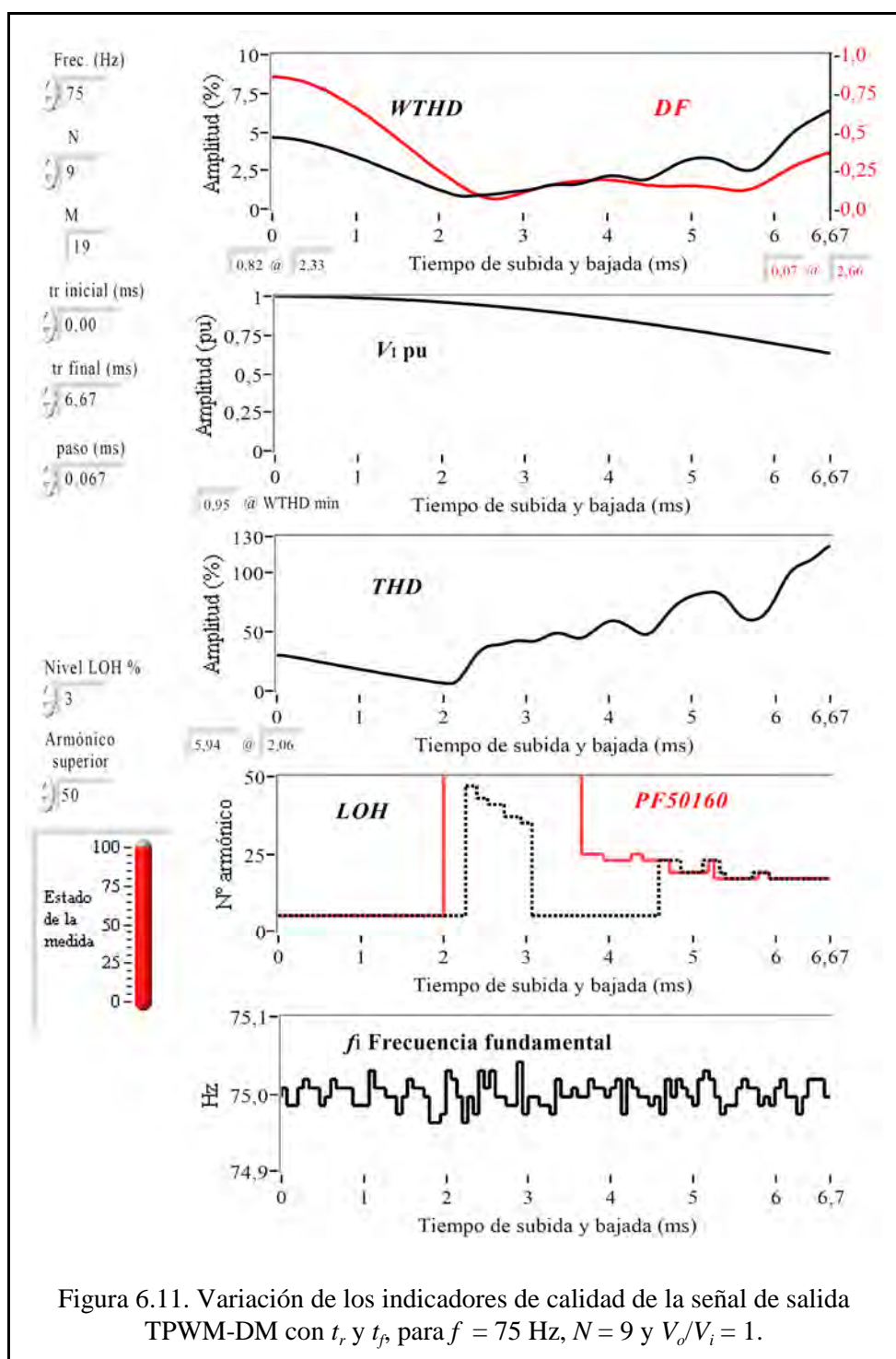


Figura 6.11. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 75$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$.

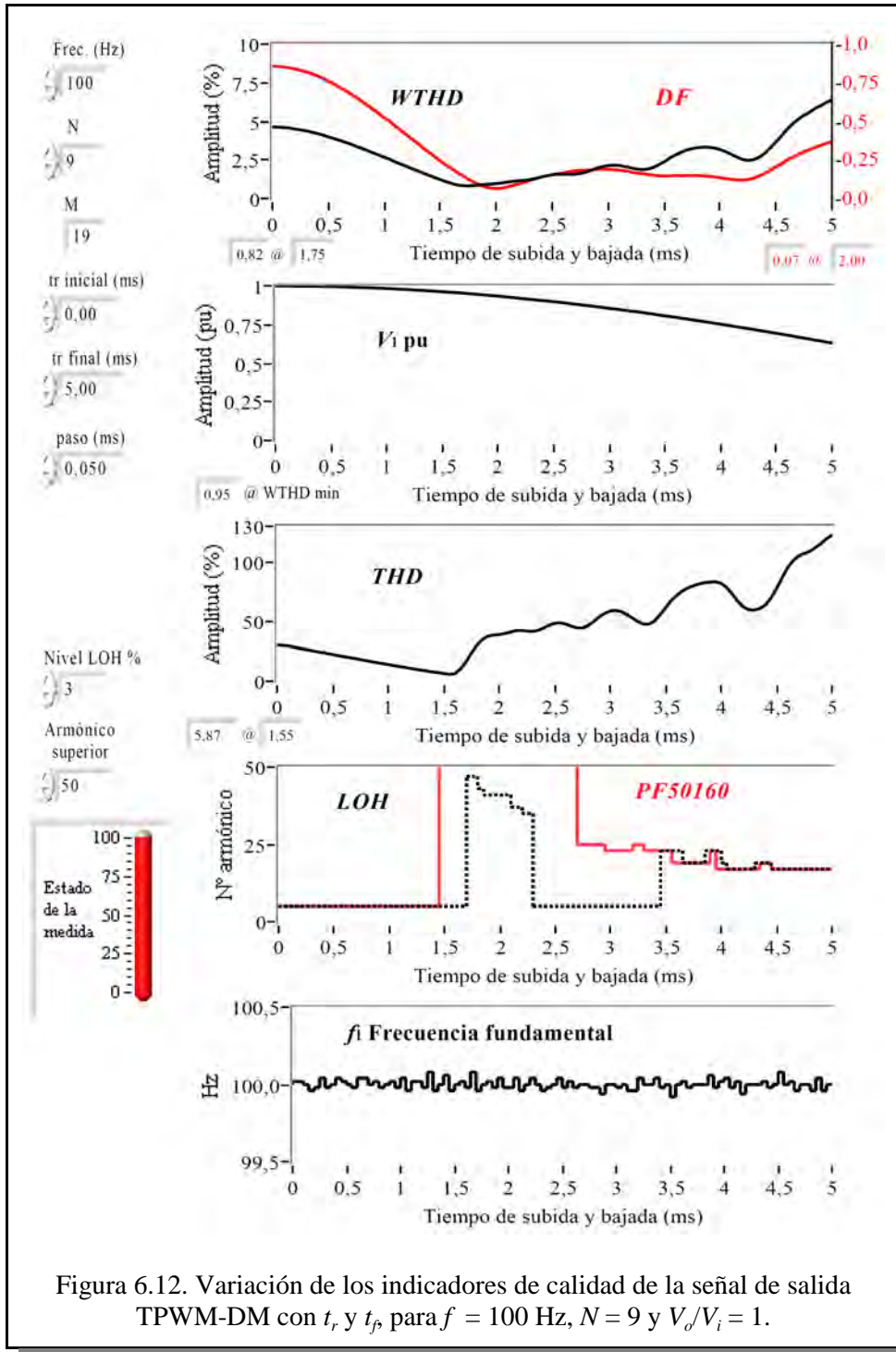


Figura 6.12. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 100$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$.

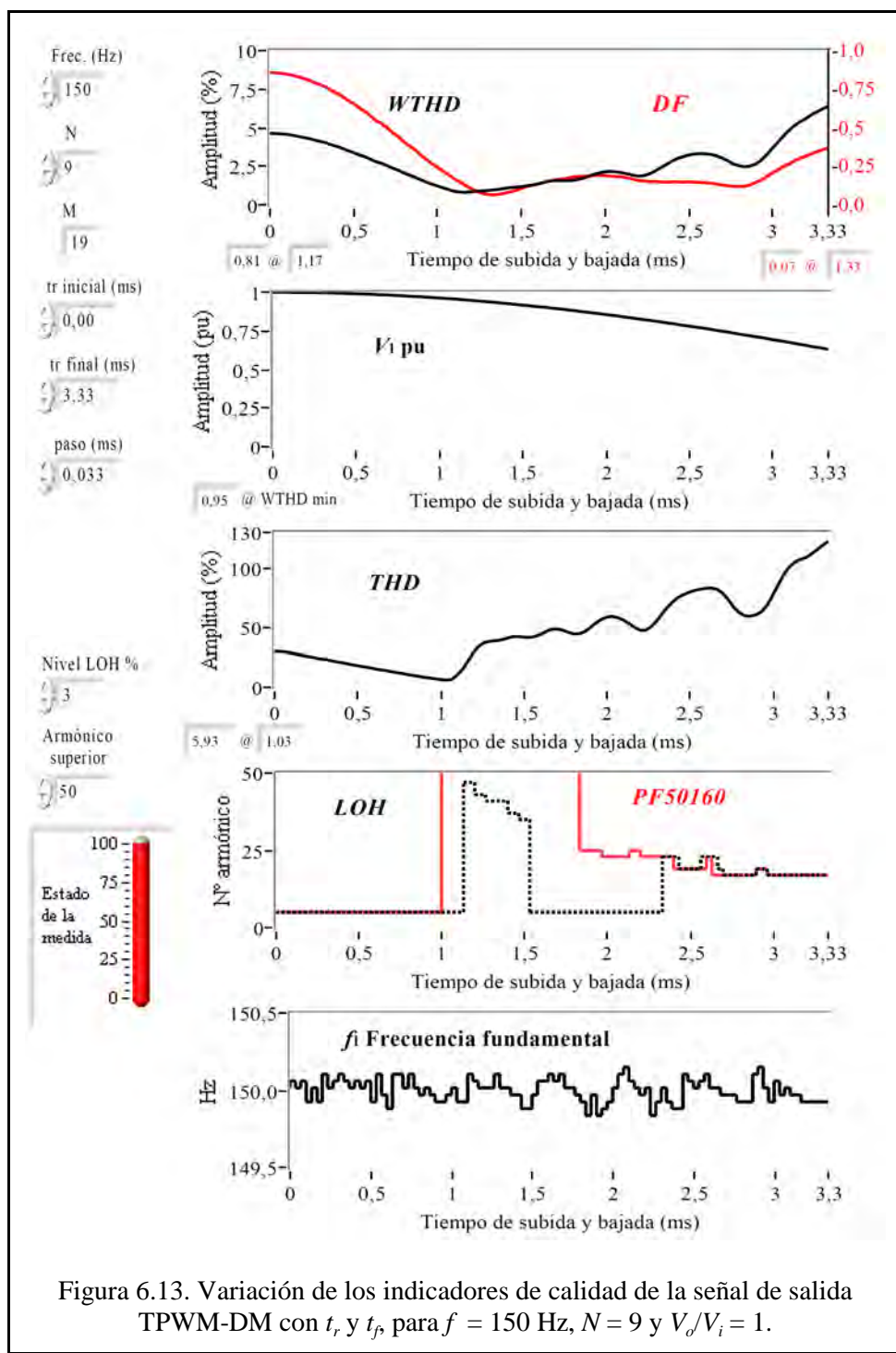


Figura 6.13. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 150$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$.

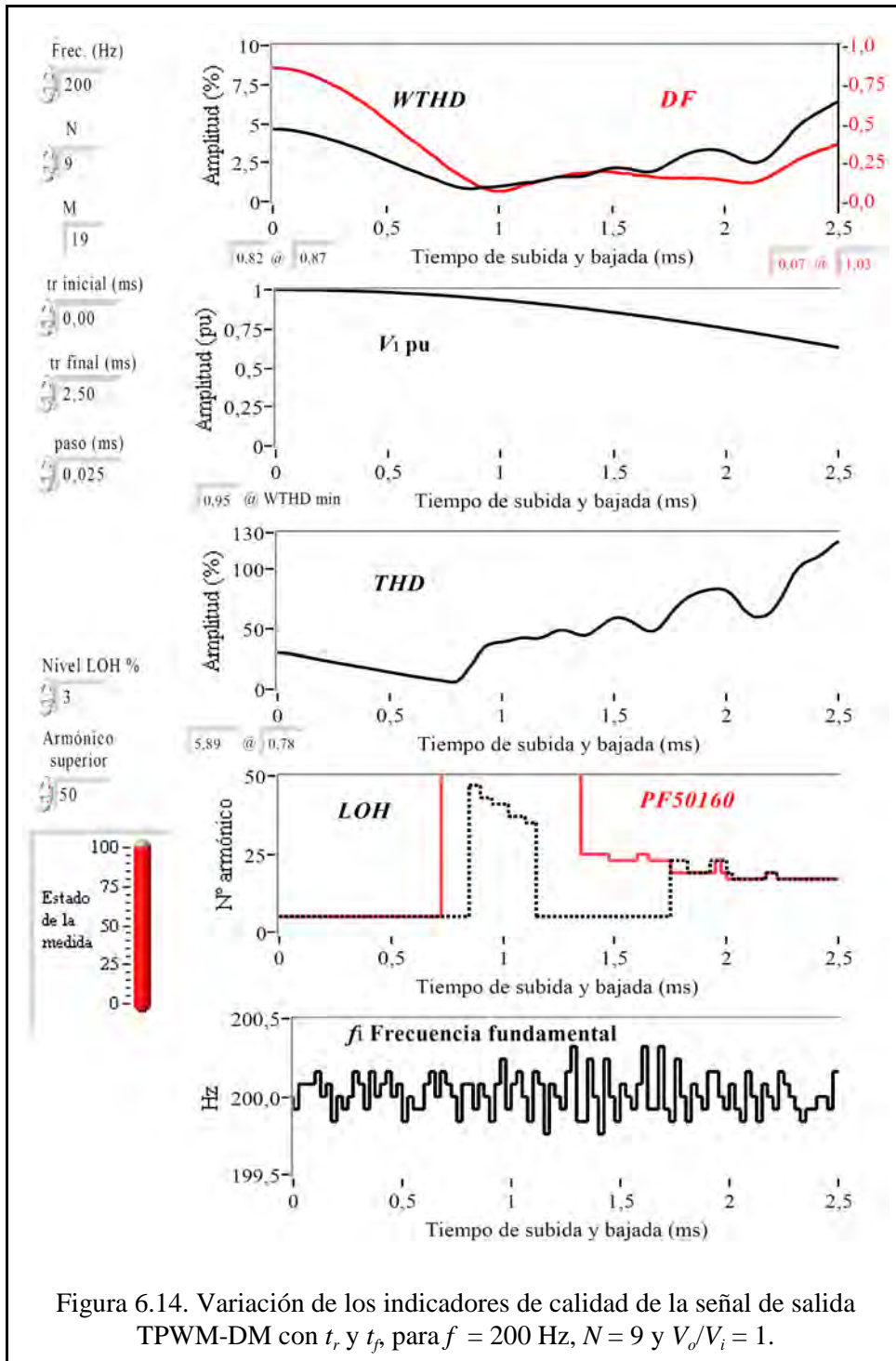


Figura 6.14. Variación de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 200$ Hz, $N = 9$ y $V_o/V_i = 1$.

6.2 Resultados de la implementación

Para el análisis de los resultados, la verificación y las mediciones de las características y los indicadores de calidad de la señal modulada TPWM-DM obtenida con la implementación, se ha utilizado la siguiente instrumentación:

- Analizador lógico Intronix LA1034 (velocidad de muestras: 500 MHz).
- Osciloscopio Tektronix TDS2004B (ancho de banda: 60 MHz).
- Analizador de espectro HP3588A (ancho de banda: 10 Hz – 150 MHz).

6.2.1 Formas de onda obtenidas

Las formas de onda obtenidas para la señal modulada TPWM-DM utilizando esta implementación es lo que se muestra en las figuras 6.15 a 6.18. Todas estas figuras corresponden a una señal de 50 Hz de frecuencia con modulación TPWM-DM y $N = 5$. En cada una de ellas hay dos conjunto de imágenes (a y b) obtenidas por medio del osciloscopio para distintos valores de t_r . En cada una de las imágenes hay una traza de color amarillo que es la señal de sincronización citada en 5.1.2 y que sirve para estabilizar la imagen en el osciloscopio. La traza de color azul es la señal modulada TPWM-DM. Cada conjunto está formado por tres imágenes, la de más arriba muestra la forma de onda de un periodo completo y las otras dos son detalles de la señal modulada durante los tiempos de subida y bajada respectivamente.

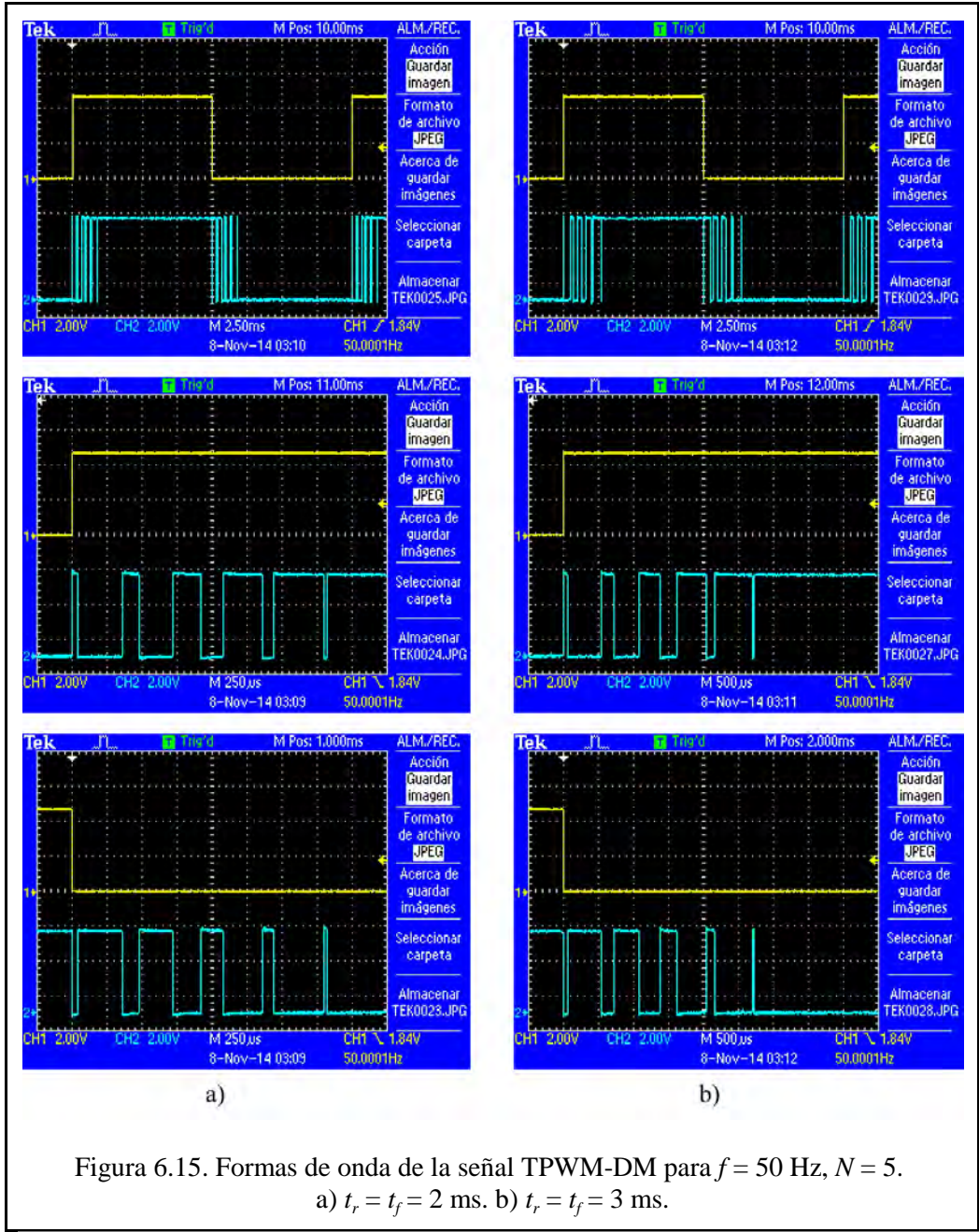


Figura 6.15. Formas de onda de la señal TPWM-DM para $f = 50$ Hz, $N = 5$.
 a) $t_r = t_f = 2$ ms. b) $t_r = t_f = 3$ ms.

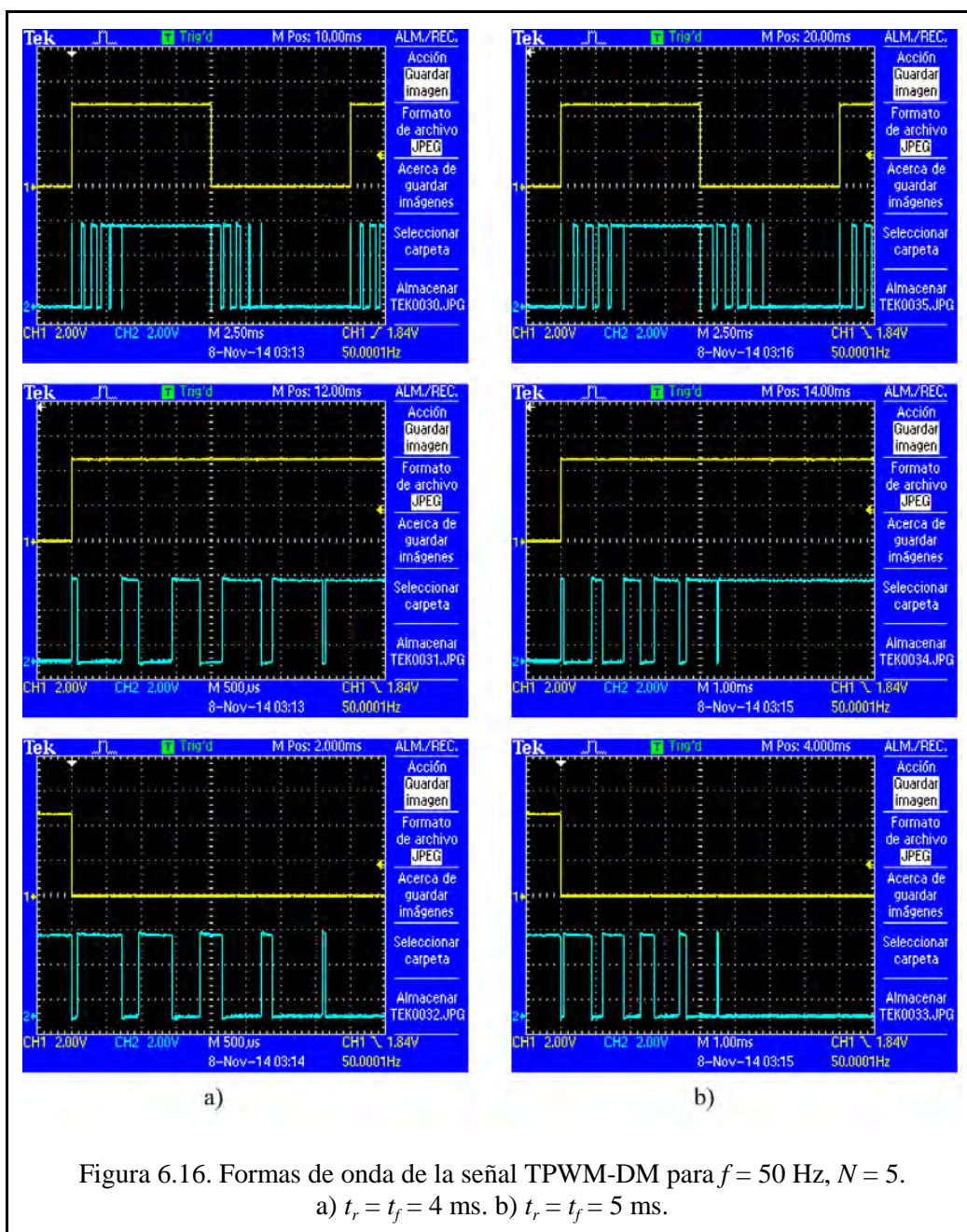
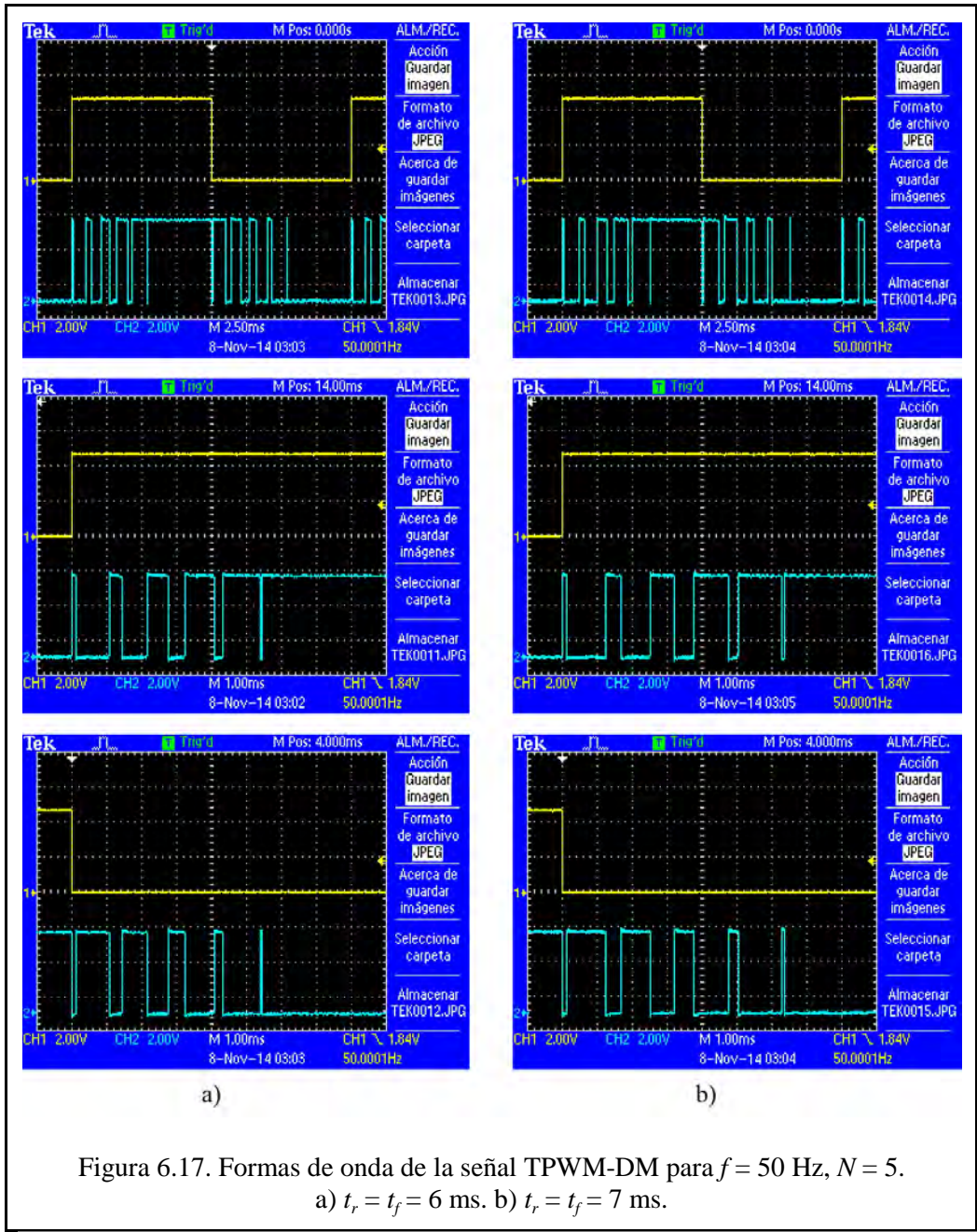
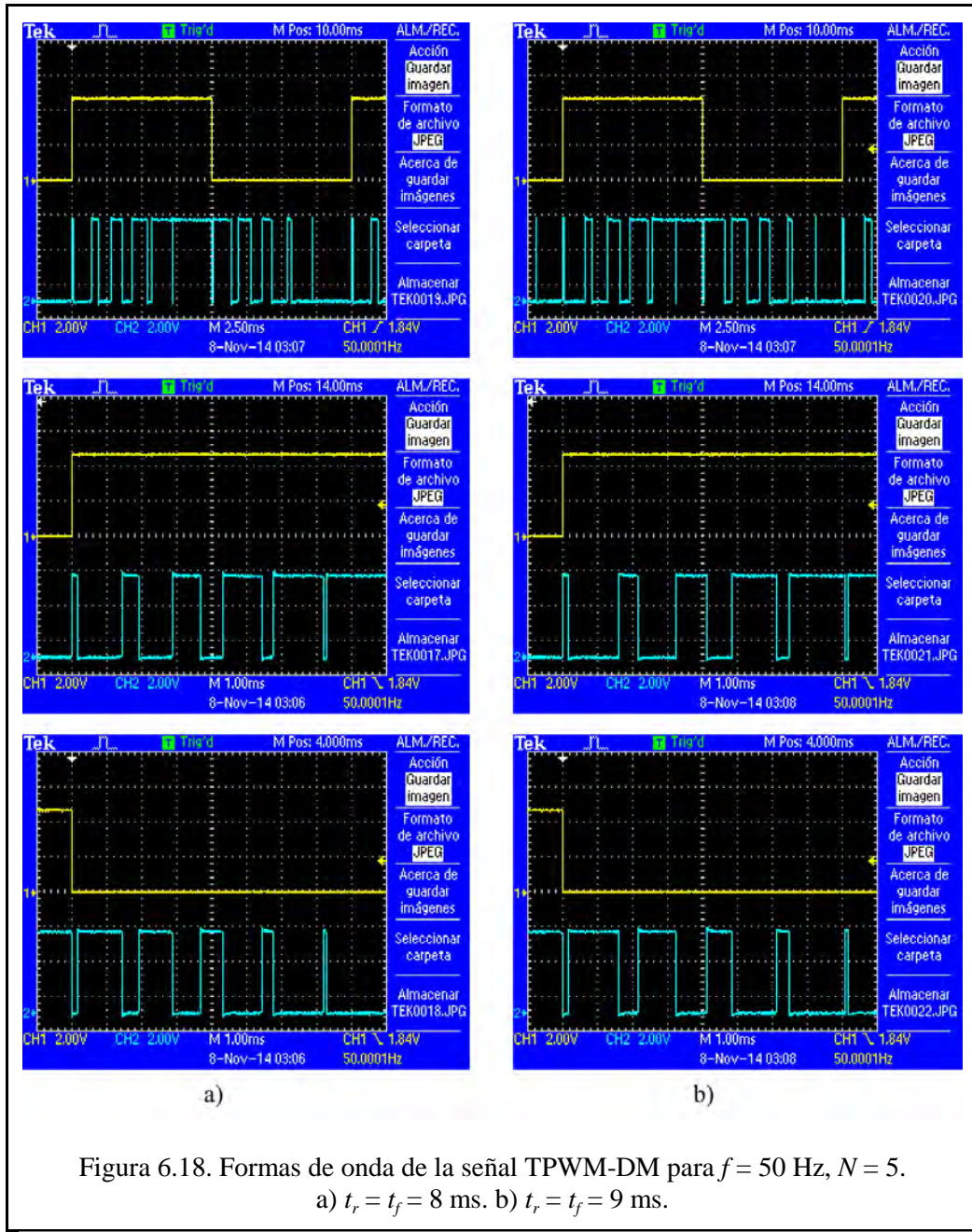


Figura 6.16. Formas de onda de la señal TPWM-DM para $f = 50$ Hz, $N = 5$.

a) $t_r = t_f = 4$ ms. b) $t_r = t_f = 5$ ms.





6.2.2 Medidas de tiempos

La verificación de los tiempos de modulación se realiza por medio del analizador lógico, comprobando que cada uno de los intervalos de tiempo de la modulación son los calculados. Esta medida se contrasta con las realizadas con el osciloscopio. En ambos casos, los resultados fueron coincidentes, siendo dada por correcta la implementación. La tabla 6.2 resume los valores medidos de los tiempos de modulación para una señal de 50 Hz con tiempos de subida de 2 ms a 9 ms. En esta tabla se han representado solamente los dos primeros decimales.

	2 ms	3 ms	4 ms	5 ms	6 ms	7 ms	8 ms	9 ms
1	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	180,00
2	320,00	480,00	640,00	800,00	960,00	1120,00	1280,00	1440,00
3	120,00	180,00	240,00	300,07	360,00	420,00	480,00	540,00
4	240,00	360,00	480,00	600,00	720,00	840,00	960,00	1080,00
5	200,00	300,00	400,00	500,00	600,00	700,00	800,07	900,00
6	160,00	240,00	320,00	400,00	480,00	560,00	640,00	720,00
7	280,00	420,00	560,00	700,00	840,00	980,00	1120,00	1260,00
8	80,00	120,00	160,00	200,00	240,00	280,00	320,00	360,00
9	360,00	540,00	720,00	900,00	1080,08	1260,00	1440,00	1620,00
10	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00
11	8180,00	7270,10	6360,00	5450,06	4540,00	3630,00	2720,00	1810,00
12	40,00	60,00	80,00	100,00	120,00	140,00	160,00	180,00
13	320,00	480,00	640,00	800,00	960,00	1120,00	1280,10	1440,00
14	120,00	180,00	240,00	300,00	360,00	420,00	480,00	540,00
15	240,00	360,00	480,00	600,00	720,00	840,06	960,00	1080,00
16	200,00	300,00	400,00	500,00	600,00	700,00	800,00	900,00
17	160,00	240,00	320,00	400,00	480,00	560,00	640,00	720,06
18	280,00	420,07	560,00	700,04	840,00	980,00	1120,00	1260,00
19	80,00	120,00	160,00	200,00	240,02	280,00	320,00	360,00
20	360,00	540,00	720,00	900,00	1080,00	1260,00	1440,00	1620,00
21	20,00	30,00	40,00	50,00	60,00	70,00	80,00	90,00
22	8180,00	7270,08	6360,00	5450,00	4540,00	3630,00	2720,00	1810,00

Tabla 6.2. Valores de tiempos medidos en la señal modulada.

Contrastando los valores de la tabla 6.2 con los correspondientes calculados en el Capítulo 3 (tabla 3.12), se comprueba que el error en caso peor es 0,23% y sucede en la fila 3, columna 5 ms de la tabla 6.2.

6.2.3 Medidas de frecuencia y armónicos

La primera comprobación de indicador de calidad que se hace es la de la frecuencia fundamental de la señal modulada. La tabla 6.3 muestra las medidas obtenidas de la frecuencia de la señal de salida para una señal modulada TPWM-DM de 50 Hz. Como puede verse en ella, el error en frecuencia es muy pequeño, teniendo en cuenta que la norma EN 50160 admite hasta $\pm 0,5$ Hz ($\pm 1\%$).

$t_r = t_f$ (ms)	Periodo (μ s)	Frecuencia (Hz)	Error (%)
2	19.999,50	50,00125	0,0025
3	19.999,30	50,00175	0,0035
4	19.999,60	50,00100	0,0020
5	19.999,40	50,00150	0,0030
6	19.999,60	50,00100	0,0020
7	19.999,20	50,00200	0,0040
8	19.999,30	50,00175	0,0035
9	19.999,40	50,00150	0,0030

Tabla 6.3. Medidas de la frecuencia de la señal modulada.

Las medidas de las componentes armónicas para obtener de ellas los parámetros de calidad de la señal modulada, se han obtenido por medio del analizador de espectro (figura 6.19).

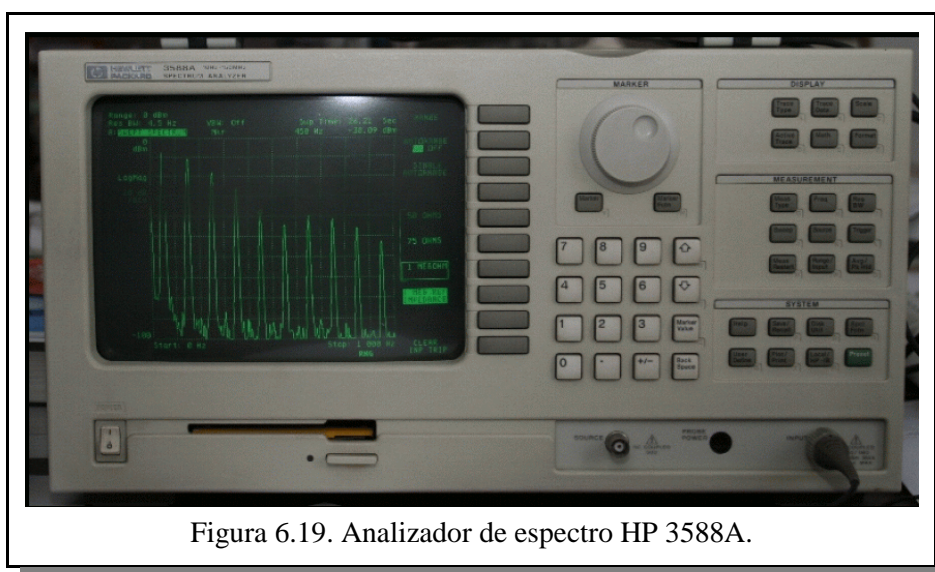


Figura 6.19. Analizador de espectro HP 3588A.

La tabla 6.4 contiene las medidas realizadas sobre una señal modulada TPWM-DM de 50 Hz con tiempos de subida y bajada de 2 ms a 9 ms y $N = 5$. Las medidas de amplitud de los armónicos en esta tabla son directamente las lecturas obtenidas del analizador, normalizadas en tanto por ciento, a la frecuencia fundamental (% V_1). De estas medidas se obtiene el valor de la distorsión armónica total, *THD*, y el de la distorsión armónica ponderada, *WTHD*, cuyos valores se muestran al pie de la tabla.

Armónico	$t_r = t_f$ (ms)							
	2	3	4	5	6	7	8	9
1	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
3	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01
5	12,91	6,20	0,68	3,06	3,36	2,05	0,88	0,39
7	5,20	0,63	2,35	1,31	0,40	0,22	0,47	3,07
9	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00
11	0,65	1,02	0,16	0,14	1,86	8,04	45,08	87,30
13	1,11	0,32	0,09	1,47	8,11	45,13	69,66	41,21
15	0,03	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,01
17	0,55	0,08	0,98	18,01	47,10	22,00	1,81	1,56
19	0,25	0,21	3,01	34,20	28,87	0,79	1,08	11,91
21	0,00	0,01	0,01	0,02	0,00	0,01	0,01	0,00
23	0,05	0,59	23,12	21,11	1,36	1,04	29,28	18,51
25	0,05	1,61	28,48	5,45	0,58	13,85	5,34	26,82
27	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,00	0,00	0,01
29	0,18	11,90	14,69	0,81	9,87	3,40	11,44	6,52
31	0,41	17,40	5,04	0,86	19,57	23,04	1,57	21,01
33	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,02	0,00	0,00
35	0,29	19,48	0,83	8,79	14,11	0,74	18,47	5,62
37	0,71	15,31	0,41	15,42	16,63	2,59	5,88	19,50
39	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,00	0,01	0,00
41	4,20	4,33	0,30	5,09	0,74	7,63	17,42	18,37
43	6,89	1,01	4,54	14,37	1,49	7,93	7,05	5,95
45	0,01	0,02	0,02	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01
47	11,48	0,59	11,57	3,93	10,90	14,26	8,86	0,72
49	12,74	0,35	6,52	0,47	2,11	6,46	6,84	14,81
THD (%)	23,57	33,49	42,44	50,47	64,94	60,82	93,61	109,65
WTHD (%)	2,72	2,23	1,69	2,46	3,43	3,94	6,92	8,75

Tabla 6.4. Medidas de armónicos en una señal modulada TPWM-DM de 50 Hz para $N = 5$ y $t_r = t_f$ de 2 a 9 ms.

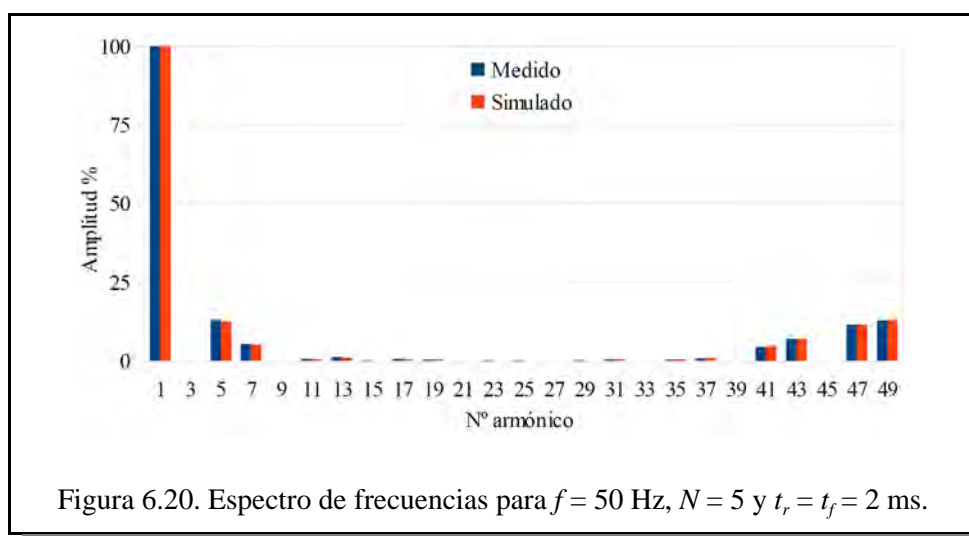
La tabla 6.5 se muestra una comparativa entre los valores de *THD* y *WTHD* medidos y los obtenidos por simulación. En las columnas “Dif.” se ha anotado la diferencia entre ambos valores. Como puede verse, las diferencias son pequeñas.

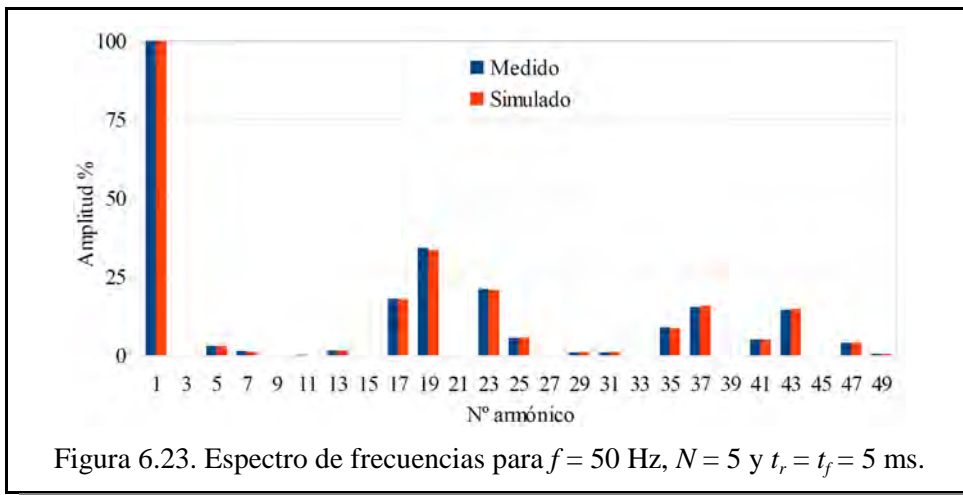
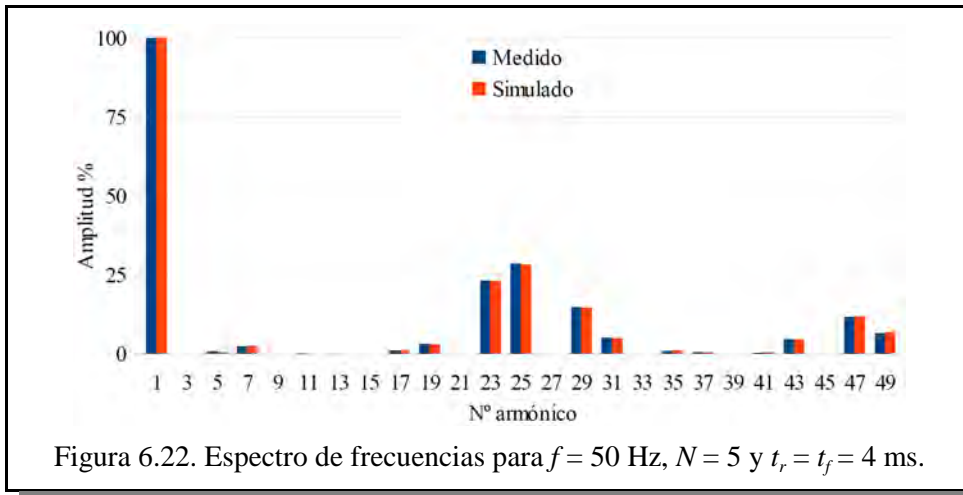
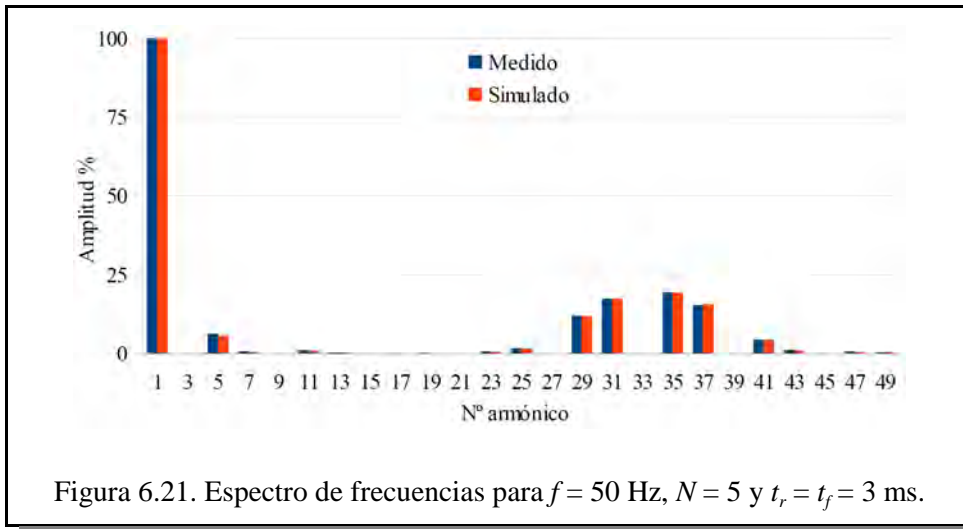
t_r	THD (%)			WTHD (%)		
	Medido	Simulado	Dif.	Medido	Simulado	Dif.
2	23,57	23,78	-0,21	2,72	2,65	0,07
3	33,49	33,45	0,04	2,23	1,54	0,69
4	42,44	42,06	0,38	1,69	1,66	0,03
5	50,47	49,80	0,67	2,46	2,41	0,05
6	64,94	64,31	0,63	3,43	3,38	0,05
7	60,82	60,12	0,70	3,94	3,86	0,08
8	93,61	93,04	0,57	6,92	6,84	0,08
9	109,65	109,46	0,19	8,75	8,64	0,11

Tabla 6.5. Comparativa de valores medidos y simulados de *THD* y *WTHD* para una señal TPWM-DM de 50 Hz para $N = 5$ y $t_r = t_f$ de 2 a 9 ms.

De estas comparaciones se deduce que la simulación representa con gran precisión la señal real.

Las figuras 6.20 a 6.27 muestran los valores de las medidas de la tabla 6.5 en forma gráfica, como espectro de frecuencias. En ellas se han representado tanto los valores medidos (en color azul) como los simulados (en color rojo), pudiéndose observar la correspondencia entre ellos.





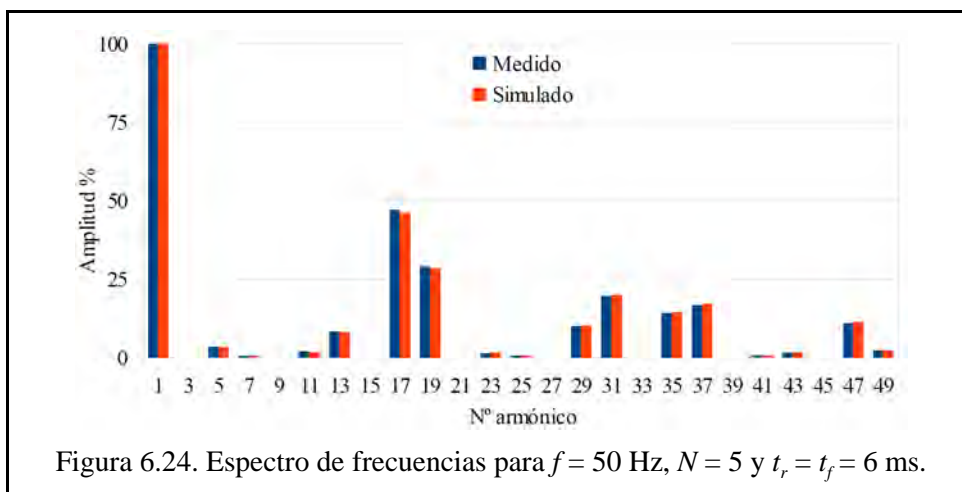


Figura 6.24. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 6$ ms.

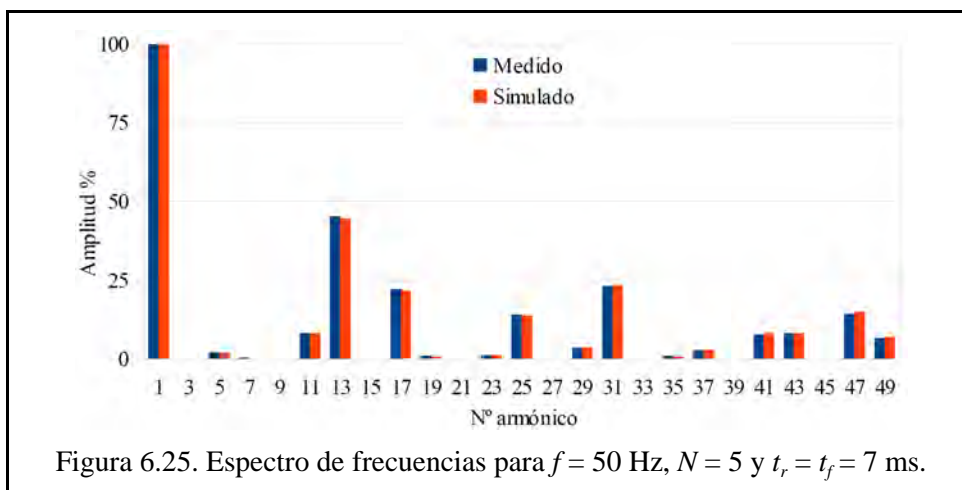


Figura 6.25. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 7$ ms.

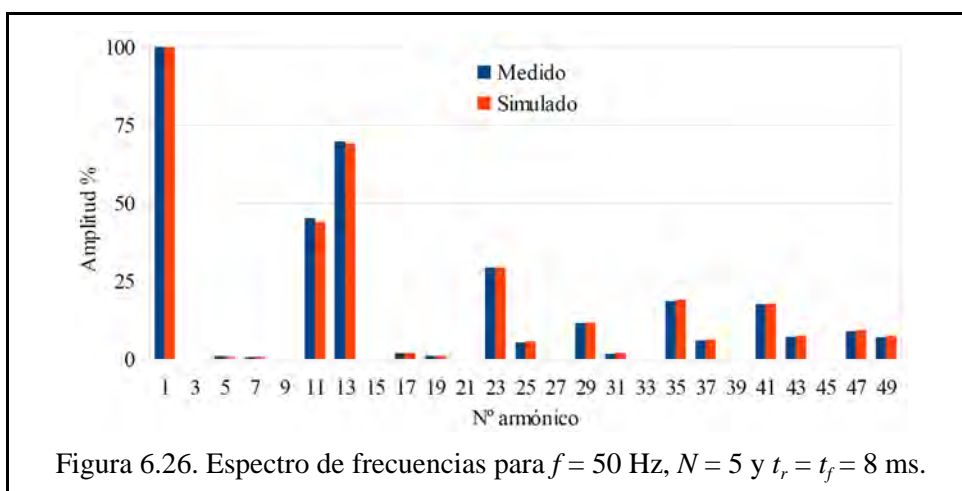
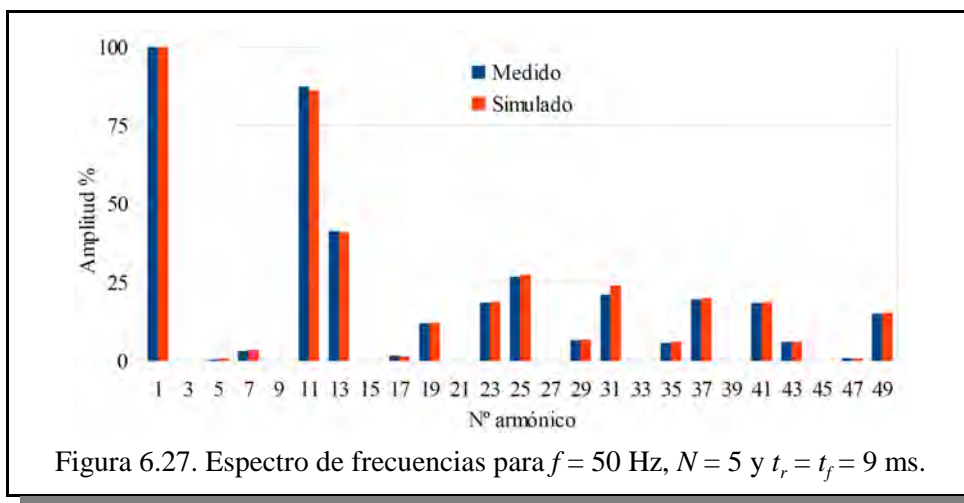


Figura 6.26. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 5$ y $t_r = t_f = 8$ ms.



El Anexo A4 recoge las medidas de armónicos y los valores de los indicadores de calidad *THD* y *WTHD* para distintos casos de modulación de señal de 50 Hz con valores de N entre 6 y 10. En ese anexo se puede ver de nuevo que las diferencias entre los valores reales y los simulados son realmente pequeñas y afectan muy poco a los indicadores de calidad.

6.3 Comparativas de calidad de la señal

Las señales TPWM-DM obtenidas en los apartados anteriores distan de ser señales sinusoidales ideales. Sin embargo, son señales con una calidad muy alta dentro del entorno de señales obtenidas por medio de modulación PWM. Para justificar esta afirmación se ha realizado un estudio comparativo de señales obtenidas con distintas técnicas PWM justificadas por medio de trabajos externos a los que se referencia.

La tabla 6.6 contiene el resumen de este estudio en el que se recogen las distintas medidas de indicadores de calidad de señal TPWM-DM para enfrentarlas en las mismas condiciones (o equivalentes) a las señales obtenidas por medio de otras técnicas de modulación PWM. En esta tabla, la columna de la izquierda establece el número de orden de las filas, que es necesario para la discusión que sigue.

La columna “Técnica de modulación”, identifica el método de modulación utilizado para generar las señales cuyos indicadores se muestran. Las siglas utilizadas en estas columnas son las mismas que las descritas en el Capítulo 1.

	Técnica de modulación	ref	M	THD (%)	t_r (ms)	$WTHD$ (%)	DF (%)	LOH (HO)	V_1 (pu)	$PF50160$ (HO)
1	TPWM-DM (Espectro de 50 armónicos)	-	7	22,40*	0,99	4,03	0,75	5	1,00	5
2				37,27	2,91	2,03**	0,25	5	0,96	17
3		-	11	16,97*	1,7	3,06	0,59	5	0,99	5
4				35,75	3,4	1,41**	0,15	5	0,95	23
5				11,17	2,4	2,07	0,41	5	0,98	5
6				36,64	3,6	1,10**	0,11	35	0,95	>25
7				4,11*	3,5	0,67	0,13	>50	0,95	>25
8				9,94	3,7	0,56**	0,09	49	0,94	>25
9				3,33*	3,90	0,46	0,07	>50	0,94	>25
10				3,35	3,97	0,46**	0,06	>50	0,94	>25
11	SPWM	[1]	11	81,75	---	ND	ND	ND	0,78	ND
12		[2]	15	68,02	---	ND	0,19	13	0,61	13
13		[3]	21	69,48	---	ND	0,17	19	0,61	19
14		[4]	27	ND	---	ND	ND	5	ND	17
15	SPWM sawtooth carrier	[2]	15	66,93	---	ND	0,23	10	0,61	10
16	HIPWM	[1]	11	47,63	---	ND	ND	ND	0,91	ND
17		[2]	15	50,13	---	ND	0,20	11	0,71	11
18		[3]	21	52,75	---	ND	0,15	17	0,71	17
19		[4]	27	ND	---	ND	ND	7	ND	7
20	HIPWM-FMTC	[1]	11	43,22	---	ND	ND	ND	0,94	ND
21		[2]	15	47,32	---	ND	0,17	19	0,75	15
22		[4]	27	ND	---	ND	ND	35	ND	25
23	PWM trap. modulator	[2]	15	63,34	---	ND	0,23	5	0,64	11
24	Modified SPWM	[2]	15	68,02	---	ND	0,20	13	0,61	13
25	MBHE	[1]	11	81,63	---	ND	ND	ND	0,78	ND
26	SLPWM	[1]	7	36,19	---	ND	ND	5	0,97	19
27			11	29,03	---	ND	ND	5	0,97	15

ND = No Disponible, “---” = No aplicable

Tabla 6.6. Comparativa de indicadores de calidad para varias técnicas de modulación.

La columna “ref.” es el número de referencia del documento de donde se han obtenido los indicadores con otras técnicas de modulación. Estos documentos están identificados en el apartado “Referencias” de este capítulo.

La columna “ M ” identifica el número de pulsos por periodo de la señal utilizados en la modulación. En el caso de la modulación desarrollada en esta tesis, se han utilizado distintos valores de M para poder comparar con las distintas posibilidades de otros métodos de modulación.

La columna “ THD (%)” contiene el valor del indicador THD en tanto por ciento para cada uno de los casos.

La columna “ t_r (ms)” contiene el valor del tiempo de subida de la señal, en ms, para el que se muestran sus indicadores de calidad. Este es un valor solamente válido para la técnica TPWM-DM. Es por eso que en la celda correspondiente de las demás técnicas aparece “---”, indicando con ello que no es aplicable. Para cada valor de M mostrado en la técnica TPWM-DM hay dos valores de t_r ; el primero, marcado con “*”, es el correspondiente para cuando el valor de THD es mínimo; el segundo, marcado con “**”, es el correspondiente para cuando el valor de $WTHD$ es mínimo.

La columna “ $WTHD$ (%)” contiene el valor porcentual del indicador $WTHD$ para cada uno de los casos. Desgraciadamente, este indicador no es utilizado por todos los autores y es por eso que en algunas celdas de la tabla aparece “ND”, indicando con ello que es un valor no disponible en el texto de referencia y que no ha sido posible obtenerlo con suficiente precisión del contenido de la documentación.

La columna “ DF (%)” contiene los valores del indicador DF en tanto por ciento para cada uno de los casos. Este es otro indicador del que no hay información en algunos de los casos en la documentación correspondiente.

La columna “ LOH (HO)” contiene el valor del indicador LOH como número de orden del armónico. Al igual que en los indicadores anteriores, hay casos en que este valor no está disponible para otras técnicas de modulación. En algunos documentos no está disponible explícitamente en el texto, pero se ha obtenido de las gráficas adjuntadas en él.

La columna “ V_1 (pu)” contiene la amplitud de la frecuencia fundamental de la señal modulada “per unit”, según se define en el Anexo A1.

La columna “*PF50160* (HO)” contiene el valor del indicador *PF50160*, como se define en el Anexo A1. La unidad de medida es el número de orden del armónico. Este es un indicador que no existe explícitamente en ninguno de los métodos de modulación referenciados, ya que es un indicador de nuevo cuño en esta tesis. Sin embargo, en algunos casos ha sido posible deducir su valor, a partir del texto referenciado, o a partir de los gráficos incluidos en él.

Para obtener resultados concretos de las comparaciones bajo las mismas condiciones de modulación, se ha reordenado la tabla 6.6 de forma que se han agrupado las técnicas con características similares de modulación, para proceder a analizar los distintos casos de estudio. En los apartados que siguen se hace un análisis detallado para cada caso.

6.3.1 Caso de estudio 1: Análisis para $M = 7$

La tabla 6.7 muestra el caso en que $M = 7$. En ella se compara TPWM-DM con sólo otra técnica, SLPWM. Se obtienen las siguientes mejoras:

	Técnica de modulación	ref	M	THD (%)	t_r (ms)	$WTHD$ (%)	DF (%)	LOH (HO)	V_1 (pu)	$PF50160$ (HO)
1	TPWM-DM	-	7	22,40*	0,99	4,03	0,75	5	1,00	5
2	(Espectro de 50 armónicos)			37,27	2,91	2,03**	0,25	5	0,96	17
26	SLPWM	[1]	7	36,19	---	ND	ND	5	0,97	19

Tabla 6.7. Comparativa de indicadores de calidad para $M = 7$.

- Cuando TPWM-DM trabaja con $t_r = 0,99$ ms (en la fila 1), el valor del indicador THD pasa de tener el valor 36,19 % (en la fila 26) a 22,40 %, lo que significa una mejora del 38,10 % respecto a la modulación SLPWM.
- La amplitud del armónico principal, V_1 pu, es mayor en TPWM-DM (fila 1) que en SLPWM, pasando del valor 0,97 a 1,00, lo que significa un incremento del 3,10 %.

La técnica SLPWM tiene la particularidad de utilizar una portadora trapezoidal, por lo que la forma de onda de salida es similar a la obtenida con TPWM-DM.

6.3.2 Caso de estudio 2: Análisis para $M = 11$

La tabla 6.8 resume los resultados de los indicadores de calidad para cuando $M = 11$. En ella se pueden ver los valores de los distintos indicadores para 7 técnicas de modulación. En este caso hay dos puntos de trabajo para TPWM-DM; cuando $t_r = 1,7$ ms y cuando $t_r = 3,4$ ms.

	Técnica de modulación	ref	M	THD (%)	t_r (ms)	$WTHD$ (%)	DF (%)	LOH (HO)	V_1 (pu)	$PF50160$ (HO)
3	TPWM-DM (Espectro de 50 armónicos)	-	11	16,97*	1,7	3,06	0,59	5	0,99	5
4				35,75	3,4	1,41**	0,15	5	0,95	23
11	SPWM	[1]	11	81,75	---	ND	ND	ND	0,78	ND
16	HIPWM	[1]	11	47,63	---	ND	ND	ND	0,91	ND
20	HIPWM-FMTC	[1]	11	43,22	---	ND	ND	ND	0,94	ND
25	MBHE	[1]	11	81,63	---	ND	ND	ND	0,78	ND
27	SLPWM	[1]	11	29,03	---	ND	ND	5	0,97	15

Tabla 6.8. Comparativa de indicadores de calidad para $M = 11$.

Caso 1. $M = 11$ y $t_r = 1,7$ ms. En este punto de trabajo de TPWM-DM se tienen las siguientes mejoras:

- El indicador THD , mejora un 41,54 % respecto al mejor de los otros valores (SLPWM, en la fila 27), pasando del 29,03% al 16,97% (en la fila 3).
- También en este caso, la amplitud del armónico fundamental, V_1 pu, es superior al mejor de los otros en un 2,06 %, pasando del valor 0,97, en la mejor de las otras técnicas (SLPWM, en la fila 27) a 0,99 (en la fila 3).

Caso 2. $M = 11$ y $t_r = 3,4$ ms. En estas condiciones de trabajo, la mejora conseguida es la siguiente:

- El valor del indicador $PF50160$ es mejor que en el otro caso con datos disponibles, alcanzando el valor 23 HO (en la fila 4) frente a 15 HO (SLPWM, en la fila 27).

6.3.3 Caso de estudio 3: Análisis para $M = 15$

La tabla 6.9 recoge los resultados de los indicadores de calidad para cuando $M = 15$. En ella se pueden ver los valores de los distintos indicadores para 7 técnicas de modulación. En este caso hay dos puntos de trabajo diferentes para TPWM-DM: $t_r = 2,4$ ms y $t_r = 3,6$ ms, que se discuten a continuación.

	Técnica de modulación	ref	M	THD (%)	t_r (ms)	$WTHD$ (%)	DF (%)	LOH (HO)	V_1 (pu)	$PF50160$ (HO)
5	TPWM-DM (Espectro de 50 armónicos)	-	15	11,17	2,4	2,07	0,41	5	0,98	5
6				36,64	3,6	1,10**	0,11	35	0,95	>25
12	SPWM	[2]	15	68,02	---	ND	0,19	13	0,61	13
15	SPWM with sawtooth carrier	[2]	15	66,93	---	ND	0,23	10	0,61	10
17	HIPWM	[2]	15	50,13	---	ND	0,20	11	0,71	11
21	HIPWM-FMTC	[2]	15	47,32	---	ND	0,17	19	0,75	15
23	PWM trapezoidal modulator	[2]	15	63,34	---	ND	0,23	5	0,64	11
24	Modified SPWM	[2]	15	68,02	---	ND	0,20	13	0,61	13

Tabla 6.9. Comparativa de indicadores de calidad para $M = 15$.

Caso 1. $M = 15$ y $t_r = 2,4$ ms. En este caso, se tienen los siguientes resultados:

- El indicador THD mejora respecto al mejor valor de las otras técnicas, pasando de 47,32 %, en el mejor de los casos (HIPWM-FMTC, fila 21), a 11,17 % (en la fila 5), lo cual significa una mejora del 76,39 %.
- La amplitud de la frecuencia fundamental, V_1 pu, se incrementa un 30,66%, pasando de 0,75, en el mejor de los casos (HIPWM-FMTC, fila 21), a 0,98 (en la fila 5).

Caso 2. $M = 15$ y $t_r = 3,6$ ms. En este punto de trabajo de TPWM-DM se tienen las siguientes características:

- El valor del indicador THD pasa del 47,32 %, en el mejor caso de las otras técnicas (HIPWM-FMTC, en la fila 21) al 36,64 % (en la fila 6), lo que supone una mejora de este indicador de un 22,57 %.

- El indicador DF mejora un 35,29 %, pasando de 0,17 %, en el mejor de los casos (HIPWM-FMTC, en la fila 21) a 0,11 % (en la fila 6)
- El valor del indicador LOH se incrementa del valor 19 HO en el mejor de los casos (HIPWM_FMTC, en la fila 21) hasta 35 HO (en la fila 6)
- El valor de $PF50160$ mejora, pasando de 15 HO, en el mejor de los casos (HIPWM_FMTC, en la fila 21) a > 25 HO (en la fila 6).

6.3.4 Caso de estudio 4: Análisis para $M = 21$

La tabla 6.10 resume los resultados obtenidos para los indicadores de calidad cuando TPWM-DM trabaja con $M = 21$. En ella se pueden ver los valores de los distintos indicadores para 3 técnicas de modulación. En estas circunstancias se presentan dos casos que se discuten a continuación: cuando $t_r = 3,5$ ms y cuando $t_r = 3,7$ ms.

	Técnica de modulación	ref	M	THD (%)	t_r (ms)	$WTHD$ (%)	DF (%)	LOH (HO)	V_1 (pu)	$PF50160$ (HO)
7	TPWM-DM (Espectro de 50 armónicos)	-	21	4,11*	3,5	0,67	0,13	>50	0,95	>25
8				9,94	3,7	0,56**	0,09	49	0,94	>25
13	SPWM	[3]	21	69,48	---	ND	0,17	19	0,61	19
18	HIPWM	[3]	21	52,75	---	ND	0,15	17	0,71	17

Tabla 6.10. Comparativa de indicadores de calidad para $M = 21$.

Caso 1. $M = 21$ y $t_r = 3,5$ ms. En este caso (fila 7), las mejoras diferenciales de los indicadores de calidad respecto a otros métodos de modulación son las siguientes:

- El valor del indicador THD se reduce en un 92,21 % respecto al mejor valor de las otras técnicas, pasando del 52,75 % (HIPWM, en la fila 18) al 4,11 % (en la fila 7).
- El indicador DF baja de valor, desde 0,15 %, en el mejor de los otros casos (HIPWM, en la fila 18), hasta 0,13 % (en la fila 7), lo cual significa una mejora del 13,33 %.

- El indicador LOH mejora y sube de 19 HO (SPWM, en la fila 13) a > 50 HO (en la fila 7).
- La amplitud del armónico fundamental, V_1 pu, mejora y se incrementa, pasando de 0,71 (HIPWM, en la fila 18) a 0,95 (en la fila 7), lo que significa un incremento del 33,80 %.
- La mejora en el indicador $PF50160$ es importante, pasando de 19 HO, en el mejor de los casos (SPWM, en la fila 13) a > 25 HO (en la fila 7). En este caso, el cumplimiento con la norma EN 50160 es total para TPWM-DM, porque el indicador THD para TPWM-DM es < 8 %.

Caso 2. $M = 21$ y $t_r = 3,7$ ms. En este caso (fila 8), las mejoras diferenciales de los indicadores de calidad respecto a otros métodos de modulación son las siguientes:

- El valor del indicador THD se reduce un 81,16 %, pasando del valor 52,75 %, en el caso mejor (HIPWM, en la fila 18), a 9,94 % (en la fila 8).
- El valor del indicador DF baja de 0,15 %, en la mejor de las otras técnicas (HIPWM, en la fila 18), a 0,09 % (en la fila 8), lo que significa una mejora del 40,00 %.
- El valor de LOH es mejor en TPWM-DM, ya que sube de 19 HO (en la fila 13) hasta 49 HO (en la fila 8).
- La amplitud del armónico fundamental se incrementa de 0,71 (en la fila 18) a 0,94 (en la fila 8), lo que significa un incremento del 32,40 %.
- El valor del indicador $PF50160$ mejora, ya que pasa de 19 HO en la mejor de las otras técnicas (SPWM, en la fila 13) a > 25 HO (en la fila 8).

6.3.5 Caso de estudio 5: Análisis para $M = 27$

La tabla 6.11 resume los resultados obtenidos para $M = 27$. En ella se pueden ver los valores de los distintos indicadores para 3 técnicas de modulación. En este caso no hay mucha información de las otras técnicas. A pesar de ello, las mejoras son las siguientes:

	Técnica de modulación	ref	M	THD (%)	t_r (ms)	$WTHD$ (%)	DF (%)	LOH (HO)	V_1 (pu)	$PF50160$ (HO)
9	TPWM-DM (Espectro de 50 armónicos)	-	27	3,33*	3,90	0,46	0,07	>50	0,94	>25
10				3,35	3,97	0,46**	0,06	>50	0,94	>25
14	SPWM	[4]	27	ND	---	ND	ND	5	ND	17
19	HIPWM	[4]	27	ND	---	ND	ND	7	ND	7
22	HIPWM-FMTC	[4]	27	ND	---	ND	ND	35	ND	25

Tabla 6.11. Comparativa de indicadores de calidad para $M = 27$.

- El indicador LOH mejora, ya que sube de 35 HO, en el mejor de los casos (HIPWM_FMTC, en la fila 22) hasta más de 50 HO (en las filas 9 y 10).
- El indicador $PF50160$ mejora, puesto que pasa de 25 HO, en el mejor de los casos (HIPWM-FMTC, en la fila 22) a más de 25 HO en las filas 9 y 10. Además, por ser el valor de $THD < 8\%$, el cumplimiento con la norma EN 50160 es completo, en el caso de TPWM-DM.

Referencias

- [1] Francisco Vargas-Merino, Mario J. Meco-Gutiérrez, Juan R. Heredia-Larrubia, and Antonio Ruiz-Gonzalez. “Low Switching PWM Strategy Using a Carrier Wave Regulated by the Slope of a Trapezoidal Modulator Wave”. IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 56, No. 6, June 2009
- [2] M.J. Meco-Gutierrez, F. Perez-Hidalgo, F. Vargas-Merino and J.R. Heredia-Larrubia, “Pulse width modulation technique with harmonic injection and frequency modulated carrier: formulation and application to an induction motor”, IET Electr. Power Appl., 2007, 1, (5), pp. 714 714–726.
- [3] Mario Meco-Gutierrez, Juan-Ramon Heredia-Larrubia, Francisco Perez-Hidalgo, ”Pulse width modulation technique parameter selection with harmonic injection and frequency modulated triangular carrier”, IET Power Electron., 2013, Vol. 6, Iss. 5, pp. 954–962.
- [4] M. J. Meco-Gutiérrez, F. Pérez-Hidalgo, F. Vargas-Merino, and J. R. Heredia-Larrubia, “A New PWM Technique Frequency Regulated Carrier for Induction Motors Supply”. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, No. 5, October 2006.

Capítulo 7

Conclusiones

Índice

Capítulo 7. Conclusiones	7-1
7.1 La modulación TPWM-DM	7-1
7.2 Simulación	7-1
7.3 Implementaciones	7-1
7.4 Las señales trapezoidales	7-2
7.5 El vector-semilla	7-2
7.6 Frecuencia de la señal	7-3
7.7 Calidad de la señal	7-3
7.8 Resumen de conclusiones	7-3

Capítulo 7. Conclusiones

7.1 La modulación TPWM-DM

En el Capítulo 3 se ha visto que la utilización de modulación directa sobre una señal trapezoidal hace que las ecuaciones de modulación, que generan los patrones de conmutación de la señal modulada, sean ecuaciones lineales. Como se ha dicho antes, esto minimiza los requerimientos computacionales del modulador y reduce, por lo tanto, el costo de desarrollo y de la circuitería, permitiendo su implementación por medio de dispositivos comerciales de bajo costo.

7.2 Simulación

Las medidas obtenidas de la simulación en cuanto a la duración de los pulsos, confirman la correcta realización de la misma, puesto que los valores obtenidos son los mismos que los deducidos teóricamente en el Capítulo 3 por medio de las ecuaciones (3.19) y (3.23).

Por otro lado, las medidas de los armónicos en la simulación han sido contrastadas utilizando señales sin modular con espectros de frecuencias previamente conocidos, como son señales cuadradas con diferentes valores del ciclo de trabajo, señales sinusoidales y señales trapezoidales con distintos valores de t_r . Estas verificaciones permiten asegurar la validez de las medidas en simulación.

7.3 Implementaciones

Los resultados presentados en el Capítulo 6 (apartado 6.2), muestran que entre las medidas realizadas en simulación y las realizadas en el banco de trabajo sobre las implementaciones físicas reales, apenas hay diferencias. Este resultado facilita mucho

el progreso de las próximas investigaciones en esta línea de trabajo ya que las implementaciones que se hagan seguirán siendo réplicas de las simulaciones, por lo que es posible trabajar, desde el punto de vista teórico, con la certeza de su fidelidad.

7.4 Las señales trapezoidales

Como se ha mostrado en el Capítulo 3, la linealidad presente en estas forma de onda hace que las ecuaciones de modulación sean muy simples y lineales y esto conlleva una gran facilidad de realización por medio de microcontroladores comerciales de bajo costo, como se ha visto en el Capítulo 5.

Además, la utilización de señales trapezoidales hace que la frecuencia fundamental de la señal modulada tenga una gran amplitud, mayor que la que se logra con otras técnicas de modulación, lo que se comprueba en las medidas de calidad de la señal por medio del indicador V_1 pu comparada con el valor que se obtiene con otras técnicas de modulación (apartado 6.3). Esta característica facilita el incremento general de la calidad de la señal modulada.

7.5 El vector-semilla

Los valores que se obtienen para los tiempos de conmutación de la señal modulada TPWM-DM, calculados con las ecuaciones de modulación, generan patrones de conmutación repetitivos, como se puede ver en la tablas 3.12 y 3.15, lo que permite simplificar el algoritmo de generación no siendo necesario implementar las ecuaciones de modulación, utilizando en su lugar un elemento denominado **vector-semilla** (apartado 3.5.1) compuesto por $2N$ valores numéricos, donde N es el número de pulsos durante el tiempo de subida. Los requerimientos computacionales del microcontrolador se reducen a un multiplicador que incluso puede ser realizado por medio de un programa (una rutina en C, por ejemplo).

7.6 Frecuencia de la señal

La frecuencia de la señal de salida es independiente del parámetro de modulación N . Los valores de t_H y t_L se obtienen por diferencia entre el semiperiodo de la señal y t_r . Esto permite un amplio rango de valores de frecuencia ya que no hay cambios en los patrones de modulación, solamente en los valores de t_H y t_L .

El valor máximo de la frecuencia de la señal quedan establecidos limitado por t_r , mientras que el valor mínimo depende de las posibilidades de conteo que disponga el microcontrolador utilizado y la base de tiempos que éste tenga.

7.7 Calidad de la señal

La calidad de la señal modulada que se obtiene es superior que la que se logra con otros métodos de modulación. Este punto se desarrolla en detalle en el apartado 6.3. Además, con esta técnica es posible cumplir con los valores de amplitud máxima de los armónicos permitidas por la norma EN 50160, reduciendo los requerimientos de los filtros de salida del inversor e, incluso, eliminando éstos.

7.8 Resumen de conclusiones

De todo lo dicho en los apartados anteriores se concluye que los objetivos marcados en el Capítulo 1 para esta tesis han sido alcanzados. Estos objetivos son los siguientes:

- *Mejorar las características del perfil de armónicos de la señal modulada.*
- *Reducir el coste del bloque modulador.*
- *Reducir el coste de los filtros de salida.*
- *Reducir las pérdidas en el sistema inversor.*

Capítulo 8

Futuras líneas de investigación

Índice

Capítulo 8. Futuras líneas de investigación 8-1

Capítulo 8. Futuras líneas de investigación

La modulación TPWM-DM, desarrollada en los capítulos anteriores, puede ser utilizada para obtener otras formas de onda aparte de las ya vistas. Lo que siguen son algunas ideas para futuras líneas de investigación utilizando esta técnica.

- Ampliación del rango de control de la amplitud de la frecuencia fundamental de la señal modulada haciendo uso del coeficiente V_o/V_i . Este coeficiente, que aparece en la ecuación del tiempo del pulso, permite modificar la amplitud de la señal durante el tiempo de subida y bajada. Actuar sobre él permitiría disponer de un rango de amplitud de la frecuencia fundamental mayor que cuando se modifica el tiempo de subida y bajada de la señal. Utilizar este coeficiente implica que hay que incluir modulación PWM durante los tiempos t_H y t_L para que el valor de la amplitud durante estos tiempos sea el adecuado.
- Utilización de la técnica TPWM-DM en inversores multinivel. Estos inversores se desarrollan por varias razones, entre otras están la mejora de las características de la señal de salida (mejores valores de los indicadores de calidad), y para poder trabajar con tensiones altas, por encima de los límites de los dispositivos semiconductores. La técnica podría ser utilizada para modular la señal durante los tiempos de cambio de nivel. De esta forma las mejoras que aporta TPWM-DM a la calidad de la señal, se transferirían a las señales multinivel.

Anexo A1

Indicadores de calidad

Índice

Anexo A1. Indicadores de calidad	A1-1
A1.1 Distorsión armónica total	A1-1
A1.2 Distorsión armónica total ponderada	A1-2
A1.3 Factor de distorsión	A1-3
A1.4 Amplitud fundamental pu	A1-4
A1.5 Indicador <i>LOH</i>	A1-5
A1.6 Indicador <i>PF50160</i>	A1-5
A1.7 Frecuencia fundamental	A1-6
Referencias	A1-7

Índice de tablas

Tabla A1.1. Perfil de frecuencias establecido en la norma EN 50160. A1-6

Anexo A1. Indicadores de calidad

Para evaluar la bondad de las señales PWM generadas por los inversores de potencia utilizando alguna técnica de modulación, es necesario disponer de los criterios adecuados. Por esta razón, en lo que sigue se presentan los criterios utilizados en este trabajo.

Existen varias formas de informar sobre la calidad de las señales obtenidas de los sistemas inversores que se denominan indicadores de calidad de señal. Estos indicadores aportan información específica sobre la calidad de las señales. Los más conocidos son cuatro: la distorsión armónica total, *THD* (Total Harmonic Distortion), la distorsión armónica ponderada, *WTHD* (Weighted Total Harmonic Distortion), el factor de distorsión, *DF* (Distortion Factor), y la amplitud del armónico fundamental (V_1) en unidades pu (per unit). Otros indicadores utilizados son: *LOH* (Lowest Order Harmonic) y *PF50160* (Perfil de Frecuencias armónicas según EN 50160). Todos ellos se describen a continuación.

A1.1 Distorsión armónica total

Una señal sinusoidal pura está compuesta por una única frecuencia cuya forma es sinusoidal. Cualquier otra forma de onda está formada por agrupaciones de señales sinusoidales con parámetros diferentes de frecuencia, amplitud y fase. En la realidad no existe una señal sinusoidal pura, de forma que todas las señales se ven conformadas por un conjunto más o menos amplio de señales sinusoidales con distintas características, de acuerdo al teorema de Fourier. Este conjunto de señales que conforman una señal resultante es lo que se denomina espectro de frecuencias de la señal resultante.

Para conocer lo parecida que es una señal a la forma de onda teórica ideal, se utiliza el indicador *THD* o distorsión armónica total como se define en [1 y 2], que

dice lo cerca o lejos que la señal se encuentra de tener la forma de onda ideal. Su expresión matemática es:

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{n=\infty} V_n^2}{V_1^2}} \quad (A1.1)$$

O bien:

$$THD = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} V_n^2} \quad (A1.2)$$

En donde V_n es la amplitud del armónico de orden n , y V_1 es la amplitud del armónico de orden uno, armónico fundamental o frecuencia fundamental de la señal. Cuando THD se expresa como porcentaje respecto a la frecuencia fundamental, la ecuación es:

$$THD(\%) = 100 \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} V_n^2} \quad (A1.3)$$

En las medidas reales utilizadas en la industria, el valor de n se limita a 50, es decir se tienen en cuenta hasta el armónico con este número de orden. Sin embargo, la norma EN 50160 [3] limita a 40 el número total de armónicos para este indicador.

A1.2 Distorsión armónica total ponderada

En muchos casos la alimentación trifásica se utiliza para hacer funcionar maquinaria eléctrica con un alto valor inductivo. En estos casos, los armónicos cuyo número de orden es mayor (los de mayor frecuencia) tienen menor efecto en la carga conforme aumenta el número de orden. Esto se debe a que la impedancia de un circuito inductivo tiene la expresión:

$$X_L = j\omega L = j2\pi f L \quad (A1.4)$$

Es decir, la impedancia se incrementa conforme lo hace la frecuencia. Esto implica que las corrientes de las frecuencias de orden superior son bastante más pequeñas que las de orden inferior. El indicador *THD* no tiene en cuenta este detalle y por ello se utiliza otro indicador denominado distorsión armónica total ponderada *WTHD* (Weigthed THD), como se define en [1]. La expresión de este indicador es la siguiente:

$$WTHD = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} \left(\frac{V_n}{n}\right)^2} \quad (A1.5)$$

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

$$WTHD(\%) = 100 \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} \left(\frac{V_n}{n}\right)^2} \quad (A1.6)$$

También en este caso el valor de n se limita a 50.

A1.3 Factor de distorsión

El factor de distorsión *DF* se define en [2] por medio de la ecuación siguiente:

$$DF = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} \left(\frac{V_n}{n^2}\right)^2} \quad (A1.7)$$

Esta ecuación resta importancia de forma cuadrática a los armónicos conforme sube la frecuencia de éstos. Cuando *DF* se expresa como porcentaje respecto a la frecuencia fundamental de la señal, la ecuación es:

$$DF(\%) = 100 \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} \left(\frac{V_n}{n^2}\right)^2} \quad (A1.8)$$

En este caso, el número de armónicos a considerar es el mismo que se esté considerando para *THD* y *WTHD*, normalmente 50.

A1.4 Amplitud fundamental pu

Este indicador es el valor de la amplitud del armónico fundamental de una señal alterna de amplitud V respecto a la amplitud del armónico fundamental de una señal cuadrada alterna con ciclo de trabajo de 50 % y la misma amplitud. Se representa por V_1 pu. Su ecuación, según [3], es:

$$V_1 \text{ pu} = \frac{V_{1-wf}}{V_{1-sqrwf}} \quad (\text{A1.9})$$

donde V_{1-wf} es el valor de la amplitud del armónico principal de la forma de onda bajo medida y $V_{1-sqrwf}$ es la amplitud del armónico principal de una onda cuadrada con ciclo de trabajo del 50 % de la misma frecuencia que la señal a medir.

El valor del armónico fundamental de una señal cuadrada de amplitud unitaria con ciclo de trabajo del 50 % es $4/\pi = 1,2732396$, y es la amplitud mayor que se puede alcanzar con señales conmutadas moduladas PWM.

Este indicador da una idea del rendimiento del método utilizado, que es mejor cuanto más se aproxime al valor de referencia, es decir, cuando el valor pu de la amplitud del armónico fundamental, V_1 pu, se aproxime a la unidad.

A1.5 Indicador *LOH*

Algunos autores utilizan, además de los indicadores anteriormente descritos, el que se denomina *LOH* (Low Order Harmonic) [3], que es un valor que identifica el número de orden del armónico de orden más bajo cuya amplitud es superior al 3% respecto a la amplitud de la frecuencia fundamental. Este indicador da una idea de cuales deben de ser las características de los filtros de salida, cuando estos son necesarios. La unidad utilizada es HO (Harmonic Order).

Este indicador no es dependiente del número de armónicos considerados. Sin embargo cuando el valor de *LOH* es superior al rango de armónicos especificado o considerados para otras medidas, el valor se expresa simplemente como “> 50 HO” cuando el rango es de 50 armónicos, o “> 40 HO” si el rango es de 40 armónicos.

A1.6 Indicador *PF50160*

Este es un indicador creado en este trabajo que refleja el cumplimiento del perfil de frecuencias armónicas establecido como límite en la norma Europea EN 50160 [4] para las redes de suministro de media y baja tensión (LV y MV). Este indicador es un número que identifica el armónico de menor orden que no cumple el citado perfil. Es parecido a *LOH* salvo que se basa en una norma internacional. Como el indicador *LOH*, este indicador aporta información relevante para el dimensionado de las características que han de tener los filtros de salidas, en el caso de un inversor de potencia. Este indicador no asegura la compatibilidad completa con esta norma ya que, además, es necesario que el valor de *THD* sea $< 8\%$ en el rango de los primeros cuarenta armónicos. La unidad utilizada para este indicador es HO (Harmonic Order).

Los valores límites para las componentes armónicas que establece la norma EN 50160 son los contenidos en la tabla A1.1.

Armónicos impares				Armónicos pares	
No múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Orden	Amplitud relativa	Orden	Amplitud relativa	Orden	Amplitud relativa
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%	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.			
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				

Tabla A1.1. Perfil de frecuencias establecido en la norma EN 50160.

A1.7 Frecuencia fundamental f_1

Aunque pueda parecer obvio, dependiendo de los parámetros de la modulación y de cómo se realicen los cálculos, la frecuencia del armónico fundamental puede variar. Esta variación suele ser pequeña, bastante menor de los valores tolerados por las normativas correspondientes, pero no deja de ser un indicador más de calidad de

la señal. Este indicador se identifica por medio de su nombre completo, como en el título de este apartado o, simplemente, como f_1 .

Referencias

- [1] D. Grahame Holmes and Thomas A. Lipo, “Pulse Width Modulation For Power Converters”, IEEE Press, Wiley Interscience 2003, ISBN: 0-471-20814-0.
- [2] Muhammad H. Rashid, “Electrónica de potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones”. Pearson educación de Mexico, 3ª Edición 2004, ISBN: 0-13-101140-5.
- [3] M.J. Meco-Gutierrez, F. Perez- Hidalgo, F. Vargas-Merino and J.R. Heredia-Larrubia, “Pulse width modulation technique with harmonic injection and frequency modulated carrier: formulation and application to an induction motor”, IET Electr. Power Appl., 2007, 1, (5), pp. 714 714–726.
- [4] AENOR UNE-EN50160, “Características de la tensión suministrada por las redes generales de distribución”, 2011.

Anexo A2

Resultados de la simulación

Índice

Anexo A2. Resultados de la simulación A2-1

Índice de figuras

Figura A2.1. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 3$	A2-3
Figura A2.2. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 4$	A2-5
Figura A2.3. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 5$	A2-7
Figura A2.4. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 6$	A2-9
Figura A2.5. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 7$	A2-11
Figura A2.6. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 8$	A2-13
Figura A2.7. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 9$	A2-15
Figura A2.8. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 10$	A2-17
Figura A2.9. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 11$	A2-19
Figura A2.10. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 12$	A2-21
Figura A2.11. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 13$	A2-23
Figura A2.12. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 14$	A2-25
Figura A2.13. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 15$	A2-27

Figura A2.14. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_p para $f = 50$ Hz y $N = 16$ A2-29

Figura A2.15. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_p para $f = 50$ Hz y $N = 17$ A2-31

Figura A2.16. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_p para $f = 50$ Hz y $N = 18$ A2-33

Figura A2.17. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_p para $f = 50$ Hz y $N = 19$ A2-35

Figura A2.18. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_p para $f = 50$ Hz y $N = 20$ A2-37

Figura A2.19. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_p para $f = 60$ Hz y $N = 3$ A2-39

Figura A2.20. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_p para $f = 60$ Hz y $N = 4$ A2-41

Figura A2.21. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_p para $f = 60$ Hz y $N = 5$ A2-43

Figura A2.22. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_p para $f = 60$ Hz y $N = 6$ A2-45

Figura A2.23. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_p para $f = 60$ Hz y $N = 7$ A2-47

Figura A2.24. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_p para $f = 60$ Hz y $N = 8$ A2-49

Figura A2.25. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_p para $f = 60$ Hz y $N = 9$ A2-51

Figura A2.26. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_p para $f = 60$ Hz y $N = 10$ A2-53

Figura A2.27. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_p para $f = 60$ Hz y $N = 11$ A2-55

Figura A2.28. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 60$ Hz y $N = 12$ A2-57

Figura A2.29. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 60$ Hz y $N = 13$ A2-59

Figura A2.30. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 60$ Hz y $N = 14$ A2-61

Figura A2.31. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 60$ Hz y $N = 15$ A2-63

Figura A2.32. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 60$ Hz y $N = 16$ A2-65

Figura A2.33. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 60$ Hz y $N = 17$ A2-67

Figura A2.34. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 60$ Hz y $N = 18$ A2-69

Figura A2.35. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 60$ Hz y $N = 19$ A2-71

Figura A2.36. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 60$ Hz y $N = 20$ A2-73

Índice de tablas

Tabla A2.1. Valores numéricos de la figura A2.1.	A2-4
Tabla A2.2. Valores numéricos de la figura A2.2.	A2-6
Tabla A2.3. Valores numéricos de la figura A2.3.	A2-8
Tabla A2.4. Valores numéricos de la figura A2.4.	A2-10
Tabla A2.5. Valores numéricos de la figura A2.5.	A2-12
Tabla A2.6. Valores numéricos de la figura A2.6.	A2-14
Tabla A2.7. Valores numéricos de la figura A2.7.	A2-16
Tabla A2.8. Valores numéricos de la figura A2.8.	A2-18
Tabla A2.9. Valores numéricos de la figura A2.9.	A2-20
Tabla A2.10. Valores numéricos de la figura A2.10.	A2-22
Tabla A2.11. Valores numéricos de la figura A2.11.	A2-24
Tabla A2.12. Valores numéricos de la figura A2.12.	A2-26
Tabla A2.13. Valores numéricos de la figura A2.13.	A2-28
Tabla A2.14. Valores numéricos de la figura A2.14.	A2-30
Tabla A2.15. Valores numéricos de la figura A2.15.	A2-32
Tabla A2.16. Valores numéricos de la figura A2.16.	A2-34
Tabla A2.17. Valores numéricos de la figura A2.17.	A2-36
Tabla A2.18. Valores numéricos de la figura A2.18.	A2-38
Tabla A2.19. Valores numéricos de la figura A2.19.	A2-40
Tabla A2.20. Valores numéricos de la figura A2.20.	A2-42
Tabla A2.21. Valores numéricos de la figura A2.21.	A2-44
Tabla A2.22. Valores numéricos de la figura A2.22.	A2-46

Tabla A2.23. Valores numéricos de la figura A2.23.	A2-48
Tabla A2.24. Valores numéricos de la figura A2.24.	A2-50
Tabla A2.25. Valores numéricos de la figura A2.25.	A2-52
Tabla A2.26. Valores numéricos de la figura A2.26.	A2-54
Tabla A2.27. Valores numéricos de la figura A2.27.	A2-56
Tabla A2.28. Valores numéricos de la figura A2.28.	A2-58
Tabla A2.29. Valores numéricos de la figura A2.29.	A2-60
Tabla A2.30. Valores numéricos de la figura A2.30.	A2-62
Tabla A2.31. Valores numéricos de la figura A2.31.	A2-64
Tabla A2.32. Valores numéricos de la figura A2.32.	A2-66
Tabla A2.33. Valores numéricos de la figura A2.33.	A2-68
Tabla A2.34. Valores numéricos de la figura A2.34.	A2-70
Tabla A2.35. Valores numéricos de la figura A2.35.	A2-72
Tabla A2.36. Valores numéricos de la figura A2.36.	A2-74

Anexo A2. Resultados de la simulación

Este anexo recopila los resultados obtenidos de la simulación de la modulación TPWM-DM.

Las figuras A2.1 a A2.18 muestran las gráficas resultantes de las medidas de los indicadores de calidad, realizadas con diferentes parámetros para una señal de 50 Hz de frecuencia. Las figuras A2.19 a A2.36 son para 60 Hz. Todas ellas constan de cien medidas por cada indicador. El eje x contiene los valores de los tiempos de subida y bajada, desde el menor valor ($t_r = 0$) hasta el mayor ($t_r = T/2$). El eje y representa el valor del parámetro bajo medida en las unidades que se indican en el gráfico correspondiente. Todas estas medidas son con el coeficiente $V_o/V_i=1$. Por último indicar que todas las medidas se han realizado con señales trifásicas línea a línea.

En cada una de estas figuras, hay cinco gráficas que representan los siete indicadores de calidad siguientes: $WTHD$, DF , V_1 pu, THD , LOH , $PF50160$ y f_1 .

En la gráfica de $WTHD$ (línea negra) y DF (línea roja), los tres recuadros que hay al pie (2,03 0,96 @ 2,90 en la figura A2.1) contienen el valor mínimo de la distorsión armónica total ponderada, el valor mínimo del factor de distorsión y el valor de t_r , en el que suceden los valores anteriores, respectivamente.

El recuadro al pie de la gráfica de V_1 pu, contiene el valor de la amplitud del armónico fundamental cuando $WTHD$ y DF son mínimos.

Los recuadros al pie de la gráfica de THD contienen el valor mínimo de la distorsión armónica total y el valor de t_r , en el que sucede, respectivamente.

Las gráficas de los indicadores LOH (línea discontinua negra) y $PF50160$ (línea continua roja) relacionan el valor de estos parámetros con el tiempo de subida de la señal. Así, en la figura A2.4, por ejemplo, hasta $t_r = 3,4$ ms, el valor de LOH es 5 HO (ver la tabla A2.4), mientras que para $t_r = 3,5 - 3,8$ ms el valor de LOH es 29 HO para pasar a ser 25 HO entre 3,9 y 4,10 ms. Estas gráficas junto con los valores numéricos (tablas correspondientes) son útiles para diseñar los filtros de salida de los inversores.

La evolución del indicador *PF50160* es similar a la anterior salvo que se rige por la norma EN 50160. En la figura A2.4 (tabla A2.4) se puede ver que la señal modulada cumple con esta normativa, en cuanto a la amplitud de los armónicos, para valores de t_r entre 3 ms y 3,7 ms.

Las gráficas de f_1 , frecuencia fundamental de la señal, muestra que este indicador se mantiene muy por debajo dentro de los valores permitidos, que según EN 50160 es $\pm 1\%$, es decir, $\pm 0,5$ Hz.

Dado que en las gráficas no se pueden apreciar los detalles, todas las figuras van acompañadas de la correspondiente tabla de valores numéricos, las tablas A2.1 a A2.18 para 50 Hz y las tablas A2.19 a A2.36 son para 60 Hz.

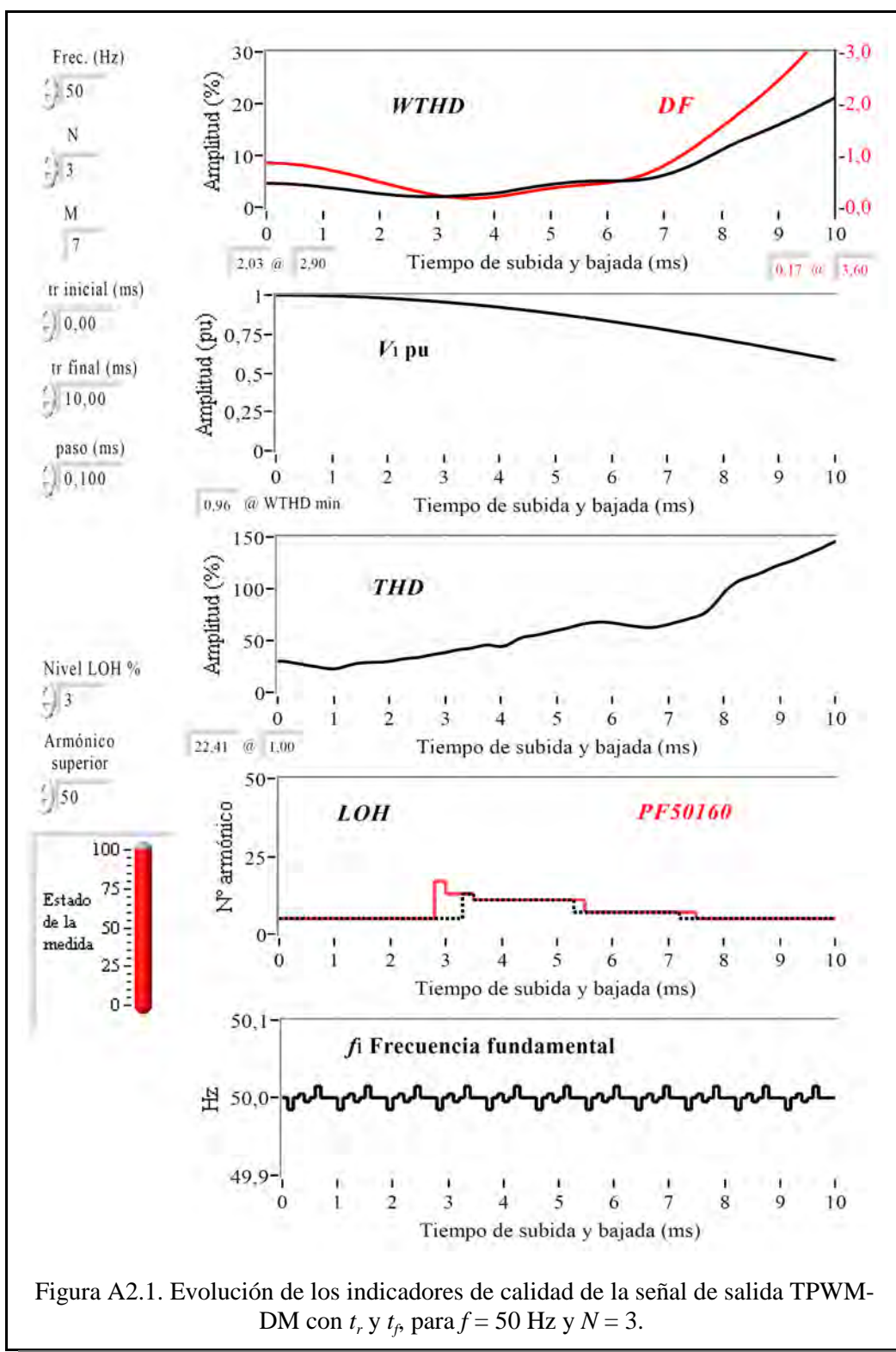


Figura A2.1. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 3$.

$f_s=50\text{Hz}$, $N=3$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,75	1,00	5	5	50,00
0,20	4,60	0,85	29,04	1,00	5	5	49,99
0,30	4,56	0,85	28,20	1,00	5	5	50,00
0,40	4,50	0,84	27,28	1,00	5	5	50,01
0,50	4,42	0,83	26,27	1,00	5	5	50,00
0,60	4,34	0,81	25,35	1,00	5	5	50,00
0,70	4,25	0,80	24,46	1,00	5	5	50,02
0,80	4,14	0,78	23,52	1,00	5	5	50,00
0,90	4,03	0,76	22,73	1,00	5	5	50,00
1,00	3,91	0,74	22,41	0,99	5	5	50,00
1,10	3,78	0,72	23,06	0,99	5	5	49,99
1,20	3,66	0,70	24,46	0,99	5	5	50,00
1,30	3,54	0,68	26,10	0,99	5	5	50,01
1,40	3,40	0,65	27,48	0,99	5	5	50,00
1,50	3,27	0,62	28,17	0,99	5	5	50,00
1,60	3,14	0,60	28,49	0,99	5	5	50,02
1,70	3,01	0,57	28,71	0,99	5	5	50,00
1,80	2,87	0,54	28,90	0,98	5	5	50,00
1,90	2,74	0,51	29,17	0,98	5	5	49,99
2,00	2,61	0,48	29,72	0,98	5	5	50,00
2,10	2,51	0,46	30,59	0,98	5	5	50,00
2,20	2,41	0,43	31,62	0,98	5	5	50,01
2,30	2,30	0,40	32,44	0,97	5	5	50,00
2,40	2,22	0,37	32,86	0,97	5	5	50,02
2,50	2,15	0,35	33,30	0,97	5	5	50,02
2,60	2,10	0,32	34,19	0,97	5	5	50,00
2,70	2,06	0,30	35,39	0,96	5	5	50,00
2,80	2,04	0,27	36,44	0,96	5	5	50,00
2,90	2,03	0,25	37,22	0,96	5	17	49,99
3,00	2,05	0,23	38,04	0,96	5	17	50,00
3,10	2,08	0,22	39,22	0,95	5	13	50,01
3,20	2,12	0,20	40,57	0,95	5	13	50,00
3,30	2,17	0,19	41,42	0,95	5	13	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF	f_1 (Hz)
3,40	2,23	0,18	41,89	0,94	13	13	50,02
3,50	2,30	0,17	42,65	0,94	13	13	50,00
3,60	2,38	0,17	43,98	0,94	11	11	50,00
3,70	2,45	0,17	45,23	0,93	11	11	50,00
3,80	2,53	0,18	45,43	0,93	11	11	49,99
3,90	2,59	0,18	44,55	0,93	11	11	50,00
4,00	2,69	0,20	43,84	0,92	11	11	50,01
4,10	2,83	0,21	44,90	0,92	11	11	50,00
4,20	3,00	0,23	47,70	0,91	11	11	50,00
4,30	3,19	0,24	50,79	0,91	11	11	50,02
4,40	3,39	0,26	53,01	0,91	11	11	50,00
4,50	3,58	0,28	54,04	0,90	11	11	50,00
4,60	3,76	0,30	54,65	0,90	11	11	50,00
4,70	3,94	0,32	55,57	0,89	11	11	49,99
4,80	4,10	0,34	56,83	0,89	11	11	50,00
4,90	4,25	0,35	58,16	0,88	11	11	50,01
5,00	4,40	0,37	59,42	0,88	11	11	50,00
5,10	4,54	0,38	60,55	0,88	11	11	50,00
5,20	4,65	0,39	61,78	0,87	11	11	50,02
5,30	4,77	0,40	63,24	0,87	11	11	50,00
5,40	4,87	0,42	64,68	0,86	7	11	50,00
5,50	4,95	0,42	65,92	0,86	7	11	50,00
5,60	5,01	0,43	66,88	0,85	7	7	49,99
5,70	5,05	0,44	67,44	0,85	7	7	50,00
5,80	5,07	0,45	67,62	0,84	7	7	50,01
5,90	5,09	0,46	67,46	0,84	7	7	50,00
6,00	5,09	0,47	66,91	0,83	7	7	50,00
6,10	5,09	0,49	66,18	0,83	7	7	50,02
6,20	5,09	0,50	65,28	0,82	7	7	50,00
6,30	5,11	0,52	64,44	0,81	7	7	50,00
6,40	5,15	0,55	63,62	0,81	7	7	50,00
6,50	5,22	0,58	62,85	0,80	7	7	49,99
6,60	5,33	0,62	62,35	0,80	7	7	50,00
6,70	5,48	0,66	62,32	0,79	7	7	50,01

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF	f_1 (Hz)
6,80	5,68	0,70	62,93	0,79	7	7	50,00
6,90	5,93	0,75	64,01	0,78	7	7	50,00
7,00	6,21	0,81	65,29	0,77	7	7	50,02
7,10	6,55	0,87	66,75	0,77	7	7	50,00
7,20	6,93	0,93	68,19	0,76	7	7	50,00
7,30	7,34	1,00	69,70	0,76	5	7	50,00
7,40	7,80	1,07	71,26	0,75	5	7	49,99
7,50	8,27	1,15	72,70	0,74	5	7	50,00
7,60	8,78	1,22	74,54	0,74	5	5	50,01
7,70	9,34	1,30	77,80	0,73	5	5	50,00
7,80	9,91	1,38	82,77	0,73	5	5	50,00
7,90	10,48	1,46	89,05	0,72	5	5	50,02
8,00	11,07	1,55	95,65	0,71	5	5	50,00
8,10	11,62	1,63	101,18	0,71	5	5	50,00
8,20	12,15	1,72	105,31	0,70	5	5	50,00
8,30	12,65	1,80	108,22	0,69	5	5	49,99
8,40	13,12	1,89	110,18	0,69	5	5	50,00
8,50	13,57	1,98	111,78	0,68	5	5	50,01
8,60	14,04	2,07	113,61	0,68	5	5	50,00
8,70	14,50	2,16	115,78	0,67	5	5	50,00
8,80	14,95	2,25	118,29	0,66	5	5	50,02
8,90	15,43	2,35	120,85	0,66	5	5	50,00
9,00	15,91	2,45	122,92	0,65	5	5	50,00
9,10	16,39	2,55	124,57	0,64	5	5	50,00
9,20	16,89	2,66	126,29	0,64	5	5	49,99
9,30	17,37	2,77	128,40	0,63	5	5	50,00
9,40	17,87	2,88	130,84	0,62	5	5	50,01
9,50	18,41	3,00	133,30	0,62	5	5	50,00
9,60	18,93	3,13	135,41	0,61	5	5	50,00
9,70	19,46	3,25	137,62	0,60	5	5	50,02
9,80	20,02	3,39	140,25	0,60	5	5	50,00
9,90	20,59	3,53	142,97	0,59	5	5	50,00
10,00	21,18	3,67	145,46	0,58	5	5	50,00

Tabla A2.1. Valores numéricos de la figura A2.1.

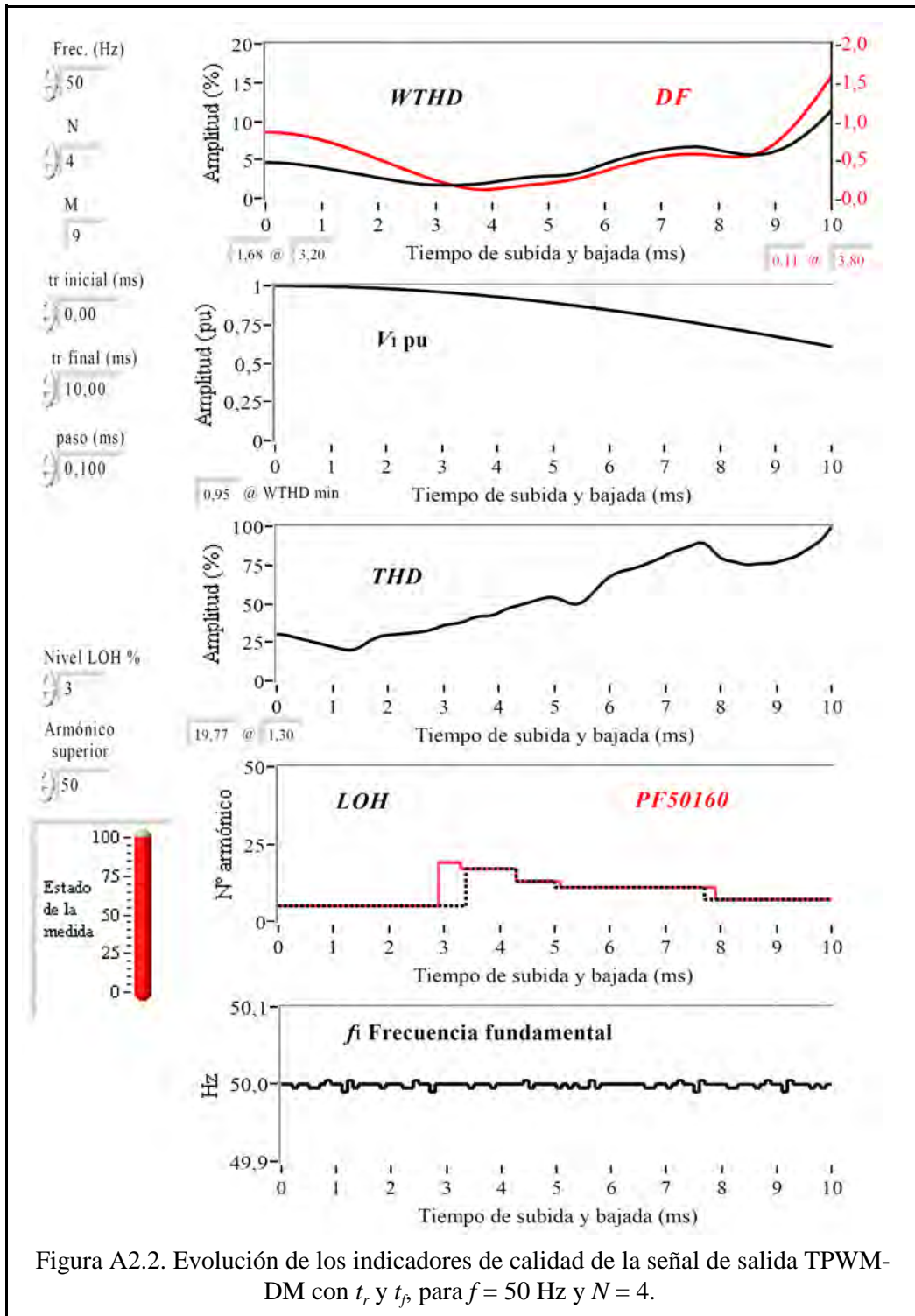


Figura A2.2. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 4$.

$f_s=50\text{Hz}$, $N=4$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	$PF_{50/160}$ (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,78	1,00	5	5	50,00
0,20	4,60	0,85	29,17	1,00	5	5	50,00
0,30	4,56	0,85	28,29	1,00	5	5	50,00
0,40	4,51	0,84	27,41	1,00	5	5	50,00
0,50	4,44	0,83	26,46	1,00	5	5	50,00
0,60	4,36	0,82	25,57	1,00	5	5	50,00
0,70	4,27	0,80	24,64	1,00	5	5	50,00
0,80	4,18	0,79	23,79	1,00	5	5	50,00
0,90	4,07	0,77	22,90	1,00	5	5	50,01
1,00	3,96	0,75	21,98	1,00	5	5	50,00
1,10	3,84	0,73	21,11	0,99	5	5	50,00
1,20	3,70	0,71	20,23	0,99	5	5	49,99
1,30	3,58	0,69	19,77	0,99	5	5	50,01
1,40	3,44	0,66	20,06	0,99	5	5	50,00
1,50	3,31	0,64	21,56	0,99	5	5	50,00
1,60	3,18	0,61	23,83	0,99	5	5	50,00
1,70	3,05	0,59	26,15	0,99	5	5	50,00
1,80	2,92	0,56	27,93	0,99	5	5	50,00
1,90	2,78	0,53	28,96	0,98	5	5	50,00
2,00	2,65	0,50	29,46	0,98	5	5	50,00
2,10	2,52	0,48	29,76	0,98	5	5	50,00
2,20	2,39	0,45	30,08	0,98	5	5	50,00
2,30	2,27	0,42	30,42	0,98	5	5	50,00
2,40	2,15	0,39	30,77	0,97	5	5	50,00
2,50	2,05	0,36	31,13	0,97	5	5	50,01
2,60	1,95	0,34	31,56	0,97	5	5	50,00
2,70	1,87	0,31	32,12	0,97	5	5	50,00
2,80	1,80	0,28	33,05	0,96	5	5	49,99
2,90	1,75	0,26	34,30	0,96	5	5	50,00
3,00	1,71	0,23	35,61	0,96	5	19	50,00
3,10	1,69	0,21	36,43	0,96	5	19	50,00
3,20	1,68	0,19	36,82	0,95	5	19	50,00
3,30	1,68	0,17	37,36	0,95	5	19	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	$PF_{50/160}$ (HO)	f_1 (Hz)
3,40	1,70	0,15	38,59	0,95	5	17	50,00
3,50	1,74	0,14	40,24	0,94	17	17	50,00
3,60	1,78	0,13	41,39	0,94	17	17	50,00
3,70	1,83	0,12	41,77	0,94	17	17	50,00
3,80	1,88	0,11	41,82	0,93	17	17	50,00
3,90	1,97	0,11	42,44	0,93	17	17	50,00
4,00	2,07	0,12	43,89	0,93	17	17	50,00
4,10	2,19	0,12	45,68	0,92	17	17	50,00
4,20	2,30	0,13	47,12	0,92	17	17	50,00
4,30	2,41	0,14	48,15	0,92	17	17	50,00
4,40	2,51	0,15	49,10	0,91	13	13	50,00
4,50	2,60	0,16	50,07	0,91	13	13	50,01
4,60	2,68	0,17	51,19	0,91	13	13	50,00
4,70	2,76	0,17	52,25	0,90	13	13	50,00
4,80	2,81	0,18	53,23	0,90	13	13	50,00
4,90	2,85	0,19	53,90	0,89	13	13	50,00
5,00	2,88	0,20	53,83	0,89	13	13	50,00
5,10	2,91	0,20	52,88	0,88	11	13	50,00
5,20	2,94	0,21	51,22	0,88	11	11	50,00
5,30	2,99	0,22	49,77	0,88	11	11	50,00
5,40	3,09	0,24	49,33	0,87	11	11	50,00
5,50	3,24	0,25	50,50	0,87	11	11	50,00
5,60	3,44	0,27	53,12	0,86	11	11	50,00
5,70	3,67	0,29	56,74	0,86	11	11	50,01
5,80	3,94	0,31	60,67	0,85	11	11	50,00
5,90	4,20	0,33	64,23	0,85	11	11	50,00
6,00	4,46	0,35	67,11	0,84	11	11	50,00
6,10	4,71	0,38	69,17	0,84	11	11	50,00
6,20	4,94	0,40	70,62	0,83	11	11	50,00
6,30	5,16	0,42	71,56	0,83	11	11	50,00
6,40	5,36	0,44	72,39	0,82	11	11	50,00
6,50	5,55	0,46	73,40	0,82	11	11	50,00
6,60	5,72	0,48	74,67	0,81	11	11	50,00
6,70	5,89	0,50	76,13	0,81	11	11	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	$PF_{50/160}$ (HO)	f_1 (Hz)
6,80	6,04	0,51	77,50	0,80	11	11	50,00
6,90	6,18	0,53	79,07	0,80	11	11	50,00
7,00	6,30	0,54	80,83	0,79	11	11	50,00
7,10	6,41	0,55	82,73	0,78	11	11	50,00
7,20	6,49	0,56	84,15	0,78	11	11	50,00
7,30	6,56	0,57	85,17	0,77	11	11	50,01
7,40	6,61	0,57	86,29	0,77	11	11	50,00
7,50	6,64	0,57	87,79	0,76	11	11	50,00
7,60	6,66	0,57	89,23	0,76	11	11	49,99
7,70	6,61	0,57	88,97	0,75	11	11	50,01
7,80	6,53	0,56	86,55	0,74	7	11	50,00
7,90	6,39	0,56	82,66	0,74	7	11	50,00
8,00	6,24	0,55	79,45	0,73	7	7	50,00
8,10	6,10	0,54	77,88	0,73	7	7	50,00
8,20	5,96	0,54	77,27	0,72	7	7	50,00
8,30	5,84	0,53	76,49	0,71	7	7	50,00
8,40	5,73	0,54	75,41	0,71	7	7	50,00
8,50	5,66	0,54	74,97	0,70	7	7	50,00
8,60	5,63	0,56	75,24	0,70	7	7	50,00
8,70	5,65	0,58	75,76	0,69	7	7	50,00
8,80	5,72	0,62	75,84	0,68	7	7	50,00
8,90	5,85	0,66	75,85	0,68	7	7	50,01
9,00	6,05	0,71	76,47	0,67	7	7	50,00
9,10	6,32	0,77	77,52	0,66	7	7	50,00
9,20	6,65	0,84	78,63	0,66	7	7	49,99
9,30	7,05	0,91	79,65	0,65	7	7	50,01
9,40	7,51	0,99	81,22	0,64	7	7	50,00
9,50	8,04	1,08	83,42	0,64	7	7	50,00
9,60	8,60	1,17	85,75	0,63	7	7	50,00
9,70	9,22	1,27	87,95	0,63	7	7	50,00
9,80	9,89	1,37	90,59	0,62	7	7	50,00
9,90	10,61	1,48	94,53	0,61	7	7	50,00
10,00	11,37	1,58	99,50	0,61	7	7	50,00

Tabla A2.2. Valores numéricos de la figura A2.2.

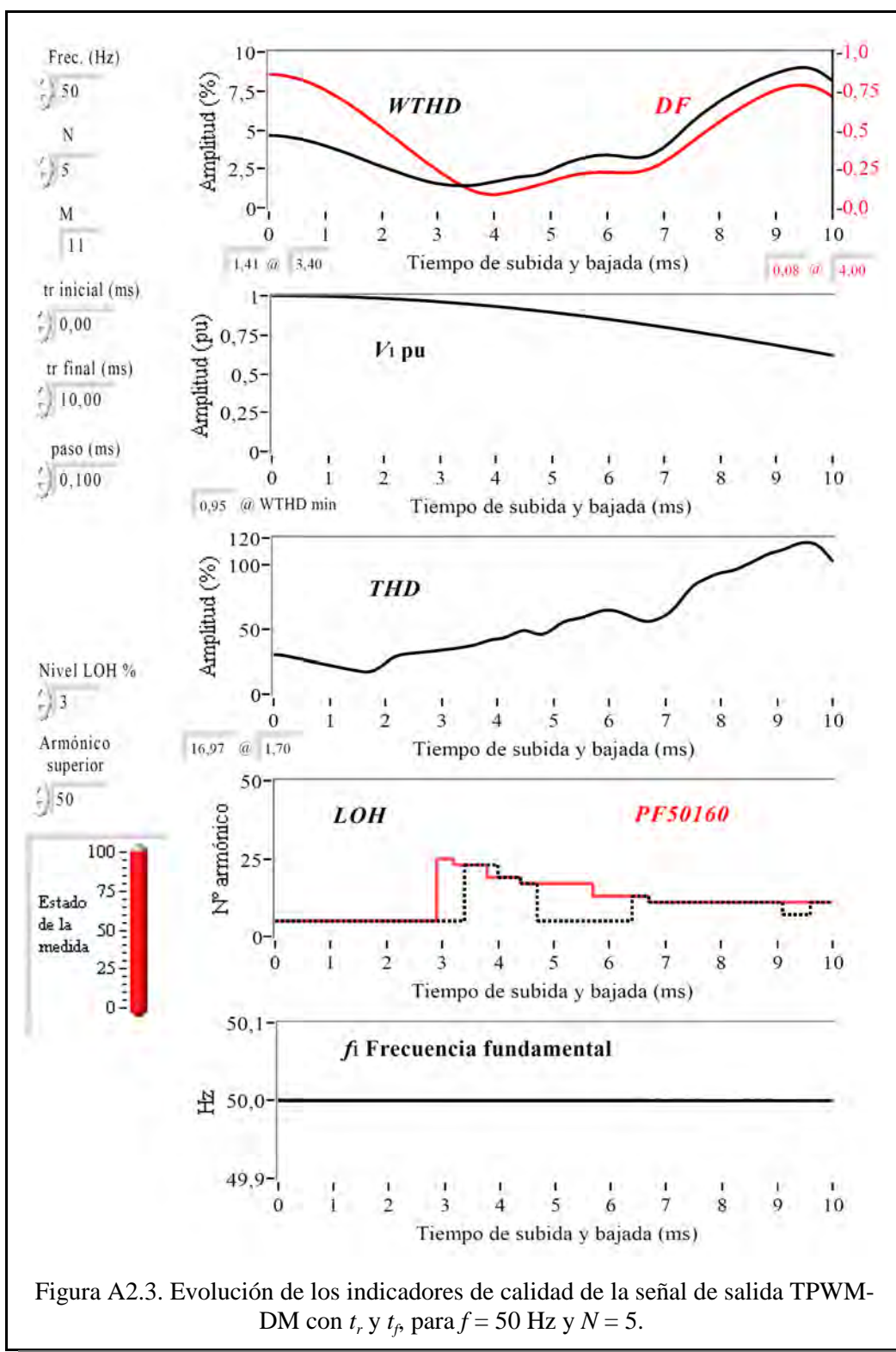


Figura A2.3. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 5$.

$f_s=50\text{Hz}, N=5$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,79	1,00	5	5	50,00
0,20	4,60	0,85	29,17	1,00	5	5	50,00
0,30	4,56	0,85	28,35	1,00	5	5	50,00
0,40	4,51	0,84	27,45	1,00	5	5	50,00
0,50	4,45	0,83	26,56	1,00	5	5	50,00
0,60	4,37	0,82	25,67	1,00	5	5	50,00
0,70	4,28	0,81	24,78	1,00	5	5	50,00
0,80	4,19	0,79	23,90	1,00	5	5	50,00
0,90	4,09	0,77	23,02	1,00	5	5	50,00
1,00	3,98	0,76	22,14	1,00	5	5	50,00
1,10	3,86	0,74	21,27	0,99	5	5	50,00
1,20	3,74	0,72	20,40	0,99	5	5	50,00
1,30	3,61	0,69	19,54	0,99	5	5	50,00
1,40	3,48	0,67	18,68	0,99	5	5	50,00
1,50	3,34	0,65	17,83	0,99	5	5	50,00
1,60	3,20	0,62	17,11	0,99	5	5	50,00
1,70	3,06	0,59	16,97	0,99	5	5	50,00
1,80	2,92	0,57	18,05	0,99	5	5	50,00
1,90	2,78	0,54	20,54	0,98	5	5	50,00
2,00	2,65	0,51	23,78	0,98	5	5	50,00
2,10	2,52	0,48	26,79	0,98	5	5	50,00
2,20	2,39	0,46	28,94	0,98	5	5	50,00
2,30	2,26	0,43	30,15	0,98	5	5	50,00
2,40	2,14	0,40	30,76	0,97	5	5	50,00
2,50	2,02	0,37	31,17	0,97	5	5	50,00
2,60	1,90	0,34	31,57	0,97	5	5	50,00
2,70	1,80	0,32	32,00	0,97	5	5	50,00
2,80	1,70	0,29	32,46	0,97	5	5	50,00
2,90	1,62	0,26	32,95	0,96	5	5	50,00
3,00	1,54	0,24	33,45	0,96	5	25	50,00
3,10	1,49	0,21	33,97	0,96	5	25	50,00
3,20	1,45	0,19	34,52	0,96	5	25	50,00
3,30	1,42	0,17	35,13	0,95	5	23	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
3,40	1,41	0,15	35,75	0,95	5	23	50,00
3,50	1,41	0,13	36,44	0,95	23	23	50,00
3,60	1,43	0,11	37,41	0,94	23	23	50,00
3,70	1,47	0,10	38,78	0,94	23	23	50,00
3,80	1,53	0,09	40,30	0,94	23	23	50,00
3,90	1,59	0,08	41,44	0,93	23	19	50,00
4,00	1,66	0,08	42,06	0,93	23	19	50,00
4,10	1,73	0,09	42,68	0,93	19	19	50,00
4,20	1,81	0,09	44,03	0,92	19	19	50,00
4,30	1,88	0,10	46,10	0,92	19	19	50,00
4,40	1,95	0,11	47,95	0,92	19	19	50,00
4,50	1,99	0,12	48,52	0,91	17	17	50,00
4,60	2,02	0,13	47,61	0,91	17	17	50,00
4,70	2,07	0,14	46,13	0,91	17	17	50,00
4,80	2,14	0,15	45,59	0,90	5	17	50,00
4,90	2,26	0,16	46,95	0,90	5	17	50,00
5,00	2,41	0,17	49,80	0,89	5	17	50,00
5,10	2,58	0,18	52,94	0,89	5	17	50,00
5,20	2,74	0,19	55,35	0,88	5	17	50,00
5,30	2,88	0,20	56,73	0,88	5	17	50,00
5,40	3,01	0,21	57,52	0,88	5	17	50,00
5,50	3,11	0,21	58,39	0,87	5	17	50,00
5,60	3,21	0,22	59,72	0,87	5	17	50,00
5,70	3,28	0,22	61,38	0,86	5	17	50,00
5,80	3,34	0,23	62,93	0,86	5	13	50,00
5,90	3,37	0,23	63,98	0,85	5	13	50,00
6,00	3,38	0,23	64,31	0,85	5	13	50,00
6,10	3,36	0,23	63,85	0,84	5	13	50,00
6,20	3,32	0,22	62,68	0,84	5	13	50,00
6,30	3,27	0,22	61,01	0,83	5	13	50,00
6,40	3,23	0,22	59,13	0,83	5	13	50,00
6,50	3,20	0,23	57,34	0,82	13	13	50,00
6,60	3,22	0,23	55,99	0,82	13	13	50,00
6,70	3,29	0,24	55,51	0,81	13	13	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
6,80	3,42	0,26	56,19	0,81	11	11	50,00
6,90	3,61	0,27	57,84	0,80	11	11	50,00
7,00	3,86	0,29	60,12	0,80	11	11	50,00
7,10	4,14	0,31	63,12	0,79	11	11	50,00
7,20	4,44	0,34	67,31	0,79	11	11	50,00
7,30	4,81	0,37	72,69	0,78	11	11	50,00
7,40	5,15	0,39	78,25	0,78	11	11	50,00
7,50	5,48	0,42	82,74	0,77	11	11	50,00
7,60	5,79	0,45	85,76	0,76	11	11	50,00
7,70	6,07	0,47	87,91	0,76	11	11	50,00
7,80	6,34	0,50	89,90	0,75	11	11	50,00
7,90	6,60	0,53	91,75	0,75	11	11	50,00
8,00	6,84	0,55	93,04	0,74	11	11	50,00
8,10	7,07	0,58	93,79	0,74	11	11	50,00
8,20	7,29	0,60	94,66	0,73	11	11	50,00
8,30	7,49	0,62	96,16	0,72	11	11	50,00
8,40	7,69	0,65	98,13	0,72	11	11	50,00
8,50	7,88	0,67	100,14	0,71	11	11	50,00
8,60	8,06	0,69	102,19	0,71	11	11	50,00
8,70	8,22	0,71	104,44	0,70	11	11	50,00
8,80	8,37	0,73	106,65	0,69	11	11	50,00
8,90	8,51	0,74	108,33	0,69	11	11	50,00
9,00	8,64	0,76	109,46	0,68	11	11	50,00
9,10	8,75	0,77	110,64	0,67	11	11	50,00
9,20	8,86	0,78	112,34	0,67	7	11	50,00
9,30	8,94	0,78	114,26	0,66	7	11	50,00
9,40	8,99	0,79	115,75	0,66	7	11	50,00
9,50	9,00	0,79	116,49	0,65	7	11	50,00
9,60	8,95	0,78	116,39	0,64	7	11	50,00
9,70	8,84	0,77	115,07	0,64	11	11	50,00
9,80	8,66	0,76	111,98	0,63	11	11	50,00
9,90	8,42	0,74	107,29	0,62	11	11	50,00
10,00	8,12	0,71	102,15	0,62	11	11	50,00

Tabla A2.3. Valores numéricos de la figura A2.3.

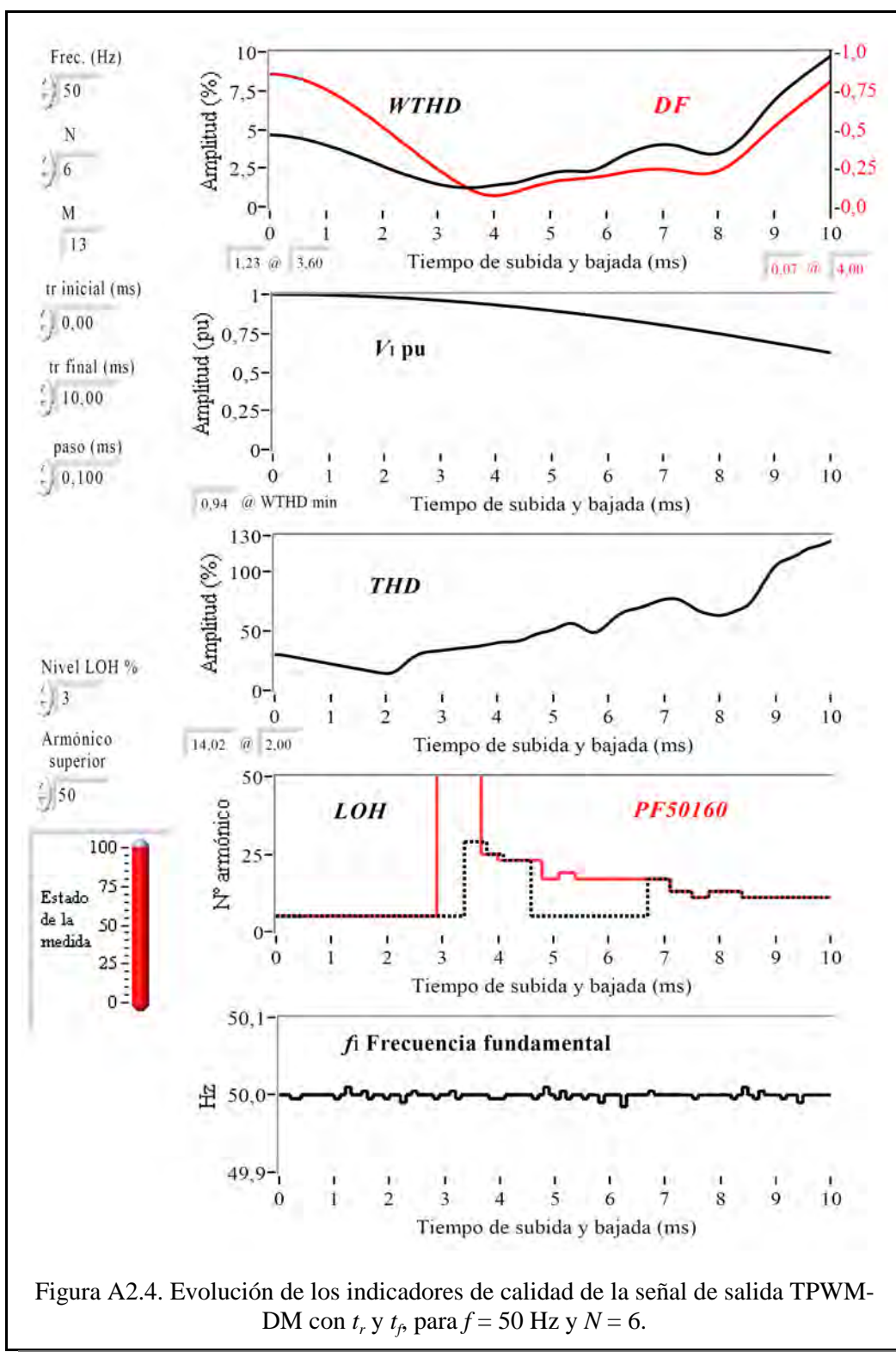


Figura A2.4. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 6$.

$f_s=50\text{Hz}, N=6$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,79	1,00	5	5	50,00
0,20	4,60	0,85	29,19	1,00	5	5	50,00
0,30	4,57	0,85	28,37	1,00	5	5	50,00
0,40	4,51	0,84	27,46	1,00	5	5	50,00
0,50	4,45	0,83	26,59	1,00	5	5	50,00
0,60	4,38	0,82	25,74	1,00	5	5	50,00
0,70	4,29	0,81	24,84	1,00	5	5	50,00
0,80	4,20	0,79	23,97	1,00	5	5	50,00
0,90	4,10	0,78	23,12	1,00	5	5	50,00
1,00	3,99	0,76	22,21	1,00	5	5	50,00
1,10	3,87	0,74	21,35	0,99	5	5	50,00
1,20	3,75	0,72	20,52	0,99	5	5	50,00
1,30	3,63	0,70	19,69	0,99	5	5	50,01
1,40	3,50	0,67	18,80	0,99	5	5	50,00
1,50	3,36	0,65	17,97	0,99	5	5	50,00
1,60	3,23	0,63	17,13	0,99	5	5	50,01
1,70	3,08	0,60	16,27	0,99	5	5	50,00
1,80	2,94	0,57	15,47	0,99	5	5	50,00
1,90	2,79	0,55	14,64	0,98	5	5	50,00
2,00	2,64	0,52	14,02	0,98	5	5	50,00
2,10	2,49	0,49	14,40	0,98	5	5	50,00
2,20	2,35	0,46	16,49	0,98	5	5	50,00
2,30	2,22	0,43	20,30	0,98	5	5	49,99
2,40	2,10	0,41	24,36	0,98	5	5	50,00
2,50	1,98	0,38	27,95	0,97	5	5	50,01
2,60	1,87	0,35	30,42	0,97	5	5	50,00
2,70	1,75	0,32	31,76	0,97	5	5	50,00
2,80	1,65	0,29	32,45	0,97	5	5	50,00
2,90	1,55	0,27	32,93	0,96	5	5	50,00
3,00	1,46	0,24	33,42	0,96	5	60	50,00
3,10	1,39	0,22	33,92	0,96	5	60	50,00
3,20	1,33	0,19	34,47	0,96	5	60	50,01
3,30	1,28	0,17	35,08	0,95	5	60	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF	f_1 (Hz)
3,40	1,25	0,15	35,65	0,95	5	60	50,00
3,50	1,23	0,13	36,16	0,95	29	60	50,00
3,60	1,23	0,11	36,62	0,94	29	60	50,00
3,70	1,25	0,09	37,17	0,94	29	60	50,00
3,80	1,28	0,08	37,93	0,94	29	25	50,00
3,90	1,33	0,07	38,90	0,94	25	25	50,00
4,00	1,38	0,07	39,86	0,93	25	25	50,00
4,10	1,43	0,07	40,49	0,93	25	23	50,00
4,20	1,46	0,08	40,72	0,93	23	23	50,00
4,30	1,50	0,09	40,83	0,92	23	23	50,00
4,40	1,56	0,10	41,40	0,92	23	23	50,00
4,50	1,65	0,11	42,89	0,91	23	23	50,00
4,60	1,75	0,12	45,01	0,91	23	23	50,00
4,70	1,87	0,13	46,99	0,91	5	23	50,00
4,80	1,98	0,14	48,35	0,90	5	23	50,00
4,90	2,07	0,15	49,34	0,90	5	17	50,01
5,00	2,16	0,16	50,68	0,90	5	17	50,00
5,10	2,23	0,16	52,71	0,89	5	17	50,00
5,20	2,28	0,17	54,88	0,89	5	19	50,01
5,30	2,31	0,17	56,18	0,88	5	19	50,00
5,40	2,31	0,18	55,71	0,88	5	19	50,00
5,50	2,29	0,18	53,47	0,87	5	17	50,00
5,60	2,27	0,18	50,63	0,87	5	17	50,00
5,70	2,30	0,19	48,54	0,87	5	17	50,00
5,80	2,38	0,19	48,80	0,86	5	17	50,00
5,90	2,52	0,19	51,64	0,86	5	17	49,99
6,00	2,71	0,20	55,78	0,85	5	17	50,00
6,10	2,91	0,21	60,09	0,85	5	17	50,00
6,20	3,12	0,21	63,65	0,84	5	17	50,00
6,30	3,31	0,22	66,18	0,84	5	17	49,99
6,40	3,47	0,23	67,59	0,83	5	17	50,00
6,50	3,62	0,23	68,58	0,83	5	17	50,00
6,60	3,74	0,24	69,73	0,82	5	17	50,00
6,70	3,84	0,24	71,33	0,82	5	17	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF	f_1 (Hz)
6,80	3,92	0,24	73,25	0,81	17	17	50,01
6,90	3,98	0,24	75,05	0,81	17	17	50,00
7,00	4,01	0,24	76,25	0,80	17	17	50,00
7,10	4,04	0,24	76,96	0,80	17	17	50,00
7,20	3,98	0,24	76,95	0,79	13	13	50,00
7,30	3,91	0,23	75,79	0,79	13	13	50,00
7,40	3,81	0,23	73,31	0,78	13	13	50,00
7,50	3,69	0,22	70,05	0,77	13	13	50,00
7,60	3,57	0,21	67,34	0,77	11	11	50,00
7,70	3,47	0,21	65,28	0,76	11	11	50,00
7,80	3,41	0,21	64,17	0,76	11	11	50,00
7,90	3,39	0,22	63,23	0,75	13	13	50,00
8,00	3,45	0,23	62,77	0,75	13	13	50,00
8,10	3,57	0,25	63,34	0,74	13	13	50,00
8,20	3,77	0,27	64,91	0,73	13	13	50,00
8,30	4,04	0,29	66,66	0,73	13	13	50,00
8,40	4,36	0,32	68,44	0,72	13	13	50,00
8,50	4,73	0,35	70,96	0,72	11	11	50,01
8,60	5,16	0,39	75,76	0,71	11	11	50,00
8,70	5,60	0,42	82,57	0,70	11	11	50,00
8,80	6,06	0,45	90,62	0,70	11	11	50,01
8,90	6,49	0,49	98,21	0,69	11	11	50,00
9,00	6,88	0,52	104,12	0,69	11	11	50,00
9,10	7,23	0,55	107,82	0,68	11	11	50,00
9,20	7,54	0,58	109,73	0,67	11	11	50,00
9,30	7,84	0,61	111,37	0,67	11	11	50,00
9,40	8,12	0,64	113,65	0,66	11	11	50,00
9,50	8,41	0,67	116,54	0,65	11	11	49,99
9,60	8,68	0,69	118,95	0,65	11	11	50,00
9,70	8,94	0,72	120,38	0,64	11	11	50,00
9,80	9,20	0,75	121,50	0,64	11	11	50,00
9,90	9,46	0,78	123,19	0,63	11	11	50,00
10,00	9,72	0,81	125,28	0,62	11	11	50,00

Tabla A2.4. Valores numéricos de la figura A2.4.

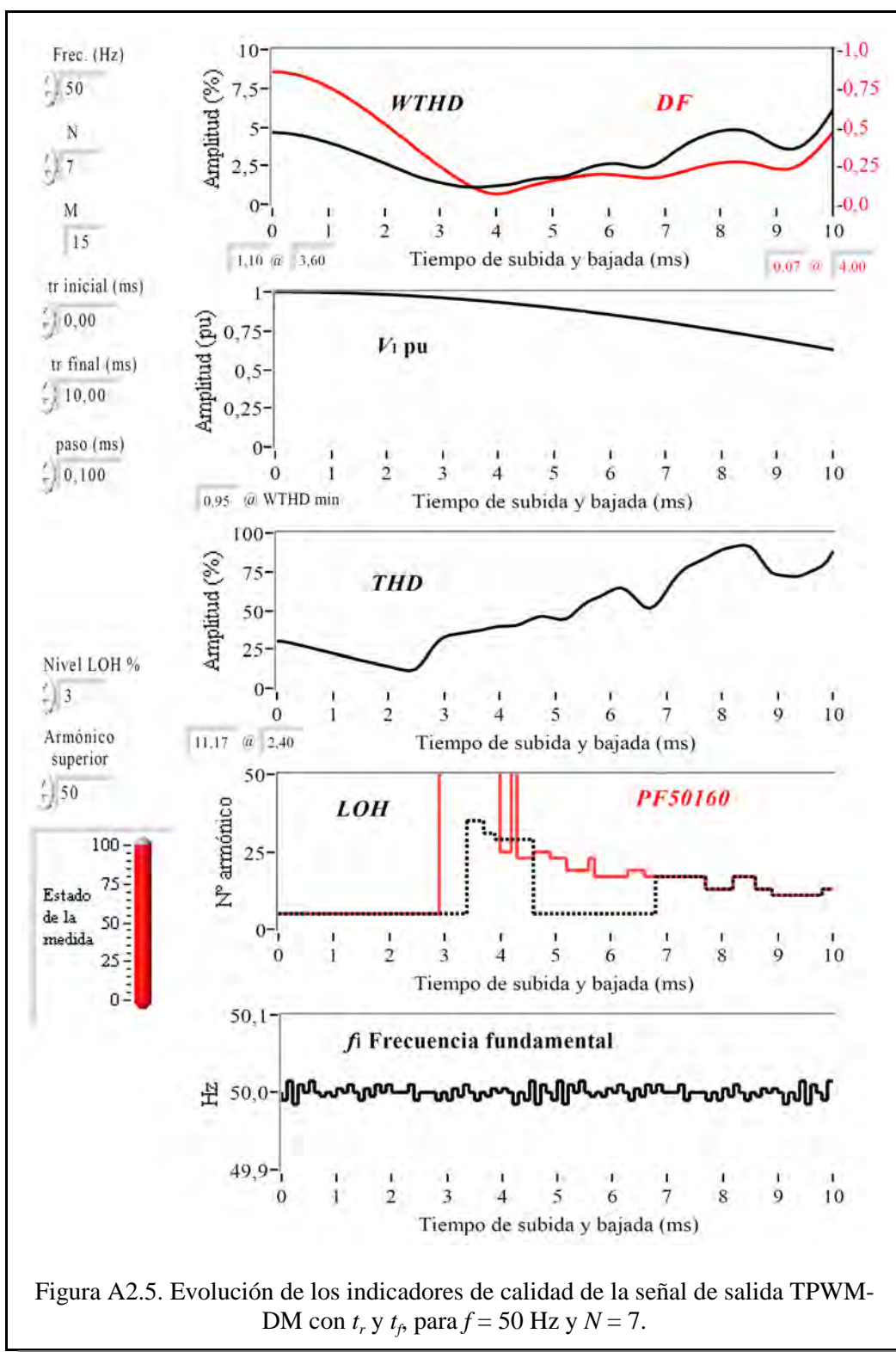


Figura A2.5. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 7$.

$f_s=50\text{Hz}, N=7$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,77	1,00	5	5	49,99
0,20	4,61	0,85	29,23	1,00	5	5	50,02
0,30	4,57	0,85	28,37	1,00	5	5	49,99
0,40	4,52	0,84	27,57	1,00	5	5	50,01
0,50	4,45	0,83	26,62	1,00	5	5	50,00
0,60	4,38	0,82	25,81	1,00	5	5	50,02
0,70	4,30	0,81	24,88	1,00	5	5	50,00
0,80	4,21	0,79	24,03	1,00	5	5	50,00
0,90	4,10	0,78	23,14	1,00	5	5	50,00
1,00	4,00	0,76	22,28	1,00	5	5	50,00
1,10	3,88	0,74	21,44	0,99	5	5	50,01
1,20	3,76	0,72	20,59	0,99	5	5	50,00
1,30	3,64	0,70	19,73	0,99	5	5	50,01
1,40	3,51	0,68	18,88	0,99	5	5	50,00
1,50	3,37	0,65	17,99	0,99	5	5	49,99
1,60	3,24	0,63	17,21	0,99	5	5	50,01
1,70	3,09	0,60	16,35	0,99	5	5	50,00
1,80	2,96	0,58	15,56	0,99	5	5	50,01
1,90	2,80	0,55	14,69	0,98	5	5	50,00
2,00	2,66	0,52	13,92	0,98	5	5	50,01
2,10	2,51	0,49	13,09	0,98	5	5	50,00
2,20	2,36	0,47	12,30	0,98	5	5	50,00
2,30	2,22	0,44	11,51	0,98	5	5	50,00
2,40	2,07	0,41	11,17	0,98	5	5	50,01
2,50	1,92	0,38	12,19	0,97	5	5	49,99
2,60	1,79	0,35	15,63	0,97	5	5	50,00
2,70	1,67	0,32	20,40	0,97	5	5	50,00
2,80	1,57	0,30	25,57	0,97	5	5	50,00
2,90	1,48	0,27	29,76	0,96	5	5	49,99
3,00	1,40	0,24	32,35	0,96	5	60	50,00
3,10	1,32	0,22	33,77	0,96	5	60	49,99
3,20	1,25	0,19	34,45	0,96	5	60	50,01
3,30	1,19	0,17	35,01	0,95	5	60	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
3,40	1,14	0,15	35,57	0,95	5	60	50,01
3,50	1,11	0,13	36,13	0,95	35	60	50,00
3,60	1,10	0,11	36,64	0,95	35	60	49,99
3,70	1,11	0,09	37,27	0,94	35	60	50,00
3,80	1,13	0,08	38,14	0,94	31	60	50,00
3,90	1,16	0,07	38,95	0,94	31	60	50,01
4,00	1,19	0,07	39,51	0,93	29	60	50,00
4,10	1,22	0,07	39,68	0,93	29	25	50,01
4,20	1,26	0,08	39,71	0,93	29	25	50,00
4,30	1,33	0,09	40,15	0,92	29	60	49,99
4,40	1,40	0,10	41,18	0,92	29	23	50,00
4,50	1,50	0,11	42,87	0,92	29	23	49,99
4,60	1,58	0,12	44,45	0,91	29	23	50,02
4,70	1,65	0,13	45,67	0,91	5	25	49,99
4,80	1,69	0,14	45,99	0,90	5	25	50,01
4,90	1,71	0,14	45,51	0,90	5	25	50,00
5,00	1,72	0,15	44,55	0,90	5	23	49,99
5,10	1,74	0,16	43,88	0,89	5	23	50,02
5,20	1,80	0,16	44,39	0,89	5	23	49,99
5,30	1,89	0,17	46,44	0,88	5	19	50,01
5,40	2,03	0,18	49,76	0,88	5	19	50,00
5,50	2,17	0,18	52,92	0,88	5	19	50,02
5,60	2,31	0,19	55,51	0,87	5	19	50,00
5,70	2,42	0,19	57,19	0,87	5	23	50,00
5,80	2,51	0,19	58,71	0,86	5	17	50,00
5,90	2,58	0,20	60,48	0,86	5	17	50,00
6,00	2,62	0,19	62,42	0,85	5	17	50,01
6,10	2,63	0,19	63,97	0,85	5	17	50,00
6,20	2,60	0,19	64,31	0,84	5	17	50,01
6,30	2,54	0,18	62,68	0,84	5	17	50,00
6,40	2,47	0,18	59,37	0,83	5	19	49,99
6,50	2,40	0,17	55,49	0,83	5	19	50,01
6,60	2,36	0,17	52,24	0,82	5	19	50,00
6,70	2,40	0,17	51,15	0,82	5	17	50,01

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
6,80	2,51	0,17	52,87	0,81	5	17	50,00
6,90	2,69	0,17	56,76	0,81	17	17	50,01
7,00	2,94	0,18	62,14	0,80	17	17	50,00
7,10	3,20	0,19	67,63	0,80	17	17	50,00
7,20	3,45	0,20	72,22	0,79	17	17	50,00
7,30	3,69	0,21	75,74	0,79	17	17	50,01
7,40	3,91	0,22	78,26	0,78	17	17	49,99
7,50	4,11	0,23	80,04	0,78	17	17	50,00
7,60	4,28	0,24	81,65	0,77	17	17	50,00
7,70	4,43	0,25	83,38	0,77	17	17	50,00
7,80	4,56	0,26	85,37	0,76	13	13	49,99
7,90	4,66	0,26	87,29	0,75	13	13	50,00
8,00	4,74	0,27	89,01	0,75	13	13	49,99
8,10	4,79	0,27	90,12	0,74	13	13	50,01
8,20	4,81	0,27	90,95	0,74	13	13	50,00
8,30	4,82	0,27	91,64	0,73	17	17	50,01
8,40	4,78	0,27	92,06	0,73	17	17	50,00
8,50	4,70	0,27	91,18	0,72	17	17	49,99
8,60	4,56	0,26	88,27	0,71	17	17	50,00
8,70	4,37	0,25	83,13	0,71	13	13	50,00
8,80	4,15	0,24	77,92	0,70	13	13	50,01
8,90	3,93	0,23	74,04	0,70	13	13	50,00
9,00	3,76	0,23	72,79	0,69	11	11	50,01
9,10	3,62	0,22	72,33	0,68	11	11	50,00
9,20	3,56	0,23	71,95	0,68	11	11	49,99
9,30	3,58	0,24	71,59	0,67	11	11	50,00
9,40	3,69	0,25	72,06	0,66	11	11	49,99
9,50	3,90	0,28	73,32	0,66	11	11	50,02
9,60	4,20	0,31	75,03	0,65	11	11	49,99
9,70	4,57	0,34	76,43	0,65	11	11	50,01
9,80	5,03	0,38	78,39	0,64	11	11	50,00
9,90	5,55	0,42	81,83	0,63	13	13	49,99
10,00	6,10	0,46	87,73	0,63	13	13	50,02

Tabla A2.5. Valores numéricos de la figura A2.5.

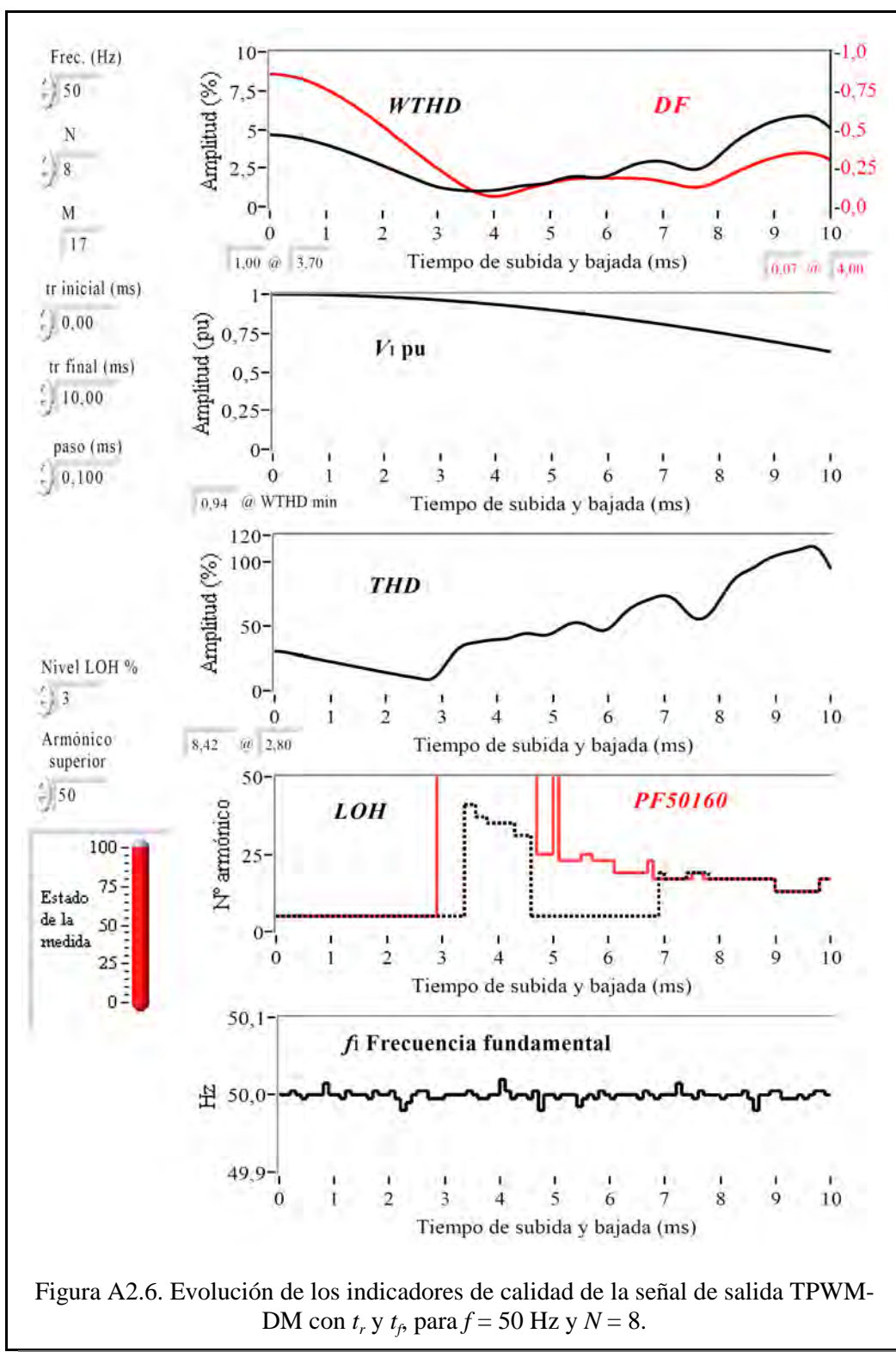


Figura A2.6. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 8$.

$f_s=50\text{Hz}$, $N=8$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,80	1,00	5	5	50,00
0,20	4,60	0,85	29,19	1,00	5	5	50,00
0,30	4,57	0,85	28,43	1,00	5	5	50,01
0,40	4,52	0,84	27,53	1,00	5	5	50,00
0,50	4,45	0,83	26,62	1,00	5	5	50,00
0,60	4,38	0,82	25,79	1,00	5	5	50,00
0,70	4,30	0,81	24,93	1,00	5	5	50,00
0,80	4,21	0,79	24,07	1,00	5	5	50,00
0,90	4,11	0,78	23,19	1,00	5	5	50,02
1,00	4,00	0,76	22,32	1,00	5	5	50,00
1,10	3,89	0,74	21,47	0,99	5	5	50,00
1,20	3,77	0,72	20,60	0,99	5	5	50,00
1,30	3,65	0,70	19,79	0,99	5	5	50,01
1,40	3,51	0,68	18,91	0,99	5	5	50,00
1,50	3,38	0,65	18,08	0,99	5	5	50,00
1,60	3,25	0,63	17,27	0,99	5	5	50,00
1,70	3,10	0,60	16,40	0,99	5	5	50,00
1,80	2,97	0,58	15,62	0,99	5	5	50,01
1,90	2,81	0,55	14,76	0,98	5	5	50,00
2,00	2,67	0,52	13,93	0,98	5	5	50,00
2,10	2,52	0,50	13,15	0,98	5	5	50,01
2,20	2,37	0,47	12,31	0,98	5	5	50,00
2,30	2,22	0,44	11,50	0,98	5	5	49,98
2,40	2,07	0,41	10,73	0,98	5	5	49,99
2,50	1,92	0,38	9,97	0,97	5	5	50,00
2,60	1,78	0,35	9,27	0,97	5	5	50,01
2,70	1,64	0,33	8,50	0,97	5	5	50,01
2,80	1,50	0,30	8,42	0,97	5	5	50,00
2,90	1,37	0,27	10,69	0,96	5	5	50,00
3,00	1,26	0,24	15,49	0,96	5	60	50,00
3,10	1,18	0,22	21,56	0,96	5	60	50,00
3,20	1,13	0,19	27,37	0,96	5	60	50,00
3,30	1,09	0,17	31,91	0,95	5	60	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
3,40	1,06	0,15	34,70	0,95	5	60	50,00
3,50	1,03	0,13	35,97	0,95	41	60	50,01
3,60	1,01	0,11	36,61	0,95	41	60	50,00
3,70	1,00	0,09	37,36	0,94	37	60	50,00
3,80	1,01	0,08	38,17	0,94	37	60	50,00
3,90	1,03	0,07	38,75	0,94	35	60	50,00
4,00	1,06	0,07	39,01	0,93	35	60	50,00
4,10	1,09	0,07	39,20	0,93	35	60	50,02
4,20	1,15	0,07	39,91	0,93	35	60	50,01
4,30	1,22	0,08	41,27	0,92	35	60	50,00
4,40	1,29	0,10	42,76	0,92	31	60	50,00
4,50	1,34	0,11	43,66	0,92	31	60	50,00
4,60	1,38	0,12	43,73	0,91	31	60	50,00
4,70	1,40	0,13	42,98	0,91	5	60	50,01
4,80	1,44	0,14	42,32	0,90	5	25	49,98
4,90	1,50	0,15	42,49	0,90	5	25	50,00
5,00	1,58	0,15	43,87	0,90	5	25	50,00
5,10	1,69	0,16	46,34	0,89	5	60	50,00
5,20	1,80	0,17	49,01	0,89	5	23	50,00
5,30	1,89	0,17	51,14	0,89	5	23	50,00
5,40	1,94	0,18	52,18	0,88	5	23	50,00
5,50	1,95	0,18	51,90	0,88	5	23	49,99
5,60	1,93	0,18	50,60	0,87	5	25	50,00
5,70	1,90	0,18	48,54	0,87	5	25	50,00
5,80	1,87	0,18	46,60	0,86	5	23	50,00
5,90	1,88	0,18	45,76	0,86	5	23	50,01
6,00	1,94	0,18	47,06	0,85	5	23	50,00
6,10	2,07	0,18	50,49	0,85	5	23	50,00
6,20	2,24	0,19	55,17	0,85	5	19	50,00
6,30	2,41	0,18	59,71	0,84	5	19	50,00
6,40	2,57	0,18	63,33	0,84	5	19	50,00
6,50	2,71	0,18	65,92	0,83	5	19	50,00
6,60	2,82	0,18	67,89	0,83	5	19	50,00
6,70	2,90	0,18	69,50	0,82	5	19	50,01

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
6,80	2,94	0,18	71,12	0,82	5	23	50,00
6,90	2,95	0,17	72,58	0,81	5	17	50,00
7,00	2,92	0,16	73,20	0,81	19	17	50,00
7,10	2,85	0,16	72,48	0,80	17	17	50,00
7,20	2,75	0,15	69,91	0,80	17	17	50,00
7,30	2,62	0,14	65,78	0,79	17	17	50,02
7,40	2,49	0,13	60,86	0,78	17	17	50,00
7,50	2,41	0,13	56,79	0,78	19	17	50,00
7,60	2,40	0,12	54,90	0,77	19	19	50,00
7,70	2,49	0,13	55,28	0,77	19	19	50,01
7,80	2,67	0,14	58,07	0,76	19	17	50,00
7,90	2,92	0,15	62,76	0,76	17	17	50,00
8,00	3,23	0,17	69,21	0,75	17	17	50,00
8,10	3,56	0,18	76,12	0,74	17	17	50,00
8,20	3,89	0,20	82,43	0,74	17	17	50,00
8,30	4,19	0,22	87,10	0,73	17	17	50,00
8,40	4,45	0,24	90,15	0,73	17	17	50,00
8,50	4,67	0,25	92,26	0,72	17	17	50,01
8,60	4,89	0,27	94,44	0,72	17	17	50,00
8,70	5,08	0,28	97,01	0,71	17	17	49,98
8,80	5,26	0,30	99,75	0,70	17	17	50,00
8,90	5,42	0,31	102,21	0,70	17	17	50,00
9,00	5,54	0,32	103,92	0,69	17	17	50,01
9,10	5,64	0,33	105,29	0,69	13	13	50,01
9,20	5,73	0,34	106,49	0,68	13	13	50,00
9,30	5,80	0,34	107,40	0,67	13	13	50,00
9,40	5,84	0,35	108,38	0,67	13	13	50,00
9,50	5,86	0,35	109,59	0,66	13	13	50,00
9,60	5,86	0,35	111,15	0,65	13	13	50,00
9,70	5,78	0,34	111,26	0,65	13	13	50,00
9,80	5,63	0,33	108,54	0,64	13	13	50,01
9,90	5,38	0,32	102,36	0,64	17	17	50,01
10,00	5,05	0,30	94,17	0,63	17	17	50,00

Tabla A2.6. Valores numéricos de la figura A2.6.

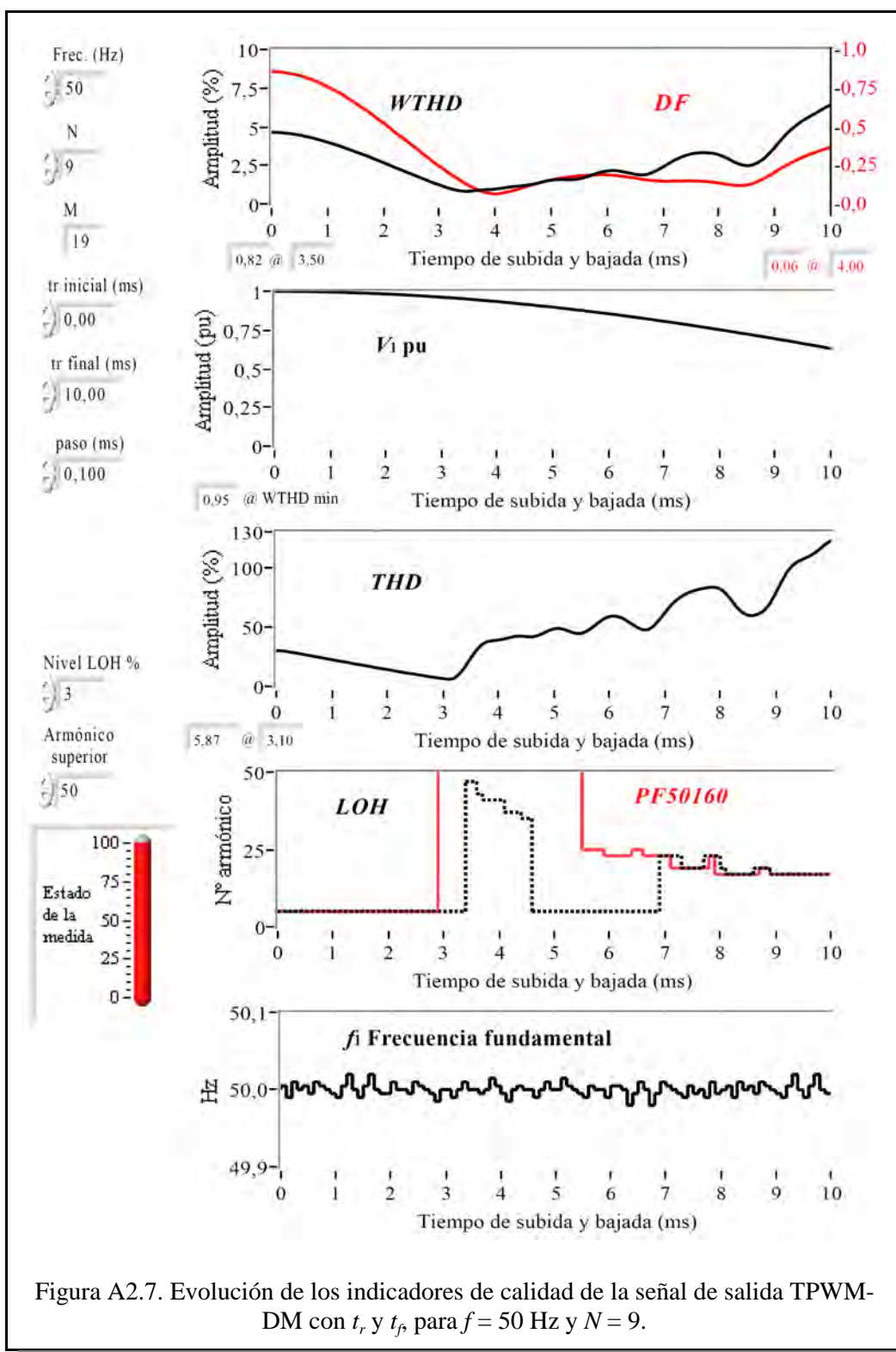


Figura A2.7. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 9$.

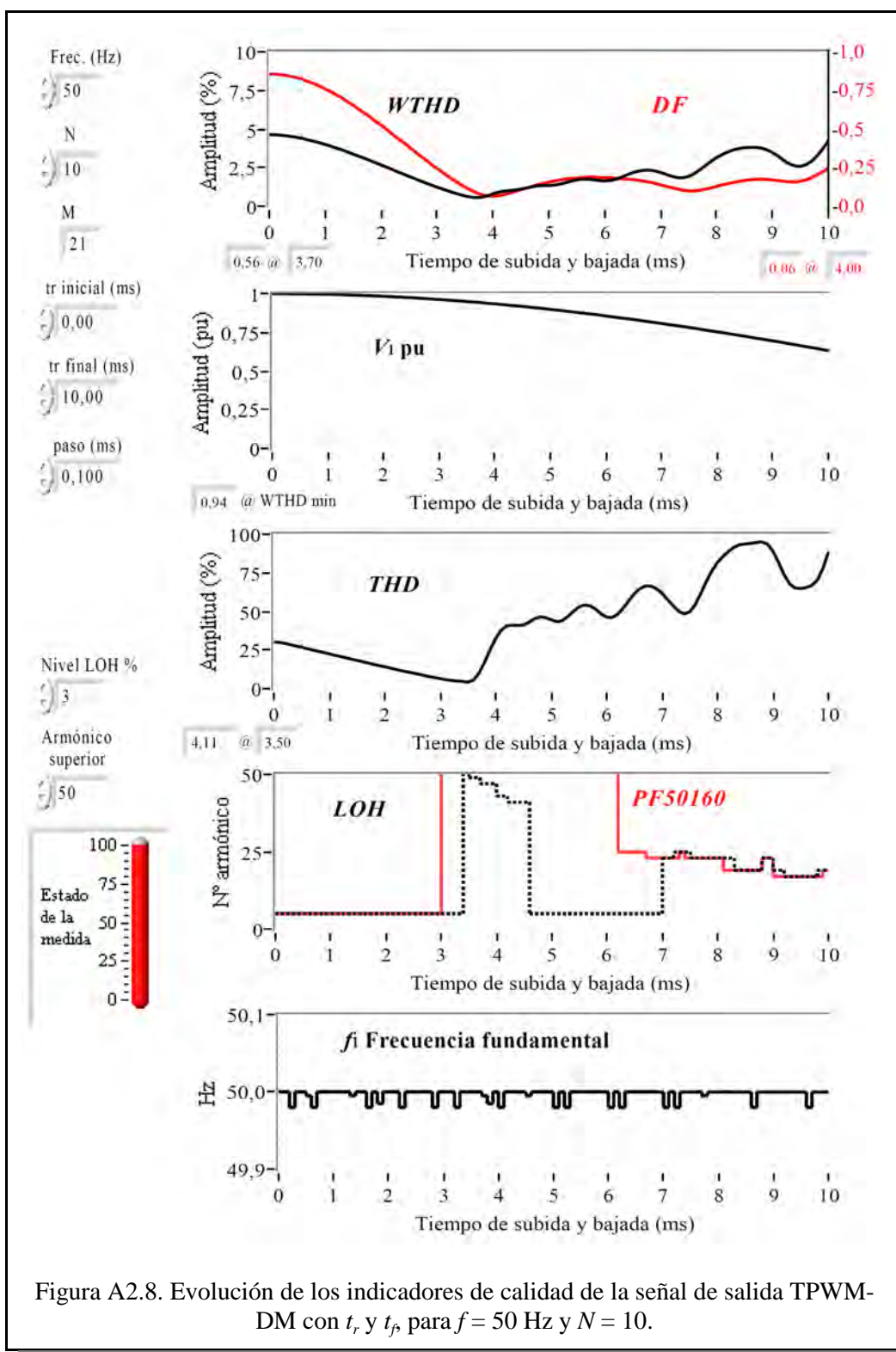
$f_s=50\text{Hz}, N=9$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
0.00	4.64	0.86	30.01	1.00	5	5	50.00
0.10	4.63	0.86	29.80	1.00	5	5	50.01
0.20	4.61	0.85	29.20	1.00	5	5	49.99
0.30	4.57	0.85	28.43	1.00	5	5	50.01
0.40	4.52	0.84	27.58	1.00	5	5	50.00
0.50	4.46	0.83	26.65	1.00	5	5	50.01
0.60	4.38	0.82	25.77	1.00	5	5	50.00
0.70	4.30	0.81	24.96	1.00	5	5	50.01
0.80	4.21	0.79	24.06	1.00	5	5	50.01
0.90	4.11	0.78	23.18	1.00	5	5	50.00
1.00	4.00	0.76	22.34	1.00	5	5	50.00
1.10	3.89	0.74	21.47	0.99	5	5	49.99
1.20	3.78	0.72	20.67	0.99	5	5	50.01
1.30	3.65	0.70	19.83	0.99	5	5	50.02
1.40	3.52	0.68	18.96	0.99	5	5	50.00
1.50	3.38	0.65	18.08	0.99	5	5	49.99
1.60	3.25	0.63	17.27	0.99	5	5	50.01
1.70	3.12	0.61	16.53	0.99	5	5	50.02
1.80	2.97	0.58	15.62	0.99	5	5	50.00
1.90	2.82	0.55	14.80	0.98	5	5	50.00
2.00	2.68	0.52	14.00	0.98	5	5	50.00
2.10	2.53	0.50	13.19	0.98	5	5	50.01
2.20	2.38	0.47	12.35	0.98	5	5	50.00
2.30	2.23	0.44	11.58	0.98	5	5	50.00
2.40	2.08	0.41	10.78	0.98	5	5	50.00
2.50	1.94	0.38	10.02	0.97	5	5	50.01
2.60	1.80	0.36	9.28	0.97	5	5	50.00
2.70	1.65	0.33	8.49	0.97	5	5	50.00
2.80	1.50	0.30	7.77	0.97	5	5	50.00
2.90	1.36	0.27	7.11	0.96	5	5	49.99
3.00	1.23	0.24	6.52	0.96	5	60	50.00
3.10	1.11	0.22	5.87	0.96	5	60	50.00
3.20	0.98	0.19	6.34	0.96	5	60	49.99
3.30	0.89	0.17	10.00	0.95	5	60	50.00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
3.40	0.83	0.15	15.72	0.95	5	60	50.01
3.50	0.82	0.13	23.00	0.95	47	60	50.00
3.60	0.85	0.11	29.67	0.95	47	60	50.00
3.70	0.89	0.09	34.70	0.94	43	60	50.00
3.80	0.92	0.08	37.43	0.94	41	60	50.00
3.90	0.94	0.07	38.34	0.94	41	60	50.02
4.00	0.96	0.06	38.70	0.93	41	60	50.01
4.10	1.01	0.07	39.51	0.93	41	60	50.00
4.20	1.07	0.08	40.88	0.93	37	60	49.99
4.30	1.12	0.08	41.97	0.92	37	60	50.00
4.40	1.16	0.09	42.28	0.92	37	60	50.01
4.50	1.19	0.11	41.80	0.92	35	60	50.00
4.60	1.23	0.12	41.44	0.91	35	60	50.00
4.70	1.30	0.13	42.15	0.91	5	60	49.99
4.80	1.38	0.14	44.06	0.91	5	60	50.01
4.90	1.47	0.15	46.43	0.90	5	60	50.00
5.00	1.54	0.16	48.24	0.90	5	60	50.00
5.10	1.58	0.16	48.63	0.89	5	60	50.00
5.20	1.58	0.17	47.68	0.89	5	60	50.02
5.30	1.58	0.17	45.90	0.89	5	60	50.01
5.40	1.58	0.18	44.41	0.88	5	60	50.00
5.50	1.63	0.18	44.39	0.88	5	60	50.00
5.60	1.71	0.18	46.16	0.87	5	25	49.99
5.70	1.83	0.19	49.34	0.87	5	25	50.01
5.80	1.96	0.19	53.17	0.86	5	25	50.00
5.90	2.07	0.19	56.46	0.86	5	25	50.00
6.00	2.14	0.19	58.55	0.86	5	23	49.99
6.10	2.16	0.19	59.15	0.85	5	23	50.01
6.20	2.14	0.18	58.16	0.85	5	23	50.01
6.30	2.08	0.18	55.83	0.84	5	23	50.00
6.40	2.00	0.17	52.85	0.84	5	23	49.98
6.50	1.92	0.17	49.70	0.83	5	25	50.00
6.60	1.88	0.16	47.61	0.83	5	25	50.01
6.70	1.91	0.16	47.47	0.82	5	23	50.00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
6.80	2.01	0.15	50.23	0.82	5	23	49.98
6.90	2.19	0.15	55.42	0.81	5	23	50.00
7.00	2.39	0.15	61.36	0.81	23	23	50.01
7.10	2.61	0.15	67.16	0.80	23	23	50.00
7.20	2.82	0.15	71.84	0.80	23	19	50.00
7.30	3.00	0.15	75.29	0.79	23	19	50.00
7.40	3.14	0.15	77.98	0.79	19	19	49.99
7.50	3.23	0.15	79.89	0.78	19	19	50.01
7.60	3.30	0.15	81.27	0.77	19	19	50.00
7.70	3.33	0.15	82.32	0.77	19	19	50.00
7.80	3.31	0.14	82.99	0.76	23	19	49.99
7.90	3.28	0.14	83.28	0.76	23	23	50.01
8.00	3.19	0.14	82.04	0.75	23	17	50.00
8.10	3.04	0.13	78.44	0.75	19	17	50.00
8.20	2.86	0.12	72.87	0.74	17	17	50.01
8.30	2.67	0.12	66.63	0.73	17	17	49.99
8.40	2.54	0.12	62.29	0.73	17	17	50.01
8.50	2.47	0.12	59.67	0.72	17	17	50.00
8.60	2.52	0.13	59.47	0.72	17	17	50.01
8.70	2.67	0.15	60.70	0.71	19	17	50.00
8.80	2.92	0.16	63.62	0.71	19	19	50.01
8.90	3.27	0.18	69.33	0.70	19	19	50.01
9.00	3.68	0.21	77.61	0.69	17	17	50.00
9.10	4.10	0.23	86.84	0.69	17	17	50.00
9.20	4.51	0.25	95.15	0.68	17	17	49.99
9.30	4.84	0.27	101.00	0.67	17	17	50.01
9.40	5.14	0.29	104.81	0.67	17	17	50.02
9.50	5.39	0.30	107.05	0.66	17	17	50.00
9.60	5.62	0.32	109.01	0.66	17	17	49.99
9.70	5.82	0.33	111.71	0.65	17	17	50.01
9.80	6.03	0.34	115.27	0.64	17	17	50.02
9.90	6.23	0.36	119.27	0.64	17	17	50.00
10.00	6.41	0.37	122.38	0.63	17	17	50.00

Tabla A2.7. Valores numéricos de la figura A2.7.



f=50Hz, N=10

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,81	1,00	5	5	50,00
0,20	4,61	0,85	29,23	1,00	5	5	50,00
0,30	4,57	0,85	28,36	1,00	5	5	49,98
0,40	4,52	0,84	27,54	1,00	5	5	50,00
0,50	4,46	0,83	26,69	1,00	5	5	50,00
0,60	4,38	0,82	25,78	1,00	5	5	50,00
0,70	4,30	0,81	24,89	1,00	5	5	49,98
0,80	4,21	0,79	24,08	1,00	5	5	50,00
0,90	4,11	0,78	23,24	1,00	5	5	50,00
1,00	4,01	0,76	22,39	1,00	5	5	50,00
1,10	3,89	0,74	21,49	0,99	5	5	50,00
1,20	3,78	0,72	20,67	0,99	5	5	50,00
1,30	3,66	0,70	19,85	0,99	5	5	50,00
1,40	3,52	0,68	18,96	0,99	5	5	50,00
1,50	3,39	0,65	18,12	0,99	5	5	50,00
1,60	3,25	0,63	17,31	0,99	5	5	50,00
1,70	3,11	0,60	16,47	0,99	5	5	49,98
1,80	2,98	0,58	15,68	0,99	5	5	50,00
1,90	2,82	0,55	14,80	0,98	5	5	49,99
2,00	2,68	0,53	14,02	0,98	5	5	50,00
2,10	2,54	0,50	13,23	0,98	5	5	50,00
2,20	2,38	0,47	12,38	0,98	5	5	50,00
2,30	2,23	0,44	11,56	0,98	5	5	49,98
2,40	2,09	0,41	10,82	0,98	5	5	50,00
2,50	1,94	0,39	10,06	0,97	5	5	50,00
2,60	1,80	0,36	9,29	0,97	5	5	50,00
2,70	1,65	0,33	8,49	0,97	5	5	50,00
2,80	1,51	0,30	7,78	0,97	5	5	50,00
2,90	1,37	0,27	7,07	0,97	5	5	49,98
3,00	1,24	0,25	6,39	0,96	5	5	50,00
3,10	1,11	0,22	5,75	0,96	5	60	50,00
3,20	0,99	0,19	5,24	0,96	5	60	50,00
3,30	0,87	0,17	4,91	0,95	5	60	49,98

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
3,40	0,77	0,15	4,56	0,95	5	60	50,00
3,50	0,67	0,13	4,11	0,95	60	60	50,00
3,60	0,60	0,11	3,32	0,95	49	60	50,00
3,70	0,56	0,09	2,94	0,94	49	60	50,00
3,80	0,58	0,07	16,84	0,94	47	60	50,00
3,90	0,68	0,07	25,00	0,94	47	60	49,99
4,00	0,80	0,06	32,25	0,93	47	60	50,00
4,10	0,91	0,07	37,82	0,93	43	60	49,98
4,20	0,98	0,08	40,52	0,93	43	60	50,00
4,30	1,01	0,08	41,10	0,92	41	60	50,00
4,40	1,05	0,10	40,75	0,92	41	60	50,00
4,50	1,11	0,11	41,14	0,92	41	60	50,00
4,60	1,18	0,12	42,85	0,91	41	60	50,00
4,70	1,26	0,13	45,04	0,91	5	60	50,00
4,80	1,32	0,14	46,26	0,91	5	60	50,00
4,90	1,34	0,15	45,90	0,90	5	60	50,00
5,00	1,35	0,16	44,46	0,90	5	60	50,00
5,10	1,37	0,16	43,31	0,89	5	60	49,98
5,20	1,43	0,17	43,85	0,89	5	60	50,00
5,30	1,53	0,18	46,45	0,89	5	60	49,98
5,40	1,62	0,18	49,83	0,88	5	60	50,00
5,50	1,71	0,18	52,77	0,88	5	60	50,00
5,60	1,76	0,19	54,12	0,87	5	60	50,00
5,70	1,76	0,19	53,54	0,87	5	60	50,00
5,80	1,72	0,19	51,36	0,87	5	60	50,00
5,90	1,67	0,19	48,47	0,86	5	60	50,00
6,00	1,64	0,19	46,20	0,86	5	60	50,00
6,10	1,67	0,19	45,90	0,85	5	60	49,98
6,20	1,75	0,18	47,95	0,85	5	60	50,00
6,30	1,88	0,18	52,04	0,84	5	25	49,98
6,40	2,03	0,18	56,81	0,84	5	25	50,00
6,50	2,18	0,17	61,28	0,83	5	25	50,00
6,60	2,28	0,17	64,62	0,83	5	25	50,00
6,70	2,34	0,16	66,40	0,82	5	25	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
6,80	2,34	0,16	66,33	0,82	5	23	50,00
6,90	2,28	0,15	64,59	0,81	5	23	50,00
7,00	2,19	0,14	61,53	0,81	5	23	50,00
7,10	2,06	0,13	57,58	0,80	23	23	49,98
7,20	1,94	0,12	53,46	0,80	23	23	50,00
7,30	1,86	0,11	50,05	0,79	25	23	49,98
7,40	1,84	0,10	48,40	0,79	25	25	50,00
7,50	1,92	0,10	49,69	0,78	25	23	50,00
7,60	2,11	0,10	54,46	0,78	23	23	50,00
7,70	2,36	0,10	61,67	0,77	23	23	50,00
7,80	2,64	0,11	69,33	0,76	23	23	50,00
7,90	2,91	0,12	76,28	0,76	23	23	50,00
8,00	3,15	0,13	81,48	0,75	23	23	50,00
8,10	3,35	0,14	85,49	0,75	23	23	50,00
8,20	3,52	0,15	88,85	0,74	23	19	50,00
8,30	3,65	0,15	91,56	0,74	23	19	50,00
8,40	3,74	0,16	93,09	0,73	19	19	50,00
8,50	3,79	0,17	93,60	0,72	19	19	50,00
8,60	3,82	0,17	93,93	0,72	19	19	50,00
8,70	3,82	0,17	94,60	0,71	19	19	49,98
8,80	3,77	0,18	94,90	0,71	19	19	50,00
8,90	3,66	0,17	93,42	0,70	23	23	50,00
9,00	3,48	0,17	88,94	0,69	23	23	50,00
9,10	3,24	0,17	81,75	0,69	19	17	50,00
9,20	2,98	0,16	73,78	0,68	19	17	50,00
9,30	2,75	0,16	67,75	0,68	17	17	50,00
9,40	2,60	0,16	65,03	0,67	17	17	50,00
9,50	2,58	0,16	64,77	0,66	17	17	50,00
9,60	2,69	0,17	65,38	0,66	17	17	50,00
9,70	2,92	0,19	66,63	0,65	17	17	49,98
9,80	3,27	0,20	70,16	0,64	17	17	50,00
9,90	3,72	0,22	77,43	0,64	19	17	50,00
10,00	4,24	0,25	88,08	0,63	19	19	50,00

Tabla A2.8. Valores numéricos de la figura A2.8.

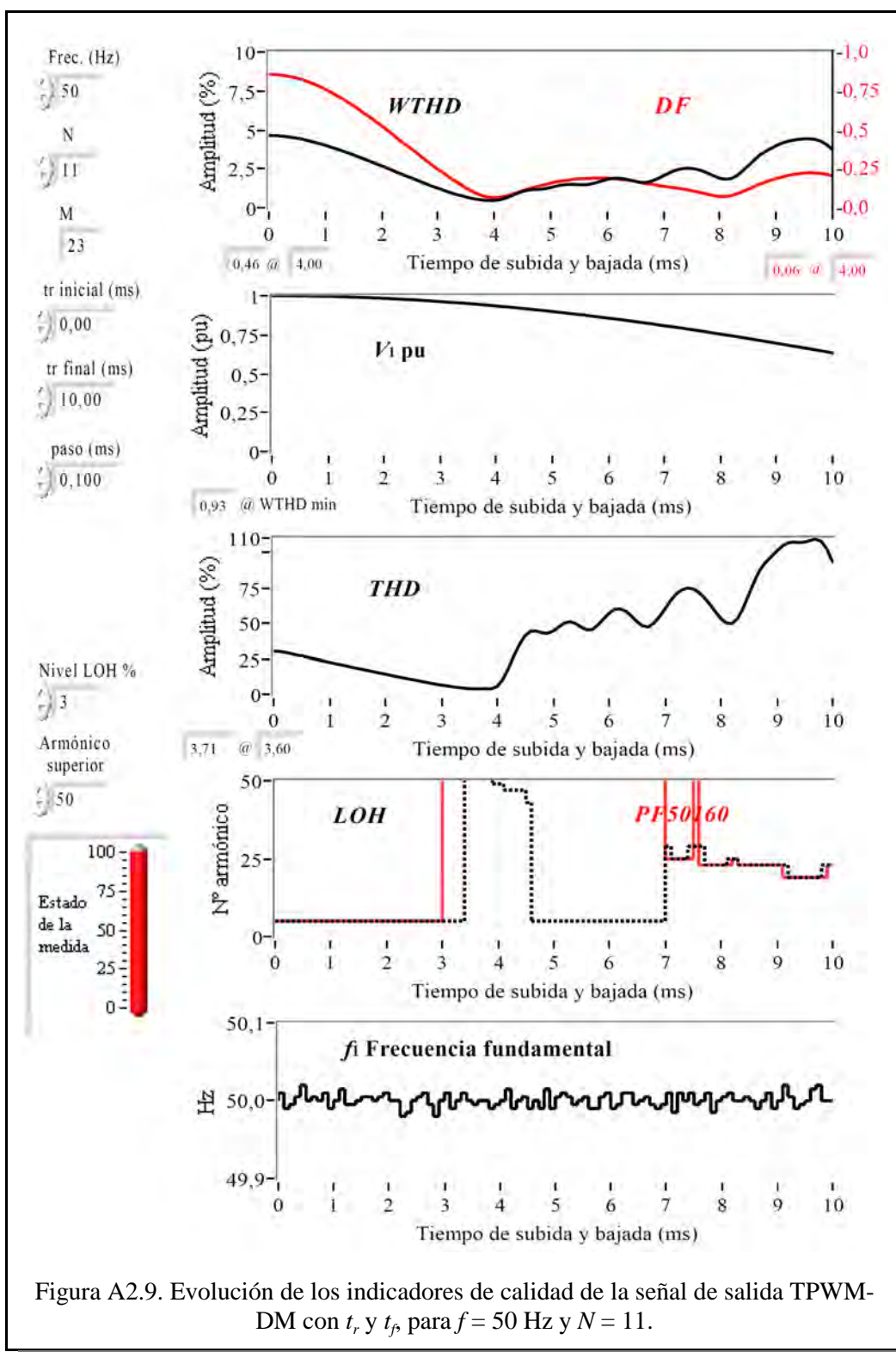


Figura A2.9. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 11$.

$f_s=50\text{Hz}, N=11$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,82	1,00	5	5	50,01
0,20	4,61	0,85	29,22	1,00	5	5	49,99
0,30	4,57	0,85	28,42	1,00	5	5	50,00
0,40	4,52	0,84	27,53	1,00	5	5	50,01
0,50	4,46	0,83	26,74	1,00	5	5	50,02
0,60	4,39	0,82	25,86	1,00	5	5	50,00
0,70	4,30	0,81	24,96	1,00	5	5	50,01
0,80	4,21	0,79	24,08	1,00	5	5	50,00
0,90	4,12	0,78	23,26	1,00	5	5	50,01
1,00	4,01	0,76	22,37	1,00	5	5	49,99
1,10	3,89	0,74	21,52	0,99	5	5	50,00
1,20	3,78	0,72	20,69	0,99	5	5	50,02
1,30	3,65	0,70	19,83	0,99	5	5	50,00
1,40	3,52	0,68	18,99	0,99	5	5	50,00
1,50	3,39	0,66	18,18	0,99	5	5	50,00
1,60	3,26	0,63	17,35	0,99	5	5	50,01
1,70	3,12	0,61	16,49	0,99	5	5	50,01
1,80	2,97	0,58	15,68	0,99	5	5	50,00
1,90	2,83	0,55	14,85	0,98	5	5	50,01
2,00	2,69	0,53	14,07	0,98	5	5	50,01
2,10	2,54	0,50	13,25	0,98	5	5	50,00
2,20	2,39	0,47	12,43	0,98	5	5	50,00
2,30	2,23	0,44	11,57	0,98	5	5	49,98
2,40	2,08	0,41	10,79	0,98	5	5	49,99
2,50	1,95	0,39	10,07	0,97	5	5	50,00
2,60	1,81	0,36	9,34	0,97	5	5	50,01
2,70	1,66	0,33	8,57	0,97	5	5	50,01
2,80	1,51	0,30	7,78	0,97	5	5	50,00
2,90	1,37	0,27	7,08	0,97	5	5	49,98
3,00	1,24	0,25	6,43	0,96	5	5	50,00
3,10	1,12	0,22	5,80	0,96	5	60	50,01
3,20	0,99	0,19	5,19	0,96	5	60	49,99
3,30	0,88	0,17	4,69	0,96	5	60	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
3,40	0,78	0,15	4,29	0,95	5	60	50,01
3,50	0,68	0,13	3,92	0,95	60	60	50,00
3,60	0,59	0,11	3,71	0,95	60	60	50,00
3,70	0,53	0,09	3,78	0,94	60	60	50,00
3,80	0,48	0,08	3,91	0,94	60	60	50,00
3,90	0,46	0,07	3,73	0,94	60	60	49,99
4,00	0,46	0,06	5,27	0,93	49	60	50,00
4,10	0,51	0,07	10,27	0,93	49	60	50,00
4,20	0,60	0,07	17,76	0,93	47	60	50,02
4,30	0,76	0,08	26,78	0,92	47	60	49,99
4,40	0,91	0,10	34,86	0,92	47	60	50,00
4,50	1,04	0,11	40,91	0,92	47	60	50,01
4,60	1,13	0,12	44,11	0,91	43	60	49,99
4,70	1,16	0,13	44,28	0,91	5	60	50,00
4,80	1,18	0,14	43,05	0,91	5	60	49,99
4,90	1,22	0,15	42,47	0,90	5	60	50,02
5,00	1,29	0,16	44,08	0,90	5	60	49,99
5,10	1,38	0,17	47,11	0,89	5	60	50,01
5,20	1,46	0,17	49,77	0,89	5	60	50,01
5,30	1,50	0,18	50,82	0,89	5	60	50,01
5,40	1,50	0,18	49,56	0,88	5	60	50,00
5,50	1,47	0,19	47,01	0,88	5	60	50,00
5,60	1,46	0,19	45,01	0,87	5	60	50,01
5,70	1,50	0,19	45,20	0,87	5	60	49,99
5,80	1,60	0,19	48,27	0,87	5	60	49,99
5,90	1,71	0,19	52,51	0,86	5	60	50,01
6,00	1,81	0,19	56,71	0,86	5	60	50,01
6,10	1,88	0,19	59,48	0,85	5	60	49,99
6,20	1,89	0,18	59,93	0,85	5	60	50,00
6,30	1,86	0,18	58,27	0,84	5	60	50,01
6,40	1,78	0,18	54,86	0,84	5	60	50,01
6,50	1,68	0,17	50,79	0,83	5	60	50,01
6,60	1,62	0,16	47,80	0,83	5	60	50,00
6,70	1,63	0,15	47,13	0,82	5	60	50,01

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
6,80	1,72	0,15	49,55	0,82	5	60	50,00
6,90	1,87	0,14	54,29	0,81	5	60	49,99
7,00	2,05	0,14	59,90	0,81	5	60	50,00
7,10	2,23	0,13	65,58	0,80	29	25	50,01
7,20	2,39	0,13	70,44	0,80	25	25	49,99
7,30	2,49	0,12	73,26	0,79	25	25	50,01
7,40	2,53	0,12	74,49	0,79	25	25	50,00
7,50	2,53	0,11	73,98	0,78	29	25	50,01
7,60	2,46	0,10	71,72	0,78	29	60	50,00
7,70	2,34	0,09	67,99	0,77	29	23	50,00
7,80	2,19	0,08	63,35	0,76	23	23	50,01
7,90	2,02	0,08	57,94	0,76	23	23	49,99
8,00	1,88	0,07	53,05	0,75	23	23	50,00
8,10	1,82	0,07	49,86	0,75	23	23	50,01
8,20	1,87	0,08	49,40	0,74	25	23	50,01
8,30	2,06	0,09	53,10	0,74	25	25	50,00
8,40	2,35	0,10	60,47	0,73	23	23	50,00
8,50	2,68	0,12	69,88	0,72	23	23	50,01
8,60	3,02	0,13	79,39	0,72	23	23	50,00
8,70	3,34	0,15	87,29	0,71	23	23	49,99
8,80	3,59	0,16	92,62	0,71	23	23	50,00
8,90	3,80	0,18	96,71	0,70	23	23	50,01
9,00	3,99	0,19	100,72	0,69	23	23	49,99
9,10	4,14	0,20	104,22	0,69	23	23	50,00
9,20	4,26	0,21	106,54	0,68	23	19	50,02
9,30	4,34	0,21	107,08	0,68	19	19	50,01
9,40	4,39	0,22	106,78	0,67	19	19	49,99
9,50	4,42	0,22	107,07	0,66	19	19	50,00
9,60	4,42	0,22	108,25	0,66	19	19	50,00
9,70	4,38	0,22	109,15	0,65	19	19	50,02
9,80	4,26	0,22	107,44	0,65	19	19	50,02
9,90	4,04	0,21	101,96	0,64	23	19	50,00
10,00	3,72	0,20	92,87	0,63	23	23	50,00

Tabla A2.9. Valores numéricos de la figura A2.9.

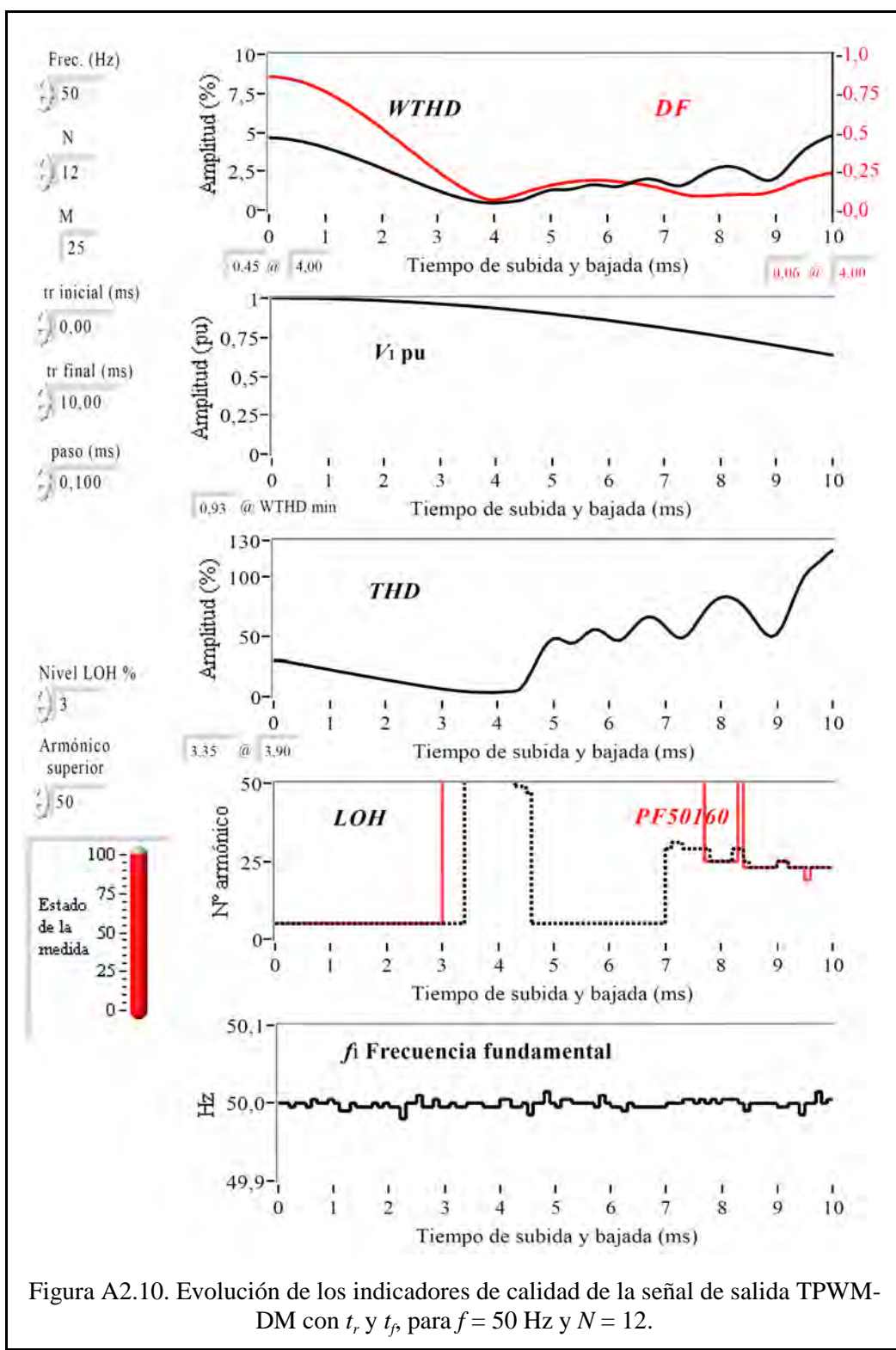


Figura A2.10. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 12$.

$f=50\text{Hz}, N=12$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,81	1,00	5	5	50,00
0,20	4,61	0,85	29,24	1,00	5	5	50,00
0,30	4,57	0,85	28,45	1,00	5	5	50,00
0,40	4,52	0,84	27,55	1,00	5	5	50,00
0,50	4,46	0,83	26,68	1,00	5	5	50,00
0,60	4,39	0,82	25,83	1,00	5	5	50,00
0,70	4,31	0,81	24,99	1,00	5	5	50,01
0,80	4,21	0,79	24,10	1,00	5	5	50,00
0,90	4,12	0,78	23,25	1,00	5	5	50,00
1,00	4,01	0,76	22,42	1,00	5	5	50,01
1,10	3,90	0,74	21,54	0,99	5	5	50,00
1,20	3,78	0,72	20,68	0,99	5	5	49,99
1,30	3,65	0,70	19,80	0,99	5	5	49,99
1,40	3,53	0,68	19,03	0,99	5	5	50,00
1,50	3,40	0,66	18,18	0,99	5	5	50,00
1,60	3,26	0,63	17,33	0,99	5	5	50,00
1,70	3,12	0,61	16,49	0,99	5	5	50,00
1,80	2,98	0,58	15,72	0,99	5	5	50,00
1,90	2,83	0,55	14,88	0,98	5	5	50,00
2,00	2,69	0,53	14,06	0,98	5	5	50,00
2,10	2,54	0,50	13,24	0,98	5	5	50,00
2,20	2,39	0,47	12,44	0,98	5	5	50,00
2,30	2,24	0,44	11,63	0,98	5	5	49,98
2,40	2,10	0,41	10,88	0,98	5	5	50,00
2,50	1,95	0,39	10,11	0,97	5	5	50,00
2,60	1,81	0,36	9,35	0,97	5	5	50,01
2,70	1,66	0,33	8,56	0,97	5	5	50,00
2,80	1,52	0,30	7,82	0,97	5	5	50,00
2,90	1,39	0,28	7,15	0,97	5	5	50,01
3,00	1,25	0,25	6,44	0,96	5	5	50,00
3,10	1,12	0,22	5,79	0,96	5	60	50,00
3,20	0,99	0,20	5,21	0,96	5	60	50,00
3,30	0,88	0,17	4,70	0,96	5	60	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
3,40	0,78	0,15	4,24	0,95	5	60	50,00
3,50	0,68	0,13	3,90	0,95	60	60	50,00
3,60	0,60	0,11	3,67	0,95	60	60	50,00
3,70	0,53	0,09	3,50	0,94	60	60	50,00
3,80	0,49	0,08	3,42	0,94	60	60	50,00
3,90	0,46	0,07	3,35	0,94	60	60	50,00
4,00	0,45	0,06	3,46	0,93	60	60	50,00
4,10	0,47	0,07	3,85	0,93	60	60	50,01
4,20	0,49	0,07	4,05	0,93	60	60	50,01
4,30	0,53	0,09	4,23	0,92	60	60	50,00
4,40	0,58	0,10	5,79	0,92	49	60	50,00
4,50	0,65	0,11	11,13	0,92	49	60	50,00
4,60	0,77	0,12	19,63	0,91	47	60	49,99
4,70	0,92	0,13	28,55	0,91	5	60	50,00
4,80	1,07	0,14	37,42	0,91	5	60	50,00
4,90	1,20	0,15	44,13	0,90	5	60	50,02
5,00	1,28	0,16	47,81	0,90	5	60	50,00
5,10	1,31	0,17	47,99	0,90	5	60	50,00
5,20	1,30	0,17	45,86	0,89	5	60	50,01
5,30	1,31	0,18	44,04	0,89	5	60	50,01
5,40	1,36	0,18	44,62	0,88	5	60	50,00
5,50	1,45	0,19	47,98	0,88	5	60	50,00
5,60	1,54	0,19	52,21	0,87	5	60	50,00
5,70	1,61	0,19	55,10	0,87	5	60	50,00
5,80	1,63	0,19	55,40	0,87	5	60	50,00
5,90	1,59	0,19	53,17	0,86	5	60	50,01
6,00	1,53	0,19	49,51	0,86	5	60	50,00
6,10	1,49	0,19	46,57	0,85	5	60	50,00
6,20	1,50	0,18	46,28	0,85	5	60	50,00
6,30	1,59	0,18	49,47	0,84	5	60	49,99
6,40	1,72	0,18	54,77	0,84	5	60	50,00
6,50	1,85	0,17	60,20	0,83	5	60	50,00
6,60	1,95	0,16	64,36	0,83	5	60	50,00
6,70	2,00	0,16	66,25	0,82	5	60	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
6,80	1,98	0,15	65,57	0,82	5	60	50,00
6,90	1,90	0,14	62,71	0,81	5	60	50,00
7,00	1,78	0,13	58,14	0,81	5	60	50,00
7,10	1,65	0,12	53,15	0,80	29	60	50,00
7,20	1,56	0,11	49,31	0,80	31	60	50,00
7,30	1,56	0,10	48,26	0,79	31	60	50,00
7,40	1,66	0,10	50,83	0,79	29	60	50,01
7,50	1,85	0,09	56,22	0,78	29	60	50,01
7,60	2,08	0,09	63,28	0,78	29	60	50,00
7,70	2,31	0,09	70,06	0,77	29	60	50,01
7,80	2,50	0,09	75,75	0,77	29	25	50,00
7,90	2,65	0,09	79,91	0,76	25	25	50,01
8,00	2,75	0,09	82,33	0,75	25	25	50,00
8,10	2,79	0,10	82,97	0,75	25	25	50,01
8,20	2,78	0,10	81,98	0,74	25	25	50,01
8,30	2,72	0,10	79,62	0,74	29	25	50,01
8,40	2,60	0,10	75,65	0,73	29	60	50,00
8,50	2,44	0,10	70,35	0,72	25	23	49,99
8,60	2,23	0,10	63,83	0,72	23	23	50,00
8,70	2,03	0,10	57,13	0,71	23	23	50,00
8,80	1,90	0,11	51,85	0,71	23	23	50,00
8,90	1,90	0,12	49,52	0,70	23	23	50,00
9,00	2,06	0,13	51,56	0,70	23	23	50,00
9,10	2,35	0,14	58,18	0,69	25	25	50,00
9,20	2,73	0,15	68,45	0,68	25	25	50,00
9,30	3,15	0,17	80,73	0,68	23	23	50,00
9,40	3,53	0,18	91,84	0,67	23	23	50,00
9,50	3,86	0,20	100,35	0,66	23	23	49,99
9,60	4,12	0,21	105,82	0,66	23	19	50,00
9,70	4,33	0,22	109,62	0,65	23	23	50,00
9,80	4,50	0,22	113,49	0,65	23	23	50,02
9,90	4,67	0,23	118,13	0,64	23	23	50,00
10,00	4,81	0,24	121,62	0,63	23	23	50,01

Tabla A2.10. Valores numéricos de la figura A2.10.

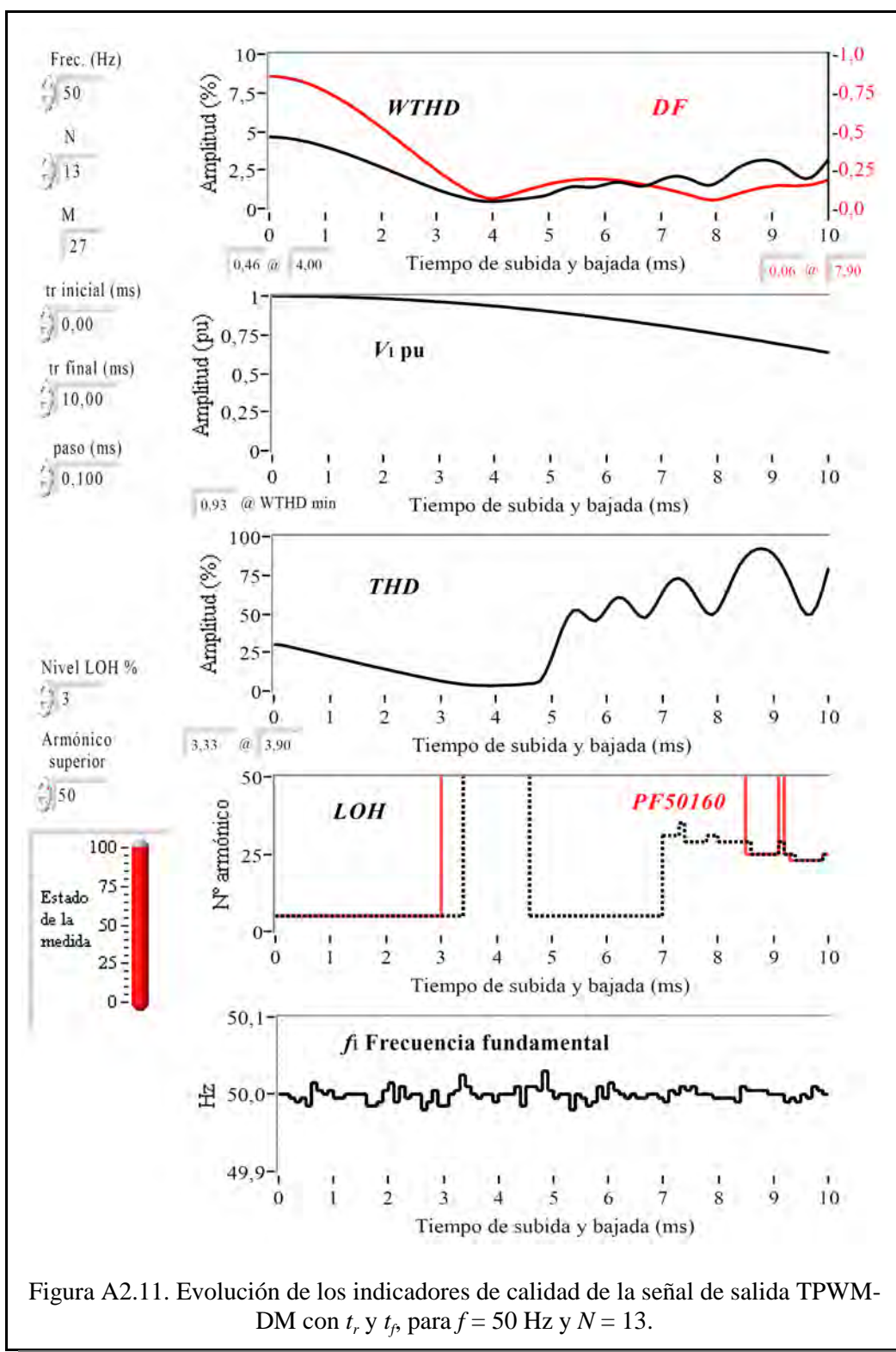


Figura A2.11. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 13$.

f=50Hz, N=13

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,81	1,00	5	5	50,00
0,20	4,61	0,85	29,21	1,00	5	5	50,00
0,30	4,57	0,85	28,41	1,00	5	5	50,00
0,40	4,52	0,84	27,51	1,00	5	5	49,99
0,50	4,46	0,83	26,71	1,00	5	5	50,00
0,60	4,38	0,82	25,77	1,00	5	5	49,99
0,70	4,31	0,81	25,04	1,00	5	5	50,02
0,80	4,22	0,80	24,14	1,00	5	5	50,01
0,90	4,12	0,78	23,26	1,00	5	5	50,00
1,00	4,01	0,76	22,38	1,00	5	5	50,01
1,10	3,89	0,74	21,51	0,99	5	5	50,00
1,20	3,78	0,72	20,67	0,99	5	5	50,00
1,30	3,65	0,70	19,84	0,99	5	5	50,00
1,40	3,53	0,68	19,04	0,99	5	5	50,00
1,50	3,40	0,66	18,21	0,99	5	5	50,00
1,60	3,26	0,63	17,38	0,99	5	5	50,00
1,70	3,12	0,61	16,54	0,99	5	5	49,99
1,80	2,97	0,58	15,67	0,99	5	5	49,99
1,90	2,83	0,55	14,87	0,98	5	5	49,99
2,00	2,69	0,53	14,06	0,98	5	5	50,01
2,10	2,55	0,50	13,32	0,98	5	5	50,02
2,20	2,39	0,47	12,42	0,98	5	5	49,99
2,30	2,25	0,44	11,70	0,98	5	5	50,01
2,40	2,10	0,41	10,87	0,98	5	5	50,00
2,50	1,95	0,39	10,10	0,97	5	5	50,00
2,60	1,80	0,36	9,33	0,97	5	5	50,00
2,70	1,66	0,33	8,56	0,97	5	5	49,98
2,80	1,52	0,30	7,84	0,97	5	5	49,99
2,90	1,38	0,27	7,14	0,97	5	5	50,01
3,00	1,24	0,25	6,42	0,96	5	5	49,99
3,10	1,11	0,22	5,78	0,96	5	60	49,99
3,20	1,00	0,20	5,23	0,96	5	60	50,00
3,30	0,88	0,17	4,69	0,96	5	60	50,01

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
3,40	0,78	0,15	4,29	0,95	5	60	50,03
3,50	0,69	0,13	3,92	0,95	60	60	50,01
3,60	0,60	0,11	3,66	0,95	60	60	50,00
3,70	0,54	0,09	3,50	0,94	60	60	50,00
3,80	0,49	0,08	3,38	0,94	60	60	50,00
3,90	0,46	0,07	3,33	0,94	60	60	50,00
4,00	0,46	0,06	3,38	0,93	60	60	49,99
4,10	0,48	0,07	3,56	0,93	60	60	50,00
4,20	0,50	0,08	3,64	0,93	60	60	50,00
4,30	0,54	0,09	3,72	0,92	60	60	50,00
4,40	0,58	0,10	3,87	0,92	60	60	50,01
4,50	0,62	0,11	4,30	0,92	60	60	49,99
4,60	0,66	0,12	4,63	0,91	60	60	50,01
4,70	0,70	0,13	4,67	0,91	5	60	50,01
4,80	0,75	0,14	6,23	0,91	5	60	50,01
4,90	0,81	0,15	11,60	0,90	5	60	50,03
5,00	0,91	0,16	20,11	0,90	5	60	50,01
5,10	1,05	0,17	30,21	0,90	5	60	50,00
5,20	1,20	0,17	39,93	0,89	5	60	50,00
5,30	1,33	0,18	47,51	0,89	5	60	50,00
5,40	1,42	0,18	51,83	0,88	5	60	49,98
5,50	1,43	0,19	52,08	0,88	5	60	50,00
5,60	1,41	0,19	49,47	0,87	5	60	50,00
5,70	1,38	0,19	46,14	0,87	5	60	49,99
5,80	1,39	0,19	45,20	0,87	5	60	49,99
5,90	1,45	0,19	47,87	0,86	5	60	50,01
6,00	1,56	0,19	52,98	0,86	5	60	50,00
6,10	1,65	0,19	57,79	0,85	5	60	50,02
6,20	1,71	0,19	60,50	0,85	5	60	50,01
6,30	1,69	0,18	60,01	0,84	5	60	50,00
6,40	1,63	0,17	56,86	0,84	5	60	50,00
6,50	1,53	0,17	52,04	0,83	5	60	50,00
6,60	1,45	0,16	48,21	0,83	5	60	50,00
6,70	1,45	0,16	47,28	0,82	5	60	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
6,80	1,54	0,15	50,62	0,82	5	60	50,00
6,90	1,69	0,14	56,63	0,81	5	60	50,00
7,00	1,85	0,14	63,22	0,81	5	60	49,99
7,10	1,99	0,13	68,82	0,80	31	60	50,01
7,20	2,07	0,12	72,03	0,80	31	60	50,01
7,30	2,10	0,11	72,83	0,79	31	60	50,00
7,40	2,05	0,10	71,20	0,79	35	60	50,01
7,50	1,94	0,09	67,14	0,78	29	60	50,01
7,60	1,79	0,08	61,53	0,78	29	60	50,01
7,70	1,63	0,07	55,54	0,77	29	60	50,00
7,80	1,52	0,06	50,70	0,77	29	60	50,00
7,90	1,52	0,06	49,13	0,76	31	60	50,00
8,00	1,65	0,06	51,93	0,75	31	60	50,00
8,10	1,88	0,06	58,51	0,75	29	60	50,00
8,20	2,16	0,08	66,58	0,74	29	60	50,00
8,30	2,43	0,09	74,59	0,74	29	60	50,00
8,40	2,67	0,10	81,54	0,73	29	60	49,99
8,50	2,85	0,11	86,33	0,73	29	60	50,01
8,60	3,00	0,12	89,85	0,72	29	25	50,01
8,70	3,09	0,13	91,67	0,71	25	25	50,01
8,80	3,14	0,14	92,06	0,71	25	25	50,01
8,90	3,14	0,14	91,27	0,70	25	25	50,01
9,00	3,08	0,15	88,87	0,70	25	25	50,00
9,10	2,96	0,15	84,71	0,69	25	25	50,00
9,20	2,77	0,15	78,71	0,68	29	60	50,00
9,30	2,53	0,15	71,34	0,68	25	25	49,99
9,40	2,26	0,15	62,57	0,67	25	23	50,00
9,50	2,03	0,15	54,33	0,67	23	23	49,99
9,60	1,93	0,15	49,38	0,66	23	23	50,00
9,70	2,02	0,15	49,70	0,65	23	23	50,00
9,80	2,30	0,16	55,48	0,65	23	23	50,01
9,90	2,72	0,17	66,02	0,64	23	23	50,01
10,00	3,19	0,19	79,40	0,63	25	25	50,00

Tabla A2.11. Valores numéricos de la figura A2.11.

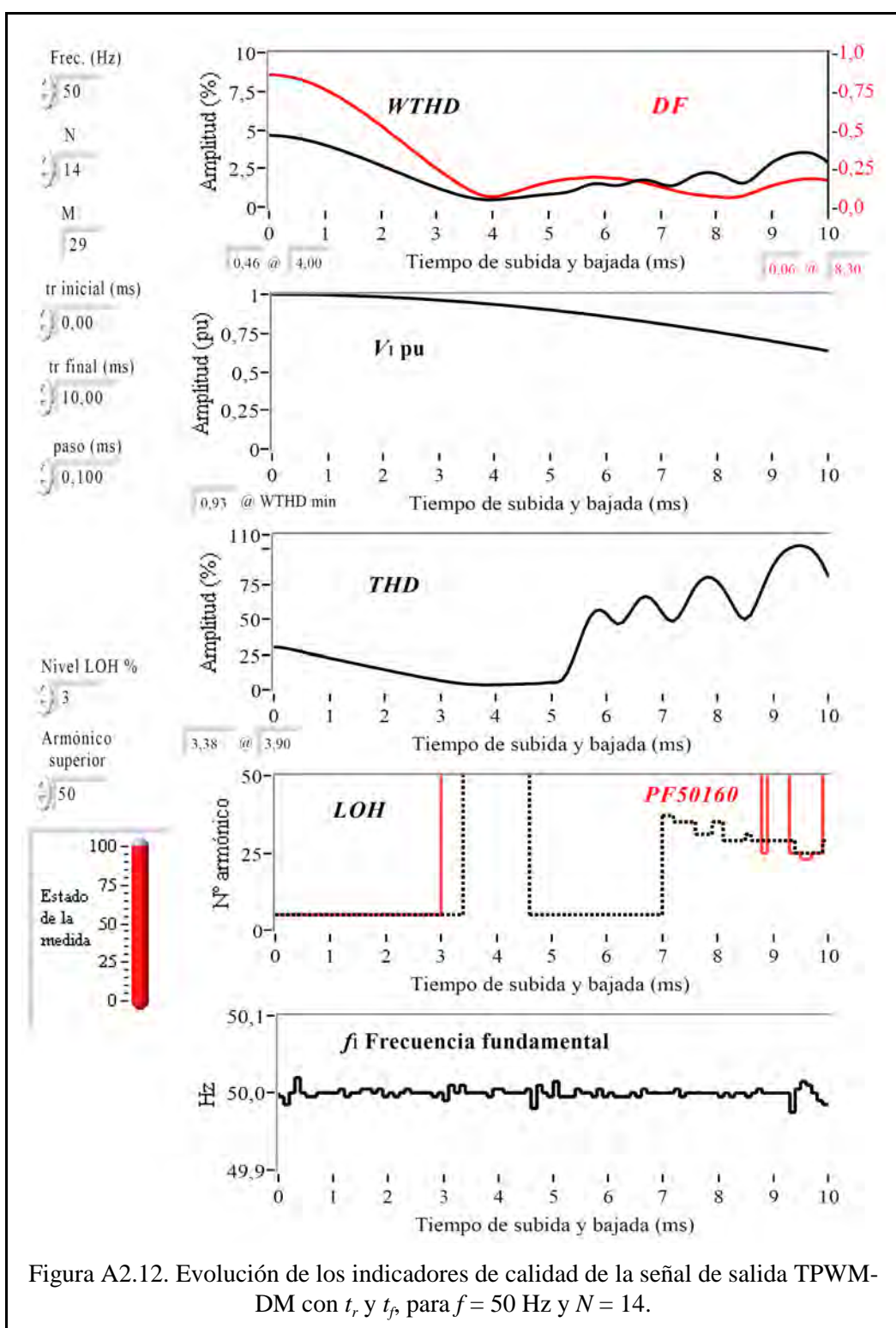


Figura A2.12. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 50$ Hz y $N = 14$.

f=50Hz, N=14

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,79	1,00	5	5	50,00
0,20	4,60	0,85	29,16	1,00	5	5	49,99
0,30	4,57	0,85	28,42	1,00	5	5	50,00
0,40	4,52	0,84	27,60	1,00	5	5	50,02
0,50	4,46	0,83	26,67	1,00	5	5	50,00
0,60	4,38	0,82	25,79	1,00	5	5	50,00
0,70	4,30	0,81	24,94	1,00	5	5	50,00
0,80	4,22	0,80	24,17	1,00	5	5	50,00
0,90	4,12	0,78	23,27	1,00	5	5	50,00
1,00	4,01	0,76	22,39	1,00	5	5	50,00
1,10	3,90	0,74	21,58	1,00	5	5	50,00
1,20	3,78	0,72	20,73	0,99	5	5	50,01
1,30	3,66	0,70	19,86	0,99	5	5	50,00
1,40	3,53	0,68	19,01	0,99	5	5	50,00
1,50	3,40	0,66	18,20	0,99	5	5	50,00
1,60	3,27	0,63	17,41	0,99	5	5	50,01
1,70	3,13	0,61	16,57	0,99	5	5	50,01
1,80	2,98	0,58	15,71	0,99	5	5	50,00
1,90	2,84	0,55	14,91	0,99	5	5	50,01
2,00	2,69	0,53	14,08	0,98	5	5	50,00
2,10	2,54	0,50	13,27	0,98	5	5	50,00
2,20	2,39	0,47	12,47	0,98	5	5	50,00
2,30	2,25	0,44	11,68	0,98	5	5	50,00
2,40	2,11	0,42	10,93	0,98	5	5	50,01
2,50	1,95	0,39	10,12	0,97	5	5	50,00
2,60	1,81	0,36	9,35	0,97	5	5	50,00
2,70	1,66	0,33	8,59	0,97	5	5	50,00
2,80	1,52	0,30	7,86	0,97	5	5	50,00
2,90	1,38	0,27	7,14	0,97	5	5	50,00
3,00	1,25	0,25	6,44	0,96	5	5	50,00
3,10	1,12	0,22	5,80	0,96	5	60	49,99
3,20	1,00	0,20	5,26	0,96	5	60	50,01
3,30	0,88	0,17	4,72	0,96	5	60	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
3,40	0,78	0,15	4,28	0,95	5	60	50,01
3,50	0,68	0,13	3,92	0,95	60	60	50,00
3,60	0,60	0,11	3,66	0,95	60	60	50,00
3,70	0,54	0,09	3,50	0,94	60	60	50,00
3,80	0,49	0,08	3,40	0,94	60	60	50,00
3,90	0,47	0,07	3,38	0,94	60	60	50,00
4,00	0,46	0,07	3,42	0,93	60	60	50,01
4,10	0,48	0,07	3,51	0,93	60	60	50,01
4,20	0,51	0,08	3,59	0,93	60	60	50,00
4,30	0,56	0,09	3,77	0,92	60	60	50,00
4,40	0,58	0,10	3,80	0,92	60	60	50,00
4,50	0,62	0,11	3,93	0,92	60	60	50,00
4,60	0,67	0,12	4,09	0,91	60	60	50,01
4,70	0,71	0,13	4,20	0,91	5	60	49,98
4,80	0,75	0,14	4,43	0,91	5	60	50,01
4,90	0,79	0,15	4,85	0,90	5	60	50,00
5,00	0,83	0,16	5,08	0,90	5	60	50,00
5,10	0,85	0,17	5,02	0,90	5	60	50,02
5,20	0,88	0,17	6,67	0,89	5	60	50,00
5,30	0,93	0,18	12,21	0,89	5	60	50,00
5,40	1,01	0,18	21,29	0,88	5	60	50,00
5,50	1,12	0,18	31,57	0,88	5	60	50,01
5,60	1,29	0,19	42,38	0,87	5	60	50,00
5,70	1,41	0,19	50,75	0,87	5	60	50,00
5,80	1,50	0,19	55,72	0,87	5	60	50,00
5,90	1,52	0,19	56,44	0,86	5	60	50,01
6,00	1,48	0,19	53,78	0,86	5	60	50,00
6,10	1,41	0,19	49,27	0,85	5	60	50,00
6,20	1,38	0,18	46,33	0,85	5	60	50,00
6,30	1,42	0,18	47,54	0,84	5	60	50,00
6,40	1,51	0,18	52,76	0,84	5	60	50,00
6,50	1,63	0,17	59,08	0,83	5	60	50,00
6,60	1,73	0,17	64,09	0,83	5	60	50,00
6,70	1,76	0,16	66,09	0,82	5	60	50,01

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
6,80	1,72	0,15	64,61	0,82	5	60	50,00
6,90	1,62	0,14	60,45	0,81	5	60	50,00
7,00	1,49	0,13	54,67	0,81	5	60	50,00
7,10	1,39	0,12	49,76	0,80	37	60	50,00
7,20	1,37	0,11	48,19	0,80	37	60	50,00
7,30	1,46	0,10	51,29	0,79	35	60	50,01
7,40	1,63	0,09	57,93	0,79	35	60	50,00
7,50	1,84	0,09	65,84	0,78	35	60	50,00
7,60	2,02	0,08	72,62	0,78	35	60	50,00
7,70	2,16	0,08	77,45	0,77	31	60	50,00
7,80	2,23	0,07	79,62	0,77	31	60	50,00
7,90	2,23	0,07	79,30	0,76	31	60	50,00
8,00	2,17	0,07	76,61	0,76	35	60	50,00
8,10	2,05	0,06	71,92	0,75	35	60	50,00
8,20	1,87	0,06	65,29	0,74	29	60	50,00
8,30	1,69	0,06	58,25	0,74	29	60	50,00
8,40	1,55	0,07	51,92	0,73	29	60	50,00
8,50	1,54	0,07	49,57	0,73	29	60	50,00
8,60	1,70	0,09	52,66	0,72	31	60	50,00
8,70	1,98	0,10	60,51	0,71	29	60	50,00
8,80	2,31	0,11	70,13	0,71	29	60	50,01
8,90	2,62	0,13	79,62	0,70	29	25	50,00
9,00	2,89	0,14	87,61	0,70	29	60	50,00
9,10	3,11	0,15	93,58	0,69	29	60	50,00
9,20	3,27	0,16	97,72	0,68	29	60	50,00
9,30	3,39	0,17	100,33	0,68	29	60	50,00
9,40	3,48	0,17	101,81	0,67	29	25	49,98
9,50	3,53	0,18	102,24	0,67	25	25	50,01
9,60	3,53	0,18	101,50	0,66	25	23	50,02
9,70	3,49	0,18	99,56	0,65	25	23	50,01
9,80	3,36	0,18	95,37	0,65	25	25	50,00
9,90	3,16	0,18	89,17	0,64	25	25	49,99
10,00	2,86	0,17	80,33	0,63	29	60	49,99

Tabla A2.12. Valores numéricos de la figura A2.12.

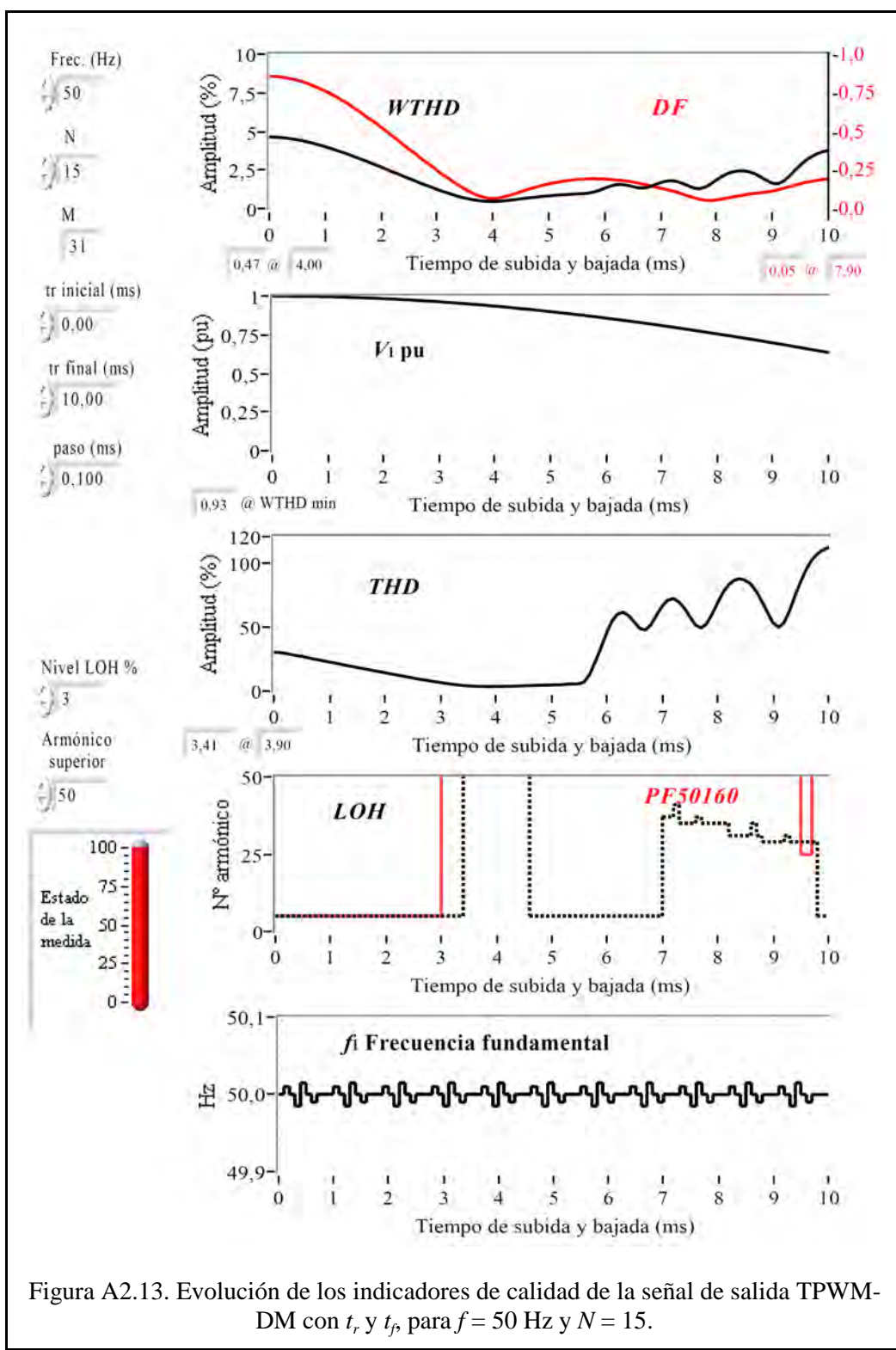


Figura A2.13. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 15$.

f=50Hz, N=15

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,80	1,00	5	5	50,00
0,20	4,61	0,85	29,26	1,00	5	5	50,01
0,30	4,57	0,85	28,44	1,00	5	5	50,00
0,40	4,52	0,84	27,52	1,00	5	5	49,99
0,50	4,46	0,83	26,72	1,00	5	5	50,02
0,60	4,38	0,82	25,82	1,00	5	5	50,00
0,70	4,30	0,81	24,93	1,00	5	5	49,99
0,80	4,21	0,79	24,11	1,00	5	5	50,00
0,90	4,12	0,78	23,26	1,00	5	5	50,00
1,00	4,01	0,76	22,42	1,00	5	5	50,00
1,10	3,91	0,74	21,61	1,00	5	5	50,01
1,20	3,78	0,72	20,73	0,99	5	5	50,00
1,30	3,65	0,70	19,85	0,99	5	5	49,99
1,40	3,54	0,68	19,07	0,99	5	5	50,02
1,50	3,40	0,66	18,20	0,99	5	5	50,00
1,60	3,26	0,63	17,34	0,99	5	5	49,99
1,70	3,12	0,61	16,55	0,99	5	5	50,00
1,80	2,98	0,58	15,73	0,99	5	5	50,00
1,90	2,84	0,55	14,92	0,99	5	5	50,00
2,00	2,70	0,53	14,14	0,98	5	5	50,01
2,10	2,55	0,50	13,30	0,98	5	5	50,00
2,20	2,39	0,47	12,46	0,98	5	5	49,99
2,30	2,26	0,44	11,72	0,98	5	5	50,02
2,40	2,10	0,42	10,90	0,98	5	5	50,00
2,50	1,95	0,39	10,10	0,97	5	5	49,99
2,60	1,81	0,36	9,35	0,97	5	5	50,00
2,70	1,66	0,33	8,61	0,97	5	5	50,00
2,80	1,52	0,30	7,88	0,97	5	5	50,00
2,90	1,39	0,28	7,19	0,97	5	5	50,01
3,00	1,25	0,25	6,48	0,96	5	5	50,00
3,10	1,12	0,22	5,81	0,96	5	60	49,99
3,20	1,00	0,20	5,26	0,96	5	60	50,02
3,30	0,88	0,17	4,72	0,96	5	60	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF	f_1 (Hz)
3,40	0,78	0,15	4,26	0,95	5	60	49,99
3,50	0,68	0,13	3,93	0,95	60	60	50,00
3,60	0,60	0,11	3,68	0,95	60	60	50,00
3,70	0,54	0,09	3,53	0,94	60	60	50,00
3,80	0,50	0,08	3,45	0,94	60	60	50,01
3,90	0,47	0,07	3,41	0,94	60	60	50,00
4,00	0,47	0,07	3,44	0,93	60	60	49,99
4,10	0,48	0,07	3,48	0,93	60	60	50,02
4,20	0,51	0,08	3,58	0,93	60	60	50,00
4,30	0,54	0,09	3,65	0,92	60	60	49,99
4,40	0,58	0,10	3,77	0,92	60	60	50,00
4,50	0,63	0,11	3,92	0,92	60	60	50,00
4,60	0,68	0,12	4,07	0,91	60	60	50,00
4,70	0,72	0,13	4,18	0,91	5	60	50,01
4,80	0,76	0,14	4,29	0,91	5	60	50,00
4,90	0,80	0,15	4,46	0,90	5	60	49,99
5,00	0,82	0,16	4,51	0,90	5	60	50,02
5,10	0,86	0,17	4,62	0,90	5	60	50,00
5,20	0,88	0,17	4,80	0,89	5	60	49,99
5,30	0,91	0,18	5,23	0,89	5	60	50,00
5,40	0,93	0,18	5,43	0,88	5	60	50,00
5,50	0,95	0,19	5,33	0,88	5	60	50,00
5,60	0,96	0,19	6,99	0,88	5	60	50,01
5,70	0,99	0,19	12,96	0,87	5	60	50,00
5,80	1,07	0,19	22,92	0,87	5	60	49,99
5,90	1,17	0,19	33,11	0,86	5	60	50,02
6,00	1,32	0,19	44,82	0,86	5	60	50,00
6,10	1,46	0,19	54,07	0,85	5	60	49,99
6,20	1,55	0,19	59,70	0,85	5	60	50,00
6,30	1,57	0,18	61,14	0,84	5	60	50,00
6,40	1,52	0,18	58,37	0,84	5	60	50,00
6,50	1,43	0,17	53,38	0,83	5	60	50,01
6,60	1,34	0,16	48,41	0,83	5	60	50,02
6,70	1,33	0,16	47,48	0,82	5	60	49,99

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF	f_1 (Hz)
6,80	1,40	0,15	51,35	0,82	5	60	50,02
6,90	1,55	0,14	58,81	0,81	5	60	50,00
7,00	1,69	0,13	65,86	0,81	5	60	49,99
7,10	1,78	0,12	70,42	0,80	37	60	50,00
7,20	1,81	0,11	71,67	0,80	37	60	50,00
7,30	1,75	0,10	69,30	0,79	41	60	50,00
7,40	1,63	0,09	64,40	0,79	35	60	50,01
7,50	1,47	0,08	57,57	0,78	35	60	50,00
7,60	1,33	0,07	51,30	0,78	35	60	49,99
7,70	1,29	0,06	48,92	0,77	37	60	50,02
7,80	1,40	0,05	51,94	0,77	35	60	50,00
7,90	1,61	0,05	59,37	0,76	35	60	49,99
8,00	1,86	0,06	68,18	0,76	35	60	50,00
8,10	2,09	0,06	76,45	0,75	35	60	50,00
8,20	2,28	0,07	82,53	0,74	35	60	50,00
8,30	2,39	0,08	85,91	0,74	31	60	50,01
8,40	2,45	0,08	87,12	0,73	31	60	50,00
8,50	2,44	0,09	85,95	0,73	31	60	49,99
8,60	2,38	0,10	83,05	0,72	31	60	50,02
8,70	2,23	0,10	77,31	0,71	35	60	50,00
8,80	2,04	0,10	69,73	0,71	31	60	49,99
8,90	1,82	0,11	61,00	0,70	29	60	50,00
9,00	1,64	0,11	52,94	0,70	29	60	50,00
9,10	1,61	0,12	49,52	0,69	29	60	50,00
9,20	1,78	0,13	53,01	0,68	29	60	50,01
9,30	2,10	0,14	62,32	0,68	31	60	50,00
9,40	2,49	0,15	74,28	0,67	29	60	49,99
9,50	2,83	0,16	84,82	0,67	29	60	50,02
9,60	3,14	0,17	94,54	0,66	29	25	50,00
9,70	3,38	0,18	101,52	0,65	29	25	49,99
9,80	3,55	0,18	106,24	0,65	29	60	50,00
9,90	3,69	0,19	109,41	0,64	5	60	50,00
10,00	3,79	0,19	111,48	0,63	5	60	50,00

Tabla A2.13. Valores numéricos de la figura A2.13.

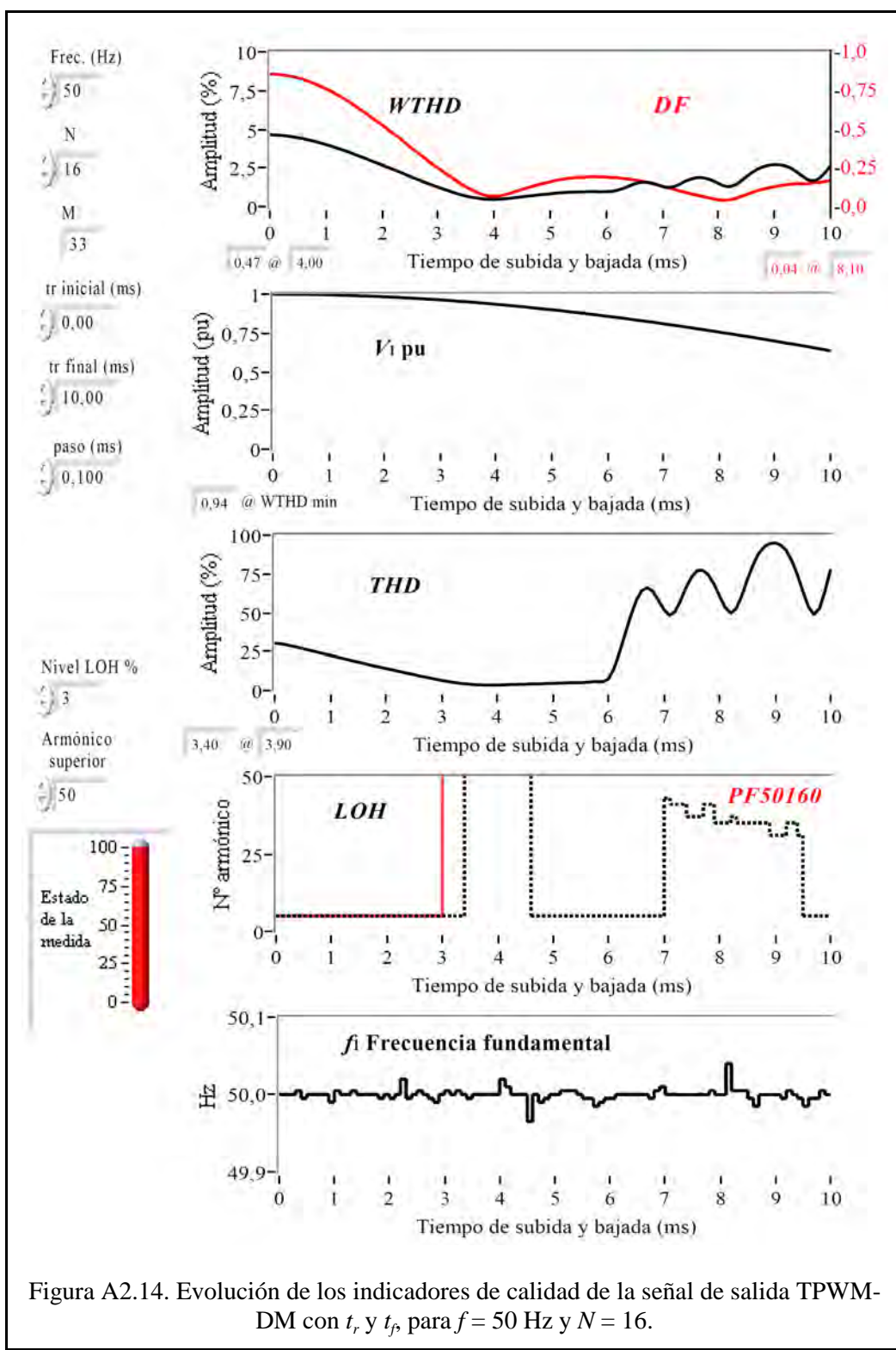


Figura A2.14. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 16$.

f=50Hz, N=16

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,80	1,00	5	5	50,00
0,20	4,61	0,85	29,23	1,00	5	5	50,00
0,30	4,57	0,85	28,42	1,00	5	5	50,00
0,40	4,52	0,84	27,58	1,00	5	5	50,01
0,50	4,45	0,83	26,63	1,00	5	5	50,00
0,60	4,38	0,82	25,80	1,00	5	5	50,00
0,70	4,30	0,81	24,97	1,00	5	5	50,00
0,80	4,21	0,79	24,10	1,00	5	5	50,00
0,90	4,11	0,78	23,22	1,00	5	5	50,00
1,00	4,01	0,76	22,38	1,00	5	5	49,99
1,10	3,90	0,74	21,60	1,00	5	5	50,01
1,20	3,79	0,72	20,75	0,99	5	5	50,00
1,30	3,66	0,70	19,87	0,99	5	5	50,00
1,40	3,54	0,68	19,08	0,99	5	5	50,01
1,50	3,40	0,66	18,20	0,99	5	5	50,00
1,60	3,27	0,63	17,39	0,99	5	5	50,00
1,70	3,12	0,61	16,53	0,99	5	5	50,00
1,80	2,97	0,58	15,66	0,99	5	5	50,00
1,90	2,84	0,55	14,91	0,99	5	5	50,00
2,00	2,69	0,53	14,09	0,98	5	5	50,00
2,10	2,55	0,50	13,31	0,98	5	5	50,00
2,20	2,40	0,47	12,52	0,98	5	5	50,00
2,30	2,27	0,45	11,80	0,98	5	5	50,02
2,40	2,10	0,42	10,93	0,98	5	5	50,00
2,50	1,96	0,39	10,14	0,97	5	5	50,00
2,60	1,81	0,36	9,38	0,97	5	5	50,01
2,70	1,66	0,33	8,60	0,97	5	5	50,00
2,80	1,53	0,30	7,90	0,97	5	5	50,00
2,90	1,38	0,28	7,15	0,97	5	5	49,99
3,00	1,25	0,25	6,48	0,96	5	5	50,00
3,10	1,13	0,22	5,88	0,96	5	60	50,01
3,20	1,00	0,20	5,27	0,96	5	60	50,00
3,30	0,89	0,17	4,75	0,96	5	60	50,01

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
3,40	0,78	0,15	4,29	0,95	5	60	50,00
3,50	0,68	0,13	3,94	0,95	60	60	50,00
3,60	0,61	0,11	3,67	0,95	60	60	50,00
3,70	0,54	0,09	3,53	0,94	60	60	50,00
3,80	0,50	0,08	3,45	0,94	60	60	50,00
3,90	0,47	0,07	3,40	0,94	60	60	50,00
4,00	0,47	0,07	3,42	0,94	60	60	50,00
4,10	0,48	0,07	3,51	0,93	60	60	50,02
4,20	0,51	0,08	3,62	0,93	60	60	50,01
4,30	0,55	0,09	3,72	0,93	60	60	50,00
4,40	0,59	0,10	3,84	0,92	60	60	50,00
4,50	0,63	0,11	3,94	0,92	60	60	50,00
4,60	0,68	0,12	4,08	0,91	60	60	49,97
4,70	0,72	0,13	4,16	0,91	5	60	50,00
4,80	0,76	0,14	4,28	0,91	5	60	49,99
4,90	0,79	0,15	4,36	0,90	5	60	50,00
5,00	0,83	0,16	4,45	0,90	5	60	50,01
5,10	0,87	0,17	4,62	0,90	5	60	50,00
5,20	0,89	0,18	4,70	0,89	5	60	50,01
5,30	0,92	0,18	4,83	0,89	5	60	50,01
5,40	0,93	0,19	4,87	0,88	5	60	50,01
5,50	0,95	0,19	4,91	0,88	5	60	50,00
5,60	0,95	0,19	5,10	0,87	5	60	50,00
5,70	0,97	0,19	5,49	0,87	5	60	50,00
5,80	0,97	0,19	5,67	0,87	5	60	49,99
5,90	0,96	0,19	5,50	0,86	5	60	49,99
6,00	0,97	0,19	7,09	0,86	5	60	50,00
6,10	0,98	0,19	13,33	0,85	5	60	50,00
6,20	1,05	0,19	23,57	0,85	5	60	50,00
6,30	1,17	0,18	35,30	0,84	5	60	50,00
6,40	1,32	0,18	47,27	0,84	5	60	50,00
6,50	1,47	0,17	57,29	0,83	5	60	50,00
6,60	1,56	0,17	63,74	0,83	5	60	50,00
6,70	1,59	0,16	65,92	0,82	5	60	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
6,80	1,54	0,15	63,72	0,82	5	60	50,00
6,90	1,43	0,14	58,02	0,81	5	60	50,01
7,00	1,30	0,13	51,83	0,81	5	60	50,01
7,10	1,23	0,12	48,08	0,80	43	60	50,00
7,20	1,29	0,11	50,30	0,80	41	60	50,00
7,30	1,43	0,10	57,47	0,79	41	60	50,00
7,40	1,62	0,09	66,04	0,79	41	60	50,00
7,50	1,77	0,08	72,98	0,78	37	60	50,00
7,60	1,86	0,08	76,96	0,78	37	60	50,00
7,70	1,87	0,07	77,19	0,77	37	60	50,00
7,80	1,81	0,06	74,36	0,77	41	60	50,00
7,90	1,68	0,05	68,61	0,76	41	60	50,01
8,00	1,50	0,04	60,88	0,76	35	60	50,00
8,10	1,34	0,04	53,39	0,75	35	60	50,00
8,20	1,28	0,04	49,58	0,74	35	60	50,04
8,30	1,40	0,05	52,28	0,74	37	60	50,01
8,40	1,65	0,07	60,47	0,73	35	60	50,01
8,50	1,94	0,08	70,84	0,73	35	60	50,01
8,60	2,21	0,09	80,28	0,72	35	60	50,00
8,70	2,43	0,10	87,58	0,71	35	60	49,99
8,80	2,58	0,11	92,16	0,71	35	60	50,00
8,90	2,67	0,12	94,48	0,70	35	60	50,00
9,00	2,72	0,13	94,91	0,70	31	60	50,00
9,10	2,71	0,14	93,52	0,69	31	60	50,00
9,20	2,63	0,14	90,12	0,68	31	60	50,00
9,30	2,47	0,14	83,58	0,68	35	60	50,01
9,40	2,23	0,15	74,52	0,67	35	60	50,00
9,50	1,96	0,15	63,94	0,67	31	60	50,00
9,60	1,72	0,15	53,61	0,66	5	60	49,99
9,70	1,66	0,16	48,68	0,65	5	60	50,00
9,80	1,82	0,16	52,54	0,65	5	60	50,00
9,90	2,18	0,16	63,67	0,64	5	60	50,01
10,00	2,61	0,17	77,58	0,63	5	60	50,00

Tabla A2.14. Valores numéricos de la figura A2.14.

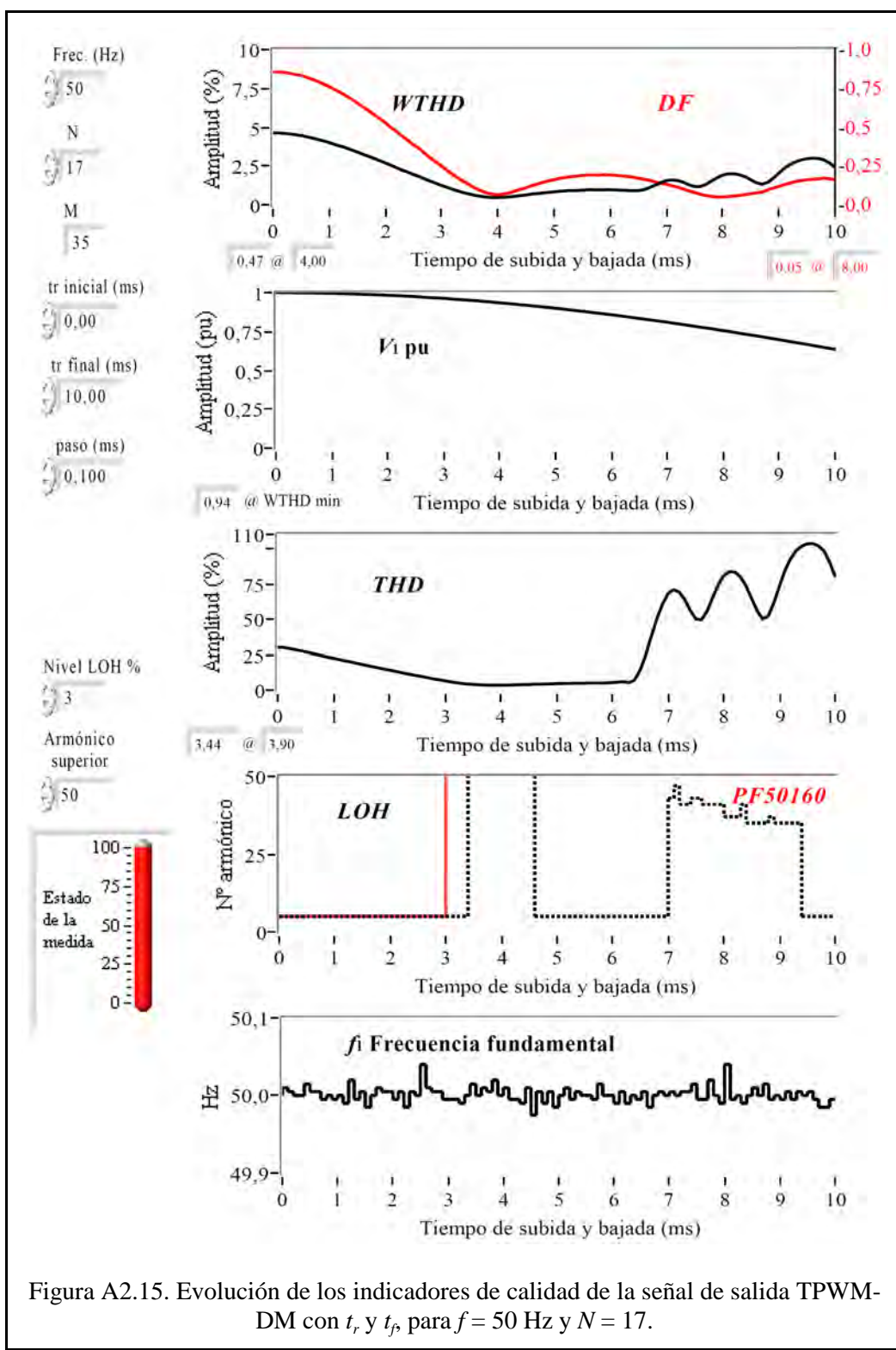


Figura A2.15. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 17$.

f=50Hz, N=17

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,82	1,00	5	5	50,01
0,20	4,61	0,85	29,26	1,00	5	5	50,01
0,30	4,57	0,85	28,40	1,00	5	5	50,00
0,40	4,52	0,84	27,57	1,00	5	5	50,00
0,50	4,46	0,83	26,74	1,00	5	5	50,02
0,60	4,39	0,82	25,87	1,00	5	5	50,01
0,70	4,31	0,81	24,99	1,00	5	5	50,01
0,80	4,21	0,79	24,11	1,00	5	5	50,00
0,90	4,12	0,78	23,25	1,00	5	5	50,00
1,00	4,01	0,76	22,42	1,00	5	5	50,00
1,10	3,90	0,74	21,54	0,99	5	5	50,00
1,20	3,78	0,72	20,72	0,99	5	5	49,99
1,30	3,67	0,70	19,96	0,99	5	5	50,02
1,40	3,54	0,68	19,07	0,99	5	5	50,01
1,50	3,40	0,66	18,23	0,99	5	5	50,01
1,60	3,26	0,63	17,36	0,99	5	5	49,99
1,70	3,12	0,61	16,55	0,99	5	5	50,00
1,80	2,99	0,58	15,78	0,99	5	5	50,01
1,90	2,84	0,55	14,92	0,99	5	5	50,01
2,00	2,70	0,53	14,14	0,98	5	5	50,00
2,10	2,54	0,50	13,29	0,98	5	5	50,00
2,20	2,41	0,47	12,53	0,98	5	5	50,01
2,30	2,24	0,44	11,63	0,98	5	5	49,99
2,40	2,11	0,42	10,96	0,98	5	5	50,01
2,50	1,95	0,39	10,13	0,97	5	5	50,00
2,60	1,83	0,36	9,50	0,97	5	5	50,04
2,70	1,67	0,33	8,64	0,97	5	5	50,01
2,80	1,53	0,30	7,89	0,97	5	5	50,01
2,90	1,39	0,28	7,19	0,97	5	5	50,01
3,00	1,25	0,25	6,48	0,96	5	5	50,00
3,10	1,12	0,22	5,84	0,96	5	60	50,00
3,20	1,00	0,20	5,23	0,96	5	60	50,00
3,30	0,88	0,17	4,72	0,96	5	60	49,99

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
3,40	0,78	0,15	4,28	0,95	5	60	50,00
3,50	0,69	0,13	3,98	0,95	60	60	50,02
3,60	0,61	0,11	3,72	0,95	60	60	50,00
3,70	0,54	0,09	3,56	0,94	60	60	50,01
3,80	0,50	0,08	3,45	0,94	60	60	50,01
3,90	0,47	0,07	3,44	0,94	60	60	50,02
4,00	0,47	0,07	3,47	0,94	60	60	50,00
4,10	0,48	0,07	3,52	0,93	60	60	50,01
4,20	0,51	0,08	3,60	0,93	60	60	50,00
4,30	0,55	0,09	3,74	0,93	60	60	50,00
4,40	0,59	0,10	3,83	0,92	60	60	49,99
4,50	0,63	0,11	3,91	0,92	60	60	50,01
4,60	0,69	0,12	4,12	0,91	60	60	49,98
4,70	0,72	0,13	4,19	0,91	5	60	50,01
4,80	0,76	0,14	4,30	0,91	5	60	49,99
4,90	0,80	0,15	4,43	0,90	5	60	50,01
5,00	0,84	0,16	4,52	0,90	5	60	49,99
5,10	0,87	0,17	4,59	0,90	5	60	50,00
5,20	0,89	0,18	4,67	0,89	5	60	50,01
5,30	0,92	0,18	4,74	0,89	5	60	50,00
5,40	0,93	0,18	4,77	0,88	5	60	50,01
5,50	0,95	0,19	4,84	0,88	5	60	50,00
5,60	0,96	0,19	4,92	0,88	5	60	50,00
5,70	0,97	0,19	5,00	0,87	5	60	50,00
5,80	0,96	0,19	4,95	0,87	5	60	50,02
5,90	0,97	0,19	5,07	0,86	5	60	50,00
6,00	0,97	0,19	5,22	0,86	5	60	50,00
6,10	0,96	0,19	5,59	0,85	5	60	49,99
6,20	0,95	0,19	5,86	0,85	5	60	50,01
6,30	0,93	0,18	5,17	0,84	5	60	49,99
6,40	0,91	0,18	7,01	0,84	5	60	50,00
6,50	0,92	0,17	13,96	0,83	5	60	50,00
6,60	0,97	0,16	24,30	0,83	5	60	50,01
6,70	1,11	0,16	37,43	0,82	5	60	49,99

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
6,80	1,27	0,15	49,81	0,82	5	60	50,00
6,90	1,43	0,14	60,31	0,81	5	60	50,01
7,00	1,56	0,13	67,82	0,81	5	60	50,00
7,10	1,60	0,12	70,75	0,80	43	60	50,01
7,20	1,56	0,11	69,09	0,80	47	60	50,00
7,30	1,45	0,10	63,87	0,79	41	60	50,01
7,40	1,29	0,09	56,12	0,79	41	60	50,01
7,50	1,17	0,08	50,06	0,78	43	60	50,02
7,60	1,17	0,07	49,38	0,78	43	60	50,00
7,70	1,31	0,06	55,34	0,77	41	60	50,00
7,80	1,53	0,05	64,82	0,77	41	60	50,02
7,90	1,75	0,05	73,98	0,76	41	60	50,00
8,00	1,91	0,05	80,51	0,76	41	60	49,99
8,10	1,99	0,05	83,44	0,75	37	60	50,04
8,20	2,01	0,06	83,16	0,74	37	60	50,00
8,30	1,94	0,06	79,80	0,74	37	60	50,00
8,40	1,80	0,07	73,45	0,73	41	60	49,99
8,50	1,61	0,07	64,68	0,73	35	60	50,00
8,60	1,42	0,08	55,87	0,72	35	60	50,01
8,70	1,33	0,08	49,99	0,72	35	60	50,00
8,80	1,45	0,10	52,02	0,71	35	60	50,02
8,90	1,73	0,11	61,38	0,70	37	60	50,00
9,00	2,05	0,12	73,25	0,70	35	60	50,00
9,10	2,36	0,13	84,32	0,69	35	60	50,00
9,20	2,60	0,14	92,57	0,68	35	60	50,01
9,30	2,78	0,15	98,40	0,68	35	60	50,00
9,40	2,89	0,16	101,61	0,67	35	60	50,01
9,50	2,97	0,16	103,15	0,67	5	60	50,00
9,60	3,00	0,17	103,37	0,66	5	60	50,01
9,70	2,99	0,17	101,88	0,65	5	60	50,00
9,80	2,90	0,17	98,19	0,65	5	60	49,99
9,90	2,69	0,17	90,40	0,64	5	60	49,99
10,00	2,41	0,16	80,08	0,63	5	60	50,00

Tabla A2.15. Valores numéricos de la figura A2.15.

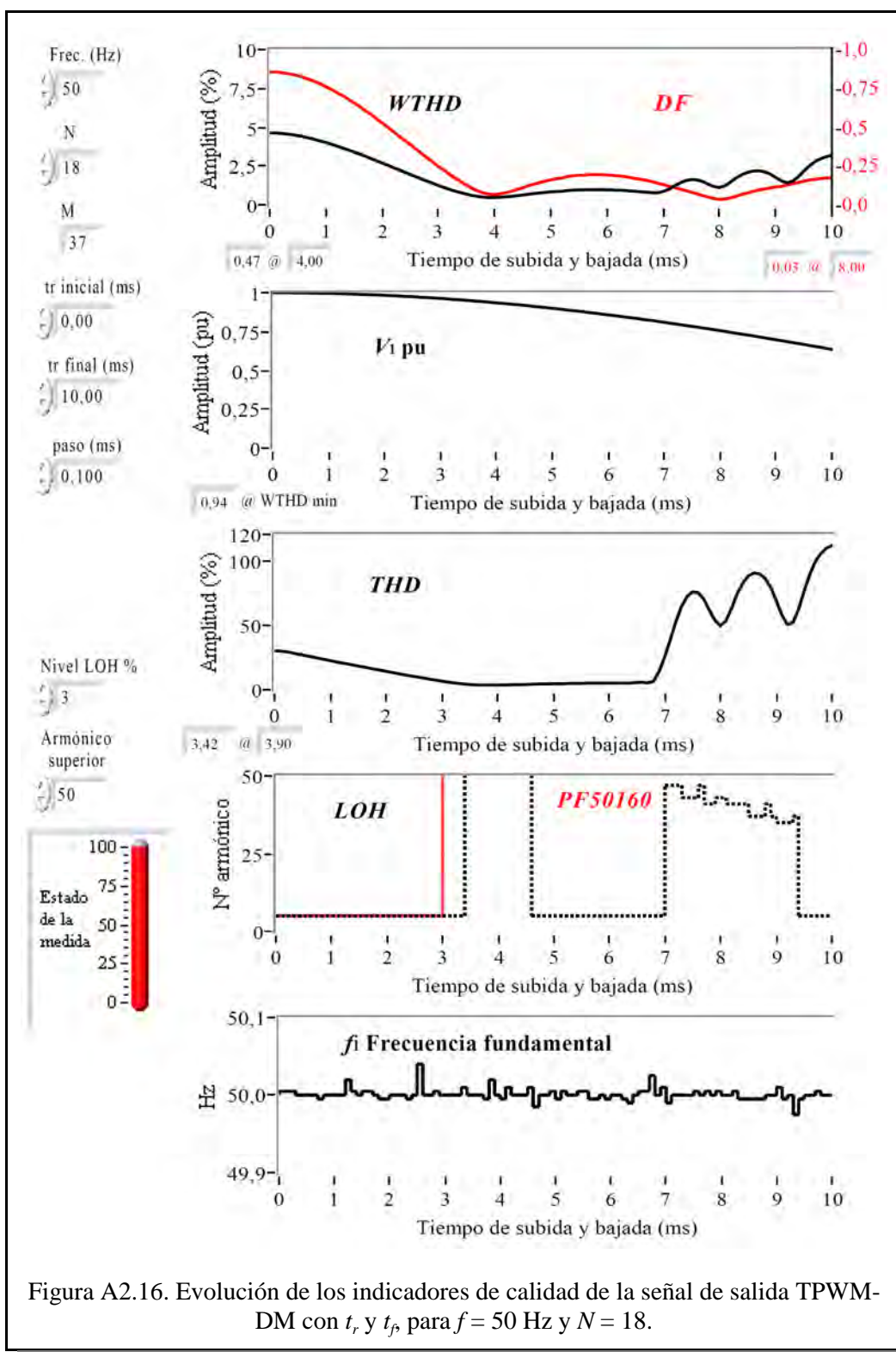


Figura A2.16. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 18$.

$f=50\text{Hz}$, $N=18$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,81	1,00	5	5	50,01
0,20	4,61	0,85	29,23	1,00	5	5	50,01
0,30	4,57	0,85	28,47	1,00	5	5	50,01
0,40	4,52	0,84	27,58	1,00	5	5	50,00
0,50	4,46	0,83	26,70	1,00	5	5	50,00
0,60	4,39	0,82	25,84	1,00	5	5	50,00
0,70	4,31	0,81	24,99	1,00	5	5	50,00
0,80	4,22	0,79	24,13	1,00	5	5	50,00
0,90	4,12	0,78	23,27	1,00	5	5	50,00
1,00	4,01	0,76	22,38	1,00	5	5	50,00
1,10	3,90	0,74	21,58	1,00	5	5	50,00
1,20	3,78	0,72	20,71	0,99	5	5	50,00
1,30	3,67	0,70	19,92	0,99	5	5	50,02
1,40	3,54	0,68	19,09	0,99	5	5	50,01
1,50	3,40	0,66	18,22	0,99	5	5	50,00
1,60	3,27	0,63	17,44	0,99	5	5	50,01
1,70	3,13	0,61	16,61	0,99	5	5	50,01
1,80	2,99	0,58	15,75	0,99	5	5	50,00
1,90	2,84	0,55	14,92	0,99	5	5	50,00
2,00	2,70	0,53	14,12	0,98	5	5	50,00
2,10	2,55	0,50	13,33	0,98	5	5	50,00
2,20	2,40	0,47	12,49	0,98	5	5	50,00
2,30	2,25	0,44	11,70	0,98	5	5	50,00
2,40	2,10	0,42	10,92	0,98	5	5	50,00
2,50	1,96	0,39	10,14	0,97	5	5	50,00
2,60	1,82	0,36	9,43	0,97	5	5	50,04
2,70	1,67	0,33	8,66	0,97	5	5	50,00
2,80	1,53	0,30	7,90	0,97	5	5	50,00
2,90	1,39	0,28	7,23	0,97	5	5	50,01
3,00	1,25	0,25	6,49	0,96	5	5	50,00
3,10	1,13	0,22	5,86	0,96	5	60	50,00
3,20	1,00	0,20	5,24	0,96	5	60	50,00
3,30	0,89	0,17	4,75	0,96	5	60	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
3,40	0,79	0,15	4,32	0,95	5	60	50,01
3,50	0,69	0,13	3,97	0,95	60	60	50,00
3,60	0,60	0,11	3,69	0,95	60	60	50,00
3,70	0,54	0,09	3,55	0,94	60	60	50,00
3,80	0,50	0,08	3,45	0,94	60	60	50,00
3,90	0,47	0,07	3,42	0,94	60	60	50,02
4,00	0,47	0,07	3,50	0,94	60	60	50,00
4,10	0,49	0,07	3,57	0,93	60	60	50,00
4,20	0,52	0,08	3,66	0,93	60	60	50,01
4,30	0,55	0,09	3,73	0,93	60	60	50,00
4,40	0,59	0,10	3,85	0,92	60	60	50,00
4,50	0,63	0,11	3,92	0,92	60	60	50,00
4,60	0,68	0,12	4,08	0,91	60	60	50,01
4,70	0,72	0,13	4,19	0,91	5	60	49,99
4,80	0,76	0,14	4,29	0,91	5	60	50,00
4,90	0,80	0,15	4,37	0,90	5	60	50,00
5,00	0,84	0,16	4,49	0,90	5	60	50,01
5,10	0,86	0,17	4,56	0,90	5	60	50,00
5,20	0,87	0,17	4,56	0,89	5	60	50,01
5,30	0,92	0,18	4,76	0,89	5	60	50,00
5,40	0,94	0,19	4,81	0,88	5	60	50,00
5,50	0,95	0,19	4,85	0,88	5	60	50,01
5,60	0,97	0,19	4,90	0,88	5	60	50,01
5,70	0,98	0,19	4,95	0,87	5	60	50,00
5,80	0,97	0,19	4,93	0,87	5	60	50,00
5,90	0,97	0,19	4,95	0,86	5	60	50,00
6,00	0,97	0,19	4,99	0,86	5	60	50,00
6,10	0,96	0,19	5,04	0,85	5	60	50,00
6,20	0,95	0,19	5,00	0,85	5	60	50,00
6,30	0,93	0,18	4,91	0,84	5	60	50,00
6,40	0,90	0,18	5,02	0,84	5	60	49,99
6,50	0,87	0,17	5,41	0,83	5	60	50,00
6,60	0,85	0,17	5,65	0,83	5	60	50,01
6,70	0,82	0,16	5,05	0,82	5	60	50,01

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
6,80	0,79	0,15	6,44	0,82	5	60	50,03
6,90	0,78	0,14	13,97	0,81	5	60	50,00
7,00	0,86	0,13	25,40	0,81	5	60	50,01
7,10	1,01	0,12	38,46	0,80	47	60	49,99
7,20	1,22	0,11	52,46	0,80	47	60	50,00
7,30	1,42	0,10	64,00	0,79	47	60	50,00
7,40	1,56	0,09	71,92	0,79	43	60	50,00
7,50	1,63	0,08	75,64	0,78	43	60	50,00
7,60	1,61	0,07	74,88	0,78	43	60	50,01
7,70	1,51	0,06	69,91	0,77	47	60	50,00
7,80	1,33	0,05	61,53	0,77	41	60	50,01
7,90	1,17	0,04	53,51	0,76	41	60	50,00
8,00	1,11	0,03	49,35	0,76	43	60	50,01
8,10	1,23	0,04	53,21	0,75	43	60	50,00
8,20	1,47	0,05	62,97	0,74	41	60	50,00
8,30	1,74	0,06	73,91	0,74	41	60	50,01
8,40	1,95	0,07	82,21	0,73	41	60	50,00
8,50	2,10	0,08	87,84	0,73	41	60	50,00
8,60	2,18	0,09	90,15	0,72	37	60	50,00
8,70	2,19	0,10	89,49	0,72	37	60	50,00
8,80	2,13	0,10	85,95	0,71	37	60	50,00
8,90	1,98	0,11	78,97	0,70	41	60	50,00
9,00	1,77	0,12	69,07	0,70	37	60	50,00
9,10	1,53	0,12	57,78	0,69	35	60	50,01
9,20	1,42	0,13	50,31	0,69	35	60	50,00
9,30	1,51	0,13	51,63	0,68	35	60	50,00
9,40	1,81	0,14	61,93	0,67	37	60	49,98
9,50	2,17	0,15	75,91	0,67	5	60	50,00
9,60	2,51	0,16	88,74	0,66	5	60	50,00
9,70	2,79	0,17	98,78	0,65	5	60	50,00
9,80	2,97	0,17	105,18	0,65	5	60	50,01
9,90	3,10	0,17	109,22	0,64	5	60	50,00
10,00	3,19	0,18	111,35	0,64	5	60	50,00

Tabla A2.16. Valores numéricos de la figura A2.16.

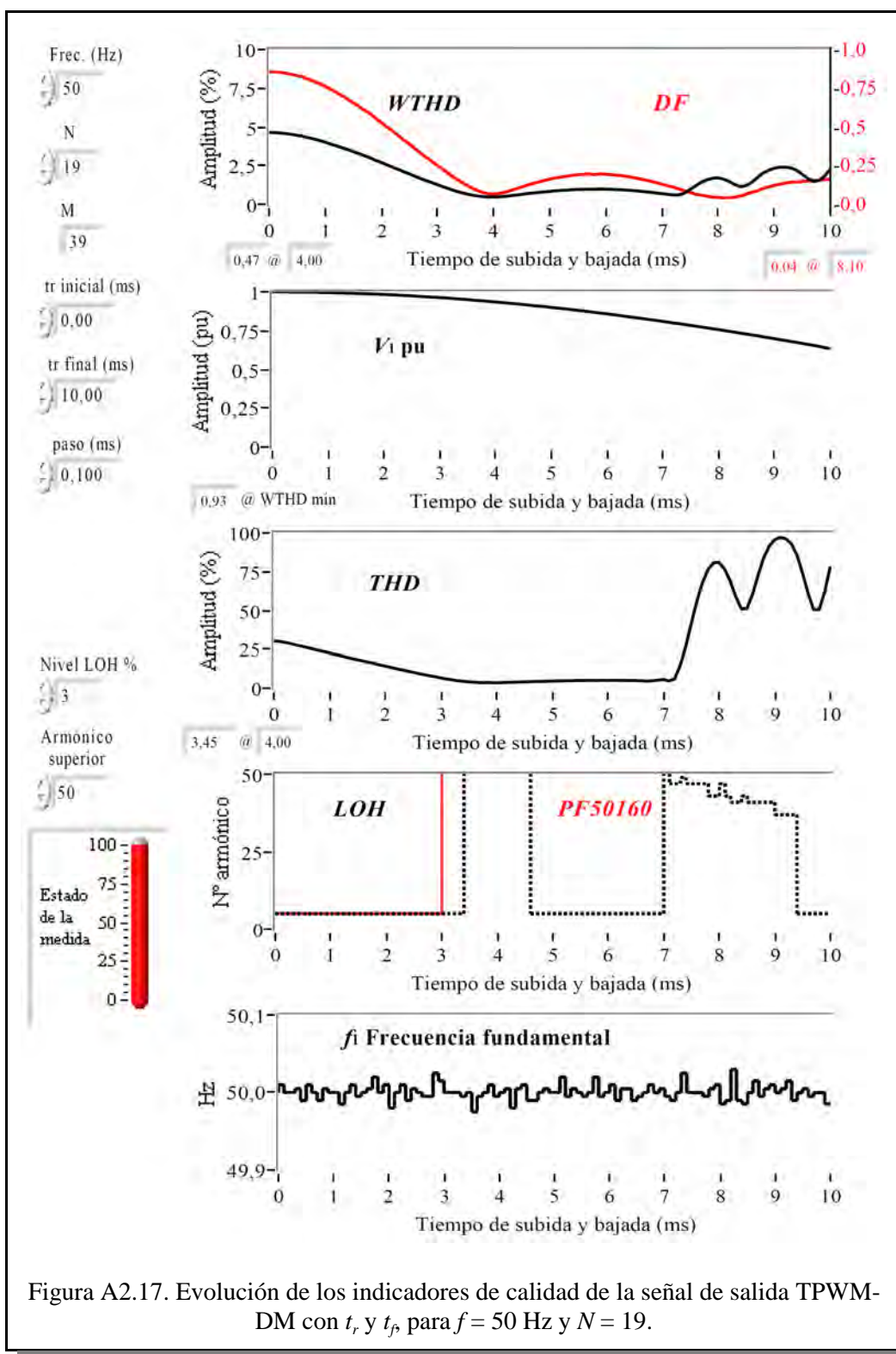


Figura A2.17. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 19$.

f=50Hz, N=19

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,82	1,00	5	5	50,00
0,20	4,61	0,85	29,23	1,00	5	5	50,00
0,30	4,57	0,85	28,45	1,00	5	5	50,00
0,40	4,52	0,84	27,56	1,00	5	5	50,00
0,50	4,46	0,83	26,69	1,00	5	5	49,99
0,60	4,39	0,82	25,89	1,00	5	5	50,01
0,70	4,30	0,81	24,94	1,00	5	5	50,00
0,80	4,21	0,79	24,09	1,00	5	5	49,99
0,90	4,12	0,78	23,31	1,00	5	5	50,01
1,00	4,01	0,76	22,41	1,00	5	5	50,00
1,10	3,90	0,74	21,53	0,99	5	5	50,00
1,20	3,78	0,72	20,70	0,99	5	5	49,99
1,30	3,66	0,70	19,88	0,99	5	5	50,00
1,40	3,53	0,68	19,06	0,99	5	5	50,01
1,50	3,40	0,66	18,24	0,99	5	5	50,00
1,60	3,27	0,63	17,41	0,99	5	5	50,00
1,70	3,14	0,61	16,62	0,99	5	5	50,01
1,80	3,01	0,59	15,86	0,99	5	5	50,02
1,90	2,84	0,56	14,93	0,99	5	5	50,00
2,00	2,70	0,53	14,14	0,98	5	5	50,01
2,10	2,54	0,50	13,29	0,98	5	5	49,98
2,20	2,40	0,47	12,54	0,98	5	5	50,00
2,30	2,26	0,45	11,74	0,98	5	5	50,01
2,40	2,10	0,41	10,89	0,98	5	5	49,99
2,50	1,96	0,39	10,18	0,97	5	5	50,01
2,60	1,81	0,36	9,38	0,97	5	5	50,00
2,70	1,67	0,33	8,63	0,97	5	5	50,00
2,80	1,52	0,30	7,87	0,97	5	5	50,00
2,90	1,40	0,28	7,26	0,97	5	5	50,03
3,00	1,26	0,25	6,55	0,96	5	5	50,02
3,10	1,13	0,22	5,87	0,96	5	60	50,00
3,20	1,01	0,20	5,29	0,96	5	60	50,00
3,30	0,89	0,17	4,75	0,96	5	60	50,00
6,80	0,78	0,15	4,58	0,82	5	60	50,01
6,90	0,73	0,14	5,13	0,81	5	60	50,00
7,00	0,69	0,13	5,45	0,81	5	60	50,01
7,10	0,64	0,12	4,62	0,80	60	60	50,00
7,20	0,61	0,11	5,84	0,80	47	60	49,99
7,30	0,61	0,10	14,07	0,79	47	60	50,00
7,40	0,72	0,09	26,06	0,79	49	60	50,03
7,50	0,94	0,08	41,25	0,78	47	60	50,00
7,60	1,19	0,07	55,32	0,78	47	60	50,00
7,70	1,42	0,06	67,42	0,77	47	60	50,00
7,80	1,59	0,05	76,12	0,77	47	60	50,00
7,90	1,69	0,05	80,59	0,76	43	60	50,01
8,00	1,71	0,04	80,80	0,76	43	60	50,01
8,10	1,62	0,04	76,36	0,75	47	60	49,99
8,20	1,47	0,04	68,59	0,74	43	60	49,99
8,30	1,27	0,05	58,80	0,74	41	60	50,03
8,40	1,14	0,05	50,82	0,73	41	60	49,99
8,50	1,20	0,07	51,04	0,73	43	60	49,99
8,60	1,43	0,08	59,96	0,72	41	60	50,00
8,70	1,72	0,09	72,19	0,72	41	60	50,02
8,80	2,01	0,10	83,59	0,71	41	60	50,00
8,90	2,20	0,11	91,27	0,70	41	60	50,01
9,00	2,33	0,12	95,41	0,70	41	60	50,01
9,10	2,39	0,13	96,99	0,69	37	60	50,00
9,20	2,40	0,14	96,10	0,69	37	60	50,01
9,30	2,35	0,14	92,80	0,68	37	60	50,02
9,40	2,19	0,14	85,42	0,67	37	60	49,99
9,50	1,94	0,15	74,03	0,67	5	60	50,00
9,60	1,67	0,15	61,00	0,66	5	60	50,01
9,70	1,48	0,15	50,42	0,65	5	60	50,00
9,80	1,53	0,15	50,26	0,65	5	60	50,00
9,90	1,83	0,16	61,59	0,64	5	60	50,00
10,00	2,25	0,16	78,13	0,64	5	60	49,99
3,40	0,78	0,15	4,31	0,95	5	60	50,00
3,50	0,69	0,13	3,98	0,95	60	60	49,98
3,60	0,61	0,11	3,73	0,95	60	60	50,00
3,70	0,54	0,09	3,56	0,94	60	60	50,00
3,80	0,50	0,08	3,46	0,94	60	60	50,00
3,90	0,48	0,07	3,46	0,94	60	60	50,01
4,00	0,47	0,07	3,45	0,93	60	60	50,00
4,10	0,49	0,07	3,54	0,93	60	60	50,00
4,20	0,51	0,08	3,63	0,93	60	60	50,01
4,30	0,55	0,09	3,76	0,92	60	60	49,98
4,40	0,60	0,10	3,90	0,92	60	60	50,01
4,50	0,64	0,11	4,00	0,92	60	60	50,01
4,60	0,68	0,12	4,12	0,91	60	60	49,99
4,70	0,73	0,14	4,23	0,91	5	60	49,99
4,80	0,76	0,14	4,29	0,91	5	60	50,00
4,90	0,80	0,15	4,41	0,90	5	60	50,01
5,00	0,84	0,16	4,50	0,90	5	60	50,00
5,10	0,87	0,17	4,62	0,90	5	60	50,00
5,20	0,89	0,18	4,66	0,89	5	60	50,02
5,30	0,91	0,18	4,72	0,89	5	60	50,00
5,40	0,94	0,19	4,83	0,88	5	60	50,01
5,50	0,96	0,19	4,85	0,88	5	60	50,00
5,60	0,97	0,19	4,90	0,87	5	60	50,00
5,70	0,97	0,19	4,92	0,87	5	60	50,00
5,80	0,97	0,19	4,89	0,87	5	60	50,02
5,90	0,98	0,20	5,00	0,86	5	60	50,00
6,00	0,97	0,19	4,97	0,86	5	60	50,00
6,10	0,97	0,19	4,99	0,85	5	60	50,01
6,20	0,95	0,19	4,92	0,85	5	60	49,99
6,30	0,94	0,18	4,88	0,84	5	60	50,01
6,40	0,91	0,18	4,84	0,84	5	60	50,01
6,50	0,88	0,17	4,86	0,83	5	60	49,99
6,60	0,85	0,17	4,73	0,83	5	60	50,00
6,70	0,81	0,16	4,44	0,82	5	60	50,00

Tabla A2.17. Valores numéricos de la figura A2.17.

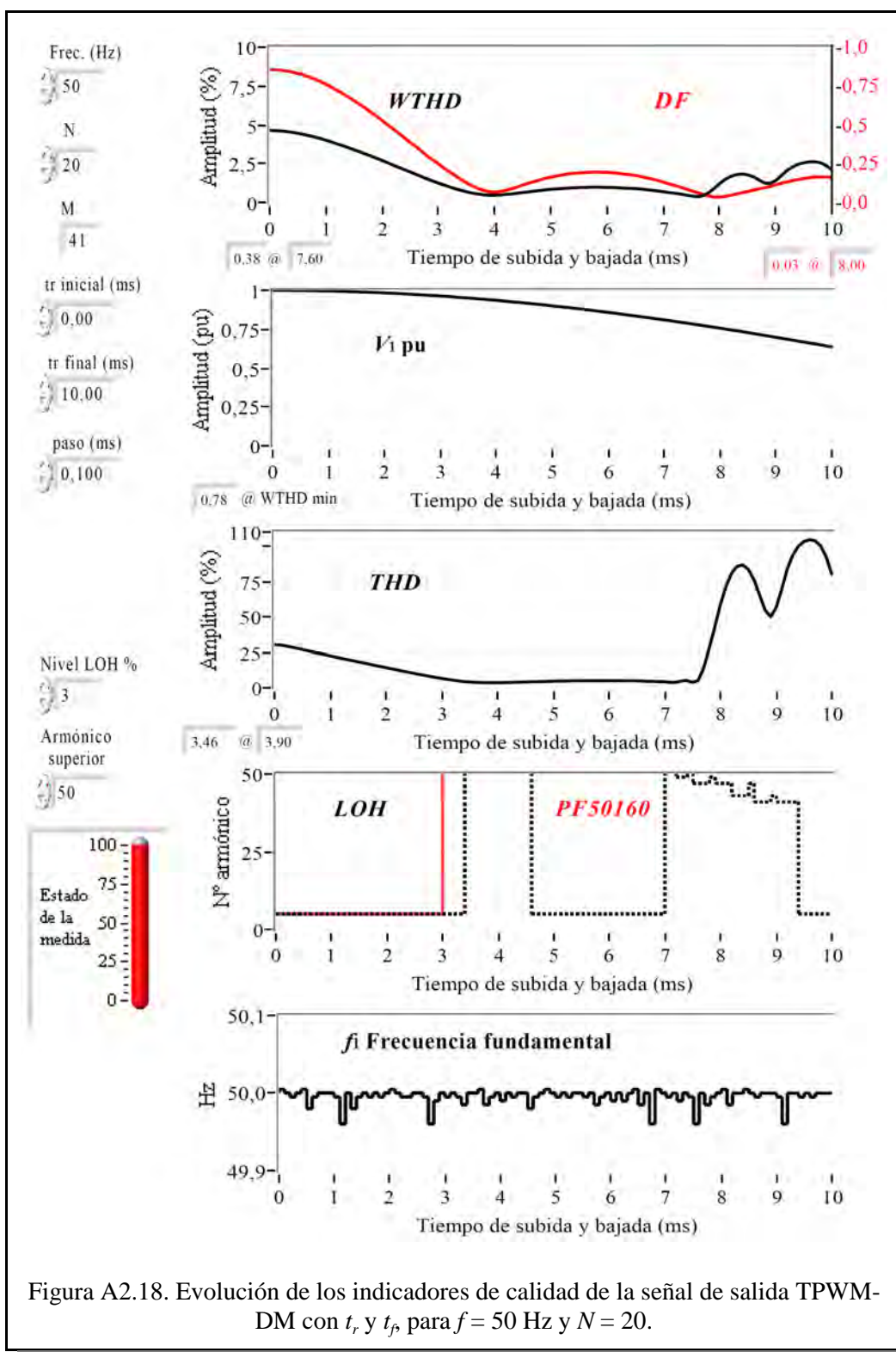


Figura A2.18. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 50$ Hz y $N = 20$.

f=50Hz, N=20

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,01	1,00	5	5	50,00
0,10	4,63	0,86	29,82	1,00	5	5	50,01
0,20	4,61	0,85	29,24	1,00	5	5	50,00
0,30	4,57	0,84	28,43	1,00	5	5	50,00
0,40	4,52	0,84	27,58	1,00	5	5	50,00
0,50	4,46	0,83	26,71	1,00	5	5	50,01
0,60	4,38	0,82	25,81	1,00	5	5	49,98
0,70	4,31	0,81	24,98	1,00	5	5	50,00
0,80	4,22	0,80	24,15	1,00	5	5	50,00
0,90	4,12	0,78	23,28	1,00	5	5	50,00
1,00	4,01	0,76	22,43	1,00	5	5	50,00
1,10	3,90	0,74	21,57	0,99	5	5	50,00
1,20	3,77	0,72	20,65	0,99	5	5	49,96
1,30	3,66	0,70	19,89	0,99	5	5	50,00
1,40	3,53	0,68	19,01	0,99	5	5	49,98
1,50	3,40	0,66	18,21	0,99	5	5	50,00
1,60	3,27	0,63	17,40	0,99	5	5	50,00
1,70	3,13	0,61	16,60	0,99	5	5	50,00
1,80	2,99	0,58	15,78	0,99	5	5	50,00
1,90	2,84	0,56	14,95	0,99	5	5	50,00
2,00	2,70	0,53	14,15	0,98	5	5	50,00
2,10	2,55	0,50	13,34	0,98	5	5	50,01
2,20	2,40	0,47	12,52	0,98	5	5	50,00
2,30	2,25	0,44	11,72	0,98	5	5	50,00
2,40	2,10	0,42	10,92	0,98	5	5	50,00
2,50	1,96	0,39	10,17	0,97	5	5	50,00
2,60	1,81	0,36	9,40	0,97	5	5	50,00
2,70	1,67	0,33	8,63	0,97	5	5	50,00
2,80	1,51	0,30	7,84	0,97	5	5	49,96
2,90	1,39	0,28	7,19	0,97	5	5	49,99
3,00	1,25	0,25	6,49	0,96	5	5	50,00
3,10	1,12	0,22	5,84	0,96	5	60	50,00
3,20	1,00	0,20	5,27	0,96	5	60	50,00
3,30	0,89	0,17	4,77	0,96	5	60	50,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/160 (HO)	f_1 (Hz)
6,80	0,79	0,15	4,37	0,82	5	60	49,96
6,90	0,74	0,14	4,27	0,81	5	60	50,01
7,00	0,69	0,13	4,11	0,81	5	60	50,00
7,10	0,64	0,12	3,72	0,80	60	60	50,00
7,20	0,59	0,11	3,76	0,80	60	60	50,00
7,30	0,55	0,10	4,63	0,79	49	60	49,99
7,40	0,49	0,09	5,11	0,79	49	60	50,00
7,50	0,42	0,07	3,75	0,78	60	60	50,00
7,60	0,38	0,06	5,09	0,78	47	60	49,96
7,70	0,42	0,05	14,07	0,77	47	60	50,00
7,80	0,62	0,04	27,61	0,77	47	60	49,99
7,90	0,90	0,04	42,83	0,76	49	60	50,00
8,00	1,21	0,03	58,42	0,76	47	60	50,00
8,10	1,47	0,04	71,36	0,75	47	60	50,01
8,20	1,67	0,05	80,67	0,74	47	60	49,99
8,30	1,79	0,05	85,63	0,74	43	60	50,00
8,40	1,83	0,06	86,55	0,73	43	60	50,00
8,50	1,79	0,07	83,47	0,73	43	60	50,01
8,60	1,66	0,08	76,27	0,72	47	60	50,00
8,70	1,46	0,09	65,78	0,72	41	60	50,00
8,80	1,26	0,09	54,61	0,71	41	60	50,00
8,90	1,22	0,10	49,81	0,70	41	60	50,00
9,00	1,41	0,11	56,29	0,70	43	60	50,00
9,10	1,72	0,12	69,49	0,69	41	60	50,00
9,20	2,05	0,13	83,63	0,69	41	60	49,96
9,30	2,29	0,14	93,72	0,68	41	60	50,00
9,40	2,46	0,15	100,05	0,67	41	60	50,00
9,50	2,56	0,15	103,22	0,67	5	60	50,00
9,60	2,61	0,16	104,39	0,66	5	60	50,00
9,70	2,62	0,16	103,68	0,65	5	60	50,00
9,80	2,55	0,17	99,89	0,65	5	60	50,00
9,90	2,38	0,16	92,09	0,64	5	60	50,00
10,00	2,10	0,16	79,64	0,64	5	60	50,00

Tabla A2.18. Valores numéricos de la figura A2.18.

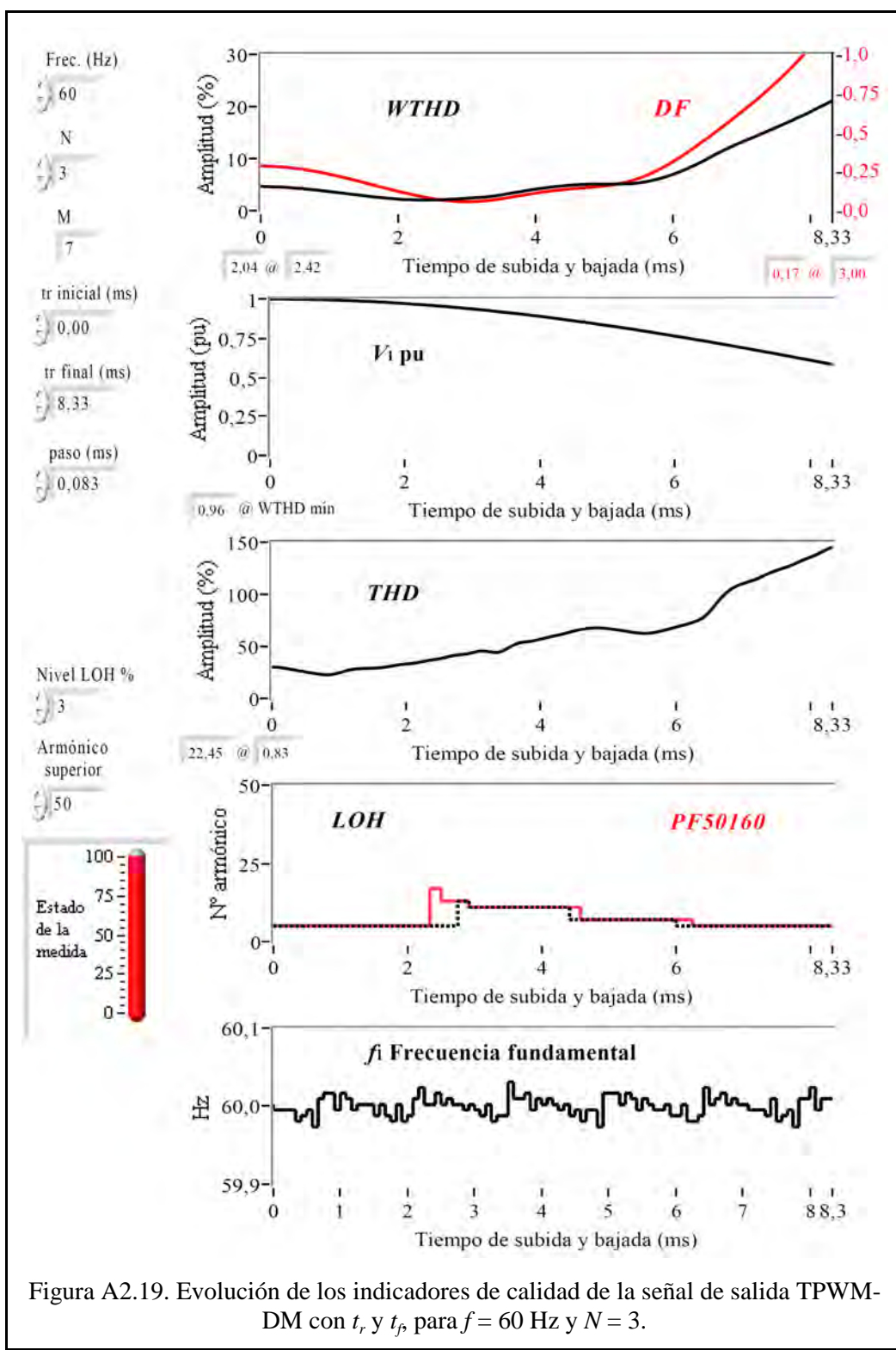


Figura A2.19. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 60$ Hz y $N = 3$.

$f_s=60$ Hz, $N=3$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
0.00	4.64	0.86	30.02	1.00	5	5	60.00
0.08	4.63	0.86	29.76	1.00	5	5	60.00
0.17	4.60	0.85	29.06	1.00	5	5	60.00
0.25	4.55	0.85	28.17	1.00	5	5	60.00
0.33	4.50	0.84	27.23	1.00	5	5	60.00
0.42	4.42	0.83	26.26	1.00	5	5	59.98
0.50	4.34	0.81	25.32	1.00	5	5	59.99
0.58	4.25	0.80	24.43	1.00	5	5	60.00
0.67	4.13	0.78	23.44	1.00	5	5	59.97
0.75	4.03	0.76	22.71	1.00	5	5	60.01
0.83	3.92	0.75	22.45	1.00	5	5	60.02
0.92	3.80	0.72	23.01	0.99	5	5	60.02
1.00	3.66	0.70	24.42	0.99	5	5	60.00
1.08	3.54	0.68	26.09	0.99	5	5	60.02
1.17	3.41	0.65	27.41	0.99	5	5	60.01
1.25	3.27	0.62	28.16	0.99	5	5	60.00
1.33	3.14	0.60	28.50	0.99	5	5	60.00
1.42	3.01	0.57	28.71	0.99	5	5	60.00
1.50	2.87	0.54	28.92	0.98	5	5	60.00
1.58	2.74	0.51	29.17	0.98	5	5	59.99
1.67	2.62	0.49	29.70	0.98	5	5	60.00
1.75	2.50	0.46	30.61	0.98	5	5	59.99
1.83	2.40	0.43	31.66	0.98	5	5	59.98
1.92	2.31	0.40	32.40	0.97	5	5	60.00
2.00	2.22	0.37	32.88	0.97	5	5	59.98
2.08	2.14	0.35	33.34	0.97	5	5	59.99
2.17	2.10	0.32	34.15	0.97	5	5	60.01
2.25	2.06	0.30	35.32	0.96	5	5	60.02
2.33	2.04	0.27	36.43	0.96	5	5	60.00
2.42	2.04	0.25	37.16	0.96	5	17	60.00
2.50	2.05	0.23	38.00	0.96	5	17	60.02
2.58	2.08	0.22	39.22	0.95	5	13	60.00
2.67	2.12	0.20	40.51	0.95	5	13	60.01
2.75	2.17	0.19	41.39	0.95	5	13	60.00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
2.83	2.23	0.18	41.92	0.94	13	13	60.00
2.92	2.30	0.17	42.66	0.94	13	13	60.00
3.00	2.37	0.17	43.96	0.94	11	11	60.00
3.08	2.45	0.17	45.23	0.93	11	11	60.00
3.17	2.52	0.18	45.44	0.93	11	11	59.99
3.25	2.59	0.18	44.57	0.93	11	11	60.00
3.33	2.69	0.20	43.87	0.92	11	11	59.98
3.42	2.83	0.21	44.89	0.92	11	11	59.99
3.50	3.00	0.23	47.67	0.91	11	11	59.99
3.58	3.18	0.24	50.71	0.91	11	11	60.03
3.67	3.39	0.26	53.01	0.91	11	11	60.01
3.75	3.57	0.28	53.99	0.90	11	11	60.01
3.83	3.75	0.30	54.58	0.90	11	11	60.02
3.92	3.93	0.32	55.54	0.89	11	11	60.00
4.00	4.09	0.33	56.79	0.89	11	11	60.01
4.08	4.25	0.35	58.14	0.88	11	11	60.00
4.17	4.40	0.37	59.37	0.88	11	11	60.01
4.25	4.53	0.38	60.51	0.88	11	11	60.00
4.33	4.66	0.39	61.78	0.87	11	11	60.00
4.41	4.77	0.40	63.27	0.87	11	11	60.00
4.50	4.86	0.41	64.66	0.86	7	11	59.99
4.58	4.94	0.42	65.89	0.86	7	11	60.00
4.66	5.01	0.43	66.87	0.85	7	7	59.98
4.75	5.05	0.44	67.46	0.85	7	7	60.00
4.83	5.07	0.45	67.61	0.84	7	7	60.00
4.91	5.09	0.46	67.48	0.84	7	7	59.97
5.00	5.09	0.47	66.98	0.83	7	7	60.02
5.08	5.09	0.49	66.21	0.83	7	7	60.02
5.16	5.09	0.50	65.38	0.82	7	7	60.02
5.25	5.11	0.52	64.53	0.81	7	7	60.00
5.33	5.15	0.55	63.65	0.81	7	7	60.02
5.41	5.22	0.58	62.86	0.80	7	7	60.01
5.50	5.32	0.61	62.39	0.80	7	7	60.00
5.58	5.48	0.65	62.33	0.79	7	7	60.01

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
5.66	5.67	0.70	62.86	0.79	7	7	60.00
5.75	5.92	0.75	63.98	0.78	7	7	60.00
5.83	6.21	0.81	65.30	0.77	7	7	60.00
5.91	6.54	0.87	66.69	0.77	7	7	60.00
6.00	6.92	0.93	68.19	0.76	7	7	59.99
6.08	7.33	1.00	69.70	0.76	5	7	59.99
6.16	7.78	1.07	71.17	0.75	5	7	60.00
6.25	8.27	1.14	72.71	0.74	5	7	59.98
6.33	8.78	1.22	74.55	0.74	5	5	59.98
6.41	9.33	1.30	77.69	0.73	5	5	59.99
6.50	9.87	1.38	82.44	0.73	5	5	60.02
6.58	10.46	1.46	88.85	0.72	5	5	60.00
6.66	11.04	1.54	95.37	0.71	5	5	60.01
6.75	11.59	1.63	100.92	0.71	5	5	60.02
6.83	12.12	1.71	105.11	0.70	5	5	60.00
6.91	12.63	1.80	108.08	0.70	5	5	60.01
7.00	13.09	1.88	110.04	0.69	5	5	60.00
7.08	13.56	1.97	111.77	0.68	5	5	60.00
7.16	14.02	2.06	113.49	0.68	5	5	60.00
7.25	14.48	2.15	115.64	0.67	5	5	60.00
7.33	14.95	2.25	118.30	0.66	5	5	60.00
7.41	15.42	2.34	120.81	0.66	5	5	59.99
7.50	15.89	2.44	122.81	0.65	5	5	60.01
7.58	16.38	2.55	124.53	0.64	5	5	59.98
7.66	16.87	2.65	126.23	0.64	5	5	59.99
7.75	17.36	2.76	128.31	0.63	5	5	60.00
7.83	17.88	2.88	130.90	0.62	5	5	59.97
7.91	18.38	3.00	133.19	0.62	5	5	60.01
8.00	18.89	3.12	135.22	0.61	5	5	60.01
8.08	19.44	3.25	137.52	0.60	5	5	60.02
8.16	20.00	3.38	140.22	0.60	5	5	60.00
8.25	20.56	3.52	142.83	0.59	5	5	60.01
8.33	21.14	3.67	145.28	0.58	5	5	60.01

Tabla A2.19. Valores numéricos de la figura A2.19.

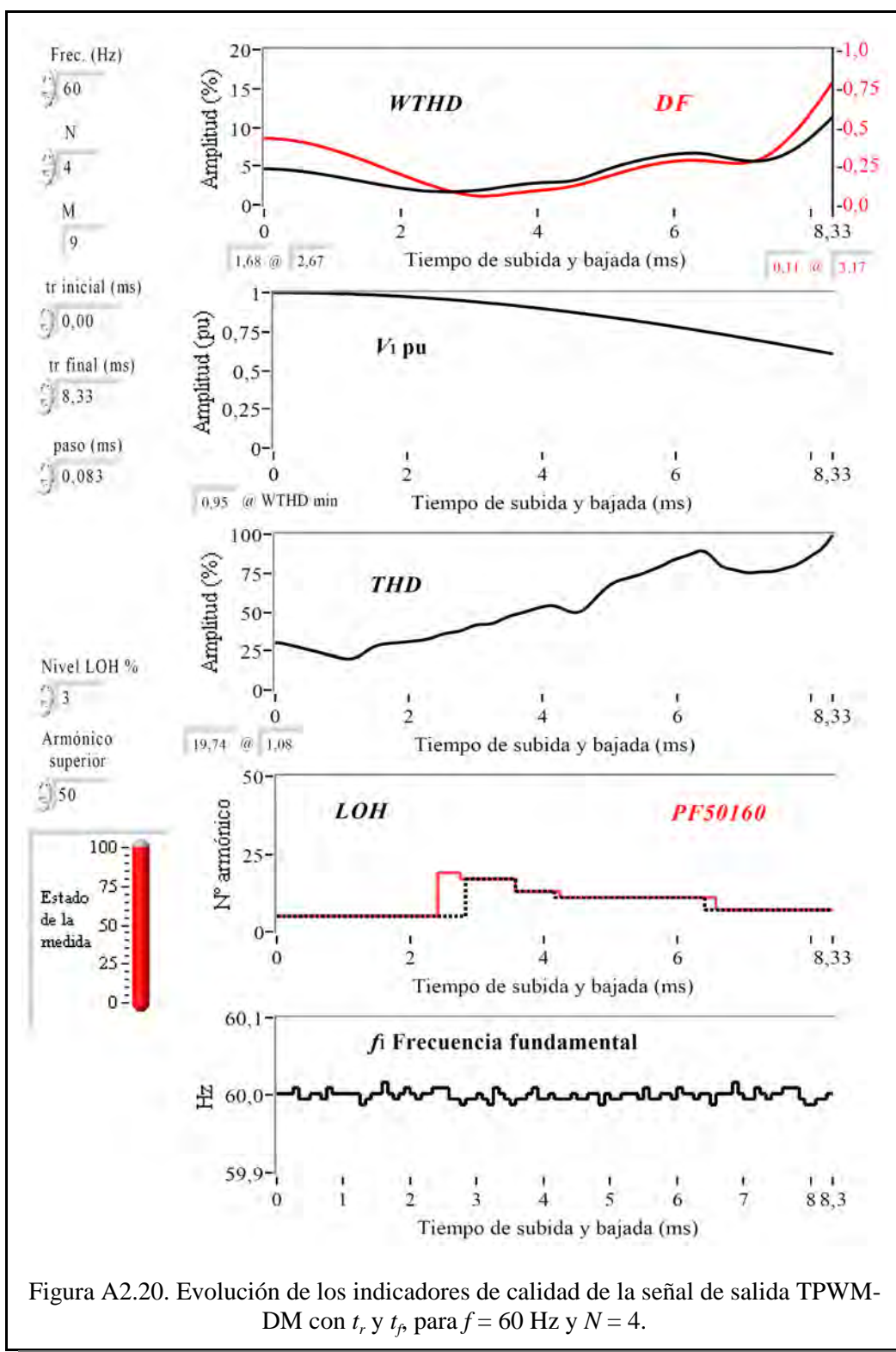


Figura A2.20. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 60$ Hz y $N = 4$.

$f=60\text{Hz}, N=4$

PF 50160										PF 50161												
t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	f_1 (Hz)	t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	f_1 (Hz)	t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	f_1 (Hz)		
0,00	4,64	0,86	30,02	1,00	5	60,00	2,83	1,70	0,15	38,62	0,95	5	17	59,99	5,66	6,04	0,51	77,52	0,80	11	60,00	
0,08	4,63	0,86	29,78	1,00	5	60,00	2,92	1,74	0,14	40,21	0,94	17	17	60,00	5,75	6,17	0,53	79,02	0,80	11	60,00	
0,17	4,60	0,85	29,14	1,00	5	60,00	3,00	1,78	0,13	41,41	0,94	17	17	60,00	5,83	6,29	0,54	80,75	0,79	11	60,00	
0,25	4,56	0,85	28,29	1,00	5	60,00	3,08	1,83	0,12	41,77	0,94	17	17	60,00	5,91	6,40	0,55	82,61	0,79	11	60,00	
0,33	4,51	0,84	27,41	1,00	5	60,01	3,17	1,88	0,11	41,81	0,93	17	17	60,00	6,00	6,49	0,56	84,13	0,78	11	60,00	
0,42	4,44	0,83	26,46	1,00	5	60,00	3,25	1,97	0,11	42,43	0,93	17	17	59,99	6,08	6,56	0,57	85,18	0,77	11	60,01	
0,50	4,36	0,82	25,56	1,00	5	60,00	3,33	2,07	0,12	43,85	0,93	17	17	60,01	6,16	6,62	0,57	86,30	0,77	11	60,00	
0,58	4,28	0,80	24,69	1,00	5	60,00	3,42	2,18	0,12	45,63	0,92	17	17	60,00	6,25	6,65	0,57	87,81	0,76	11	60,00	
0,67	4,18	0,79	23,79	1,00	5	60,00	3,50	2,30	0,13	47,12	0,92	17	17	60,00	6,33	6,66	0,57	89,19	0,76	11	60,00	
0,75	4,07	0,77	22,88	1,00	5	60,00	3,58	2,41	0,14	48,16	0,92	17	17	59,99	6,41	6,61	0,57	88,98	0,75	11	60,00	
0,83	3,96	0,75	21,99	1,00	5	60,01	3,67	2,51	0,15	49,08	0,91	13	13	60,00	6,50	6,53	0,57	86,72	0,74	7	60,00	
0,92	3,84	0,73	21,10	0,99	5	60,00	3,75	2,60	0,16	50,06	0,91	13	13	60,00	6,58	6,40	0,56	82,86	0,74	7	11	59,99
1,00	3,71	0,71	20,28	0,99	5	60,00	3,83	2,68	0,17	51,14	0,91	13	13	60,00	6,66	6,25	0,55	79,52	0,73	7	7	60,00
1,08	3,58	0,69	19,74	0,99	5	60,00	3,92	2,75	0,17	52,20	0,90	13	13	60,01	6,75	6,11	0,54	77,93	0,73	7	7	60,00
1,17	3,45	0,67	20,10	0,99	5	60,00	4,00	2,81	0,18	53,20	0,90	13	13	60,00	6,83	5,97	0,54	77,30	0,72	7	7	60,00
1,25	3,31	0,64	21,46	0,99	5	60,00	4,08	2,86	0,19	53,93	0,89	13	13	60,00	6,91	5,84	0,53	76,50	0,71	7	7	60,02
1,33	3,18	0,61	23,82	0,99	5	59,99	4,17	2,88	0,19	53,86	0,89	13	13	60,00	7,00	5,74	0,54	75,48	0,71	7	7	60,00
1,42	3,05	0,59	26,19	0,99	5	60,00	4,25	2,91	0,20	52,90	0,88	11	13	60,00	7,08	5,66	0,54	75,00	0,70	7	7	60,00
1,50	2,92	0,56	27,94	0,99	5	60,00	4,33	2,93	0,21	51,29	0,88	11	11	60,00	7,16	5,63	0,56	75,27	0,70	7	7	60,00
1,58	2,79	0,53	28,93	0,98	5	60,00	4,41	2,99	0,22	49,77	0,88	11	11	60,01	7,25	5,64	0,58	75,68	0,69	7	7	60,01
1,67	2,65	0,50	29,44	0,98	5	60,02	4,50	3,09	0,24	49,33	0,87	11	11	60,00	7,33	5,71	0,61	75,86	0,68	7	7	60,00
1,75	2,52	0,48	29,77	0,98	5	60,00	4,58	3,24	0,25	50,46	0,87	11	11	60,00	7,41	5,84	0,66	75,88	0,68	7	7	60,00
1,83	2,39	0,45	30,08	0,98	5	60,00	4,66	3,43	0,27	53,08	0,86	11	11	60,00	7,50	6,05	0,71	76,45	0,67	7	7	60,00
1,92	2,27	0,42	30,42	0,98	5	60,00	4,75	3,67	0,29	56,68	0,86	11	11	60,00	7,58	6,32	0,77	77,51	0,66	7	7	60,00
2,00	2,16	0,39	30,74	0,97	5	60,01	4,83	3,93	0,31	60,56	0,85	11	11	60,00	7,66	6,64	0,83	78,54	0,66	7	7	60,01
2,08	2,05	0,36	31,15	0,97	5	60,00	4,91	4,19	0,33	64,15	0,85	11	11	59,99	7,75	7,03	0,91	79,57	0,65	7	7	60,01
2,17	1,95	0,34	31,57	0,97	5	60,00	5,00	4,45	0,35	66,99	0,84	11	11	60,00	7,83	7,49	0,99	81,13	0,65	7	7	60,01
2,25	1,87	0,31	32,13	0,97	5	60,00	5,08	4,70	0,38	69,10	0,84	11	11	60,00	7,91	8,00	1,08	83,29	0,64	7	7	60,00
2,33	1,80	0,28	33,03	0,96	5	60,00	5,16	4,94	0,40	70,56	0,83	11	11	60,00	8,00	8,58	1,17	85,69	0,63	7	7	59,99
2,42	1,75	0,26	34,25	0,96	5	60,01	5,25	5,15	0,42	71,54	0,83	11	11	60,00	8,08	9,20	1,27	87,90	0,63	7	7	59,99
2,50	1,71	0,24	35,56	0,96	5	60,01	5,33	5,35	0,44	72,37	0,82	11	11	60,00	8,16	9,86	1,37	90,47	0,62	7	7	60,00
2,58	1,69	0,21	36,41	0,96	5	60,01	5,41	5,54	0,46	73,40	0,82	11	11	60,00	8,25	10,58	1,47	94,31	0,61	7	7	60,00
2,67	1,68	0,19	36,83	0,95	5	60,00	5,50	5,72	0,48	74,68	0,81	11	11	60,00	8,33	11,34	1,58	99,35	0,61	7	7	60,00
2,75	1,68	0,17	37,38	0,95	5	60,00	5,58	5,88	0,50	76,06	0,81	11	11	60,01								

Tabla A2.20. Valores numéricos de la figura A2.20.

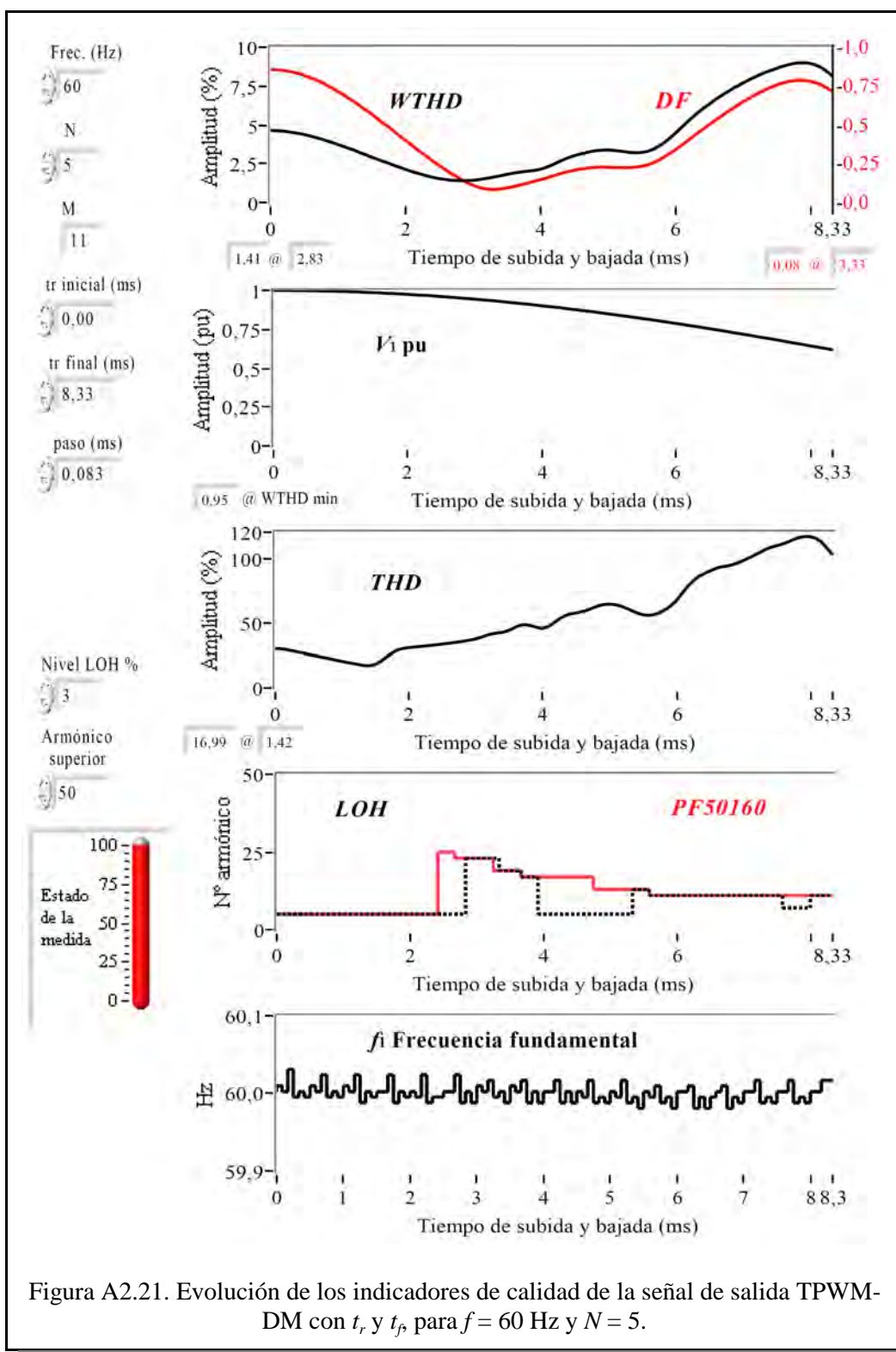


Figura A2.21. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 60$ Hz y $N = 5$.

$f=60\text{Hz}$, $N=5$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,02	1,00	5	5	60,00
0,08	4,63	0,86	29,79	1,00	5	5	60,01
0,17	4,60	0,85	29,18	1,00	5	5	60,00
0,25	4,57	0,85	28,42	1,00	5	5	60,03
0,33	4,51	0,84	27,45	1,00	5	5	60,00
0,42	4,45	0,83	26,58	1,00	5	5	60,00
0,50	4,37	0,82	25,67	1,00	5	5	60,00
0,58	4,29	0,81	24,79	1,00	5	5	60,01
0,67	4,19	0,79	23,91	1,00	5	5	60,00
0,75	4,10	0,78	23,09	1,00	5	5	60,02
0,83	3,98	0,76	22,14	1,00	5	5	60,00
0,92	3,86	0,74	21,29	0,99	5	5	60,00
1,00	3,74	0,72	20,40	0,99	5	5	60,00
1,08	3,61	0,69	19,55	0,99	5	5	60,01
1,17	3,48	0,67	18,69	0,99	5	5	60,00
1,25	3,35	0,65	17,91	0,99	5	5	60,02
1,33	3,20	0,62	17,12	0,99	5	5	59,99
1,42	3,06	0,60	16,99	0,99	5	5	60,00
1,50	2,92	0,57	18,04	0,99	5	5	60,00
1,58	2,78	0,54	20,46	0,98	5	5	60,00
1,67	2,65	0,51	23,70	0,98	5	5	60,00
1,75	2,53	0,49	26,62	0,98	5	5	60,02
1,83	2,39	0,46	28,97	0,98	5	5	59,99
1,92	2,27	0,43	30,15	0,98	5	5	60,00
2,00	2,14	0,40	30,76	0,97	5	5	60,00
2,08	2,02	0,37	31,15	0,97	5	5	60,00
2,17	1,90	0,34	31,57	0,97	5	5	60,00
2,25	1,80	0,32	31,97	0,97	5	5	60,02
2,33	1,70	0,29	32,46	0,97	5	5	59,99
2,42	1,62	0,26	32,94	0,96	5	5	60,00
2,50	1,55	0,24	33,45	0,96	5	25	60,00
2,58	1,49	0,21	33,94	0,96	5	25	60,00
2,67	1,45	0,19	34,52	0,96	5	25	60,00
2,75	1,42	0,17	35,09	0,95	5	23	60,02

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
2,83	1,41	0,15	35,75	0,95	5	23	59,99
2,92	1,41	0,13	36,44	0,95	23	23	60,00
3,00	1,47	0,11	37,40	0,94	23	23	59,99
3,08	1,43	0,10	38,74	0,94	23	23	60,01
3,17	1,53	0,09	40,28	0,94	23	23	60,00
3,25	1,59	0,08	41,42	0,93	23	23	60,02
3,33	1,66	0,08	42,04	0,93	23	19	60,00
3,42	1,73	0,09	42,67	0,93	19	19	60,00
3,50	1,81	0,09	44,01	0,92	19	19	59,99
3,58	1,88	0,10	46,06	0,92	19	19	60,01
3,67	1,95	0,11	47,93	0,92	19	19	60,00
3,75	1,99	0,12	48,51	0,91	17	17	60,02
3,83	2,03	0,13	47,63	0,91	17	17	59,99
3,92	2,07	0,14	46,18	0,91	17	17	60,00
4,00	2,14	0,15	45,59	0,90	5	17	59,99
4,08	2,25	0,16	46,86	0,90	5	17	60,00
4,17	2,41	0,17	49,71	0,89	5	17	60,00
4,25	2,57	0,18	52,79	0,89	5	17	60,02
4,33	2,74	0,19	55,33	0,88	5	17	59,99
4,41	2,88	0,20	56,73	0,88	5	17	60,00
4,50	3,00	0,21	57,51	0,88	5	17	59,99
4,58	3,11	0,21	58,37	0,87	5	17	60,00
4,66	3,20	0,22	59,69	0,87	5	17	60,00
4,75	3,28	0,22	61,28	0,86	5	17	60,02
4,83	3,34	0,23	62,93	0,86	5	13	59,99
4,91	3,37	0,23	63,97	0,85	5	13	60,00
5,00	3,38	0,23	64,31	0,85	5	13	59,99
5,08	3,36	0,23	63,93	0,84	5	13	60,00
5,16	3,32	0,22	62,76	0,84	5	13	60,00
5,25	3,27	0,22	61,12	0,83	5	13	60,02
5,33	3,23	0,23	59,14	0,83	5	13	59,99
5,41	3,21	0,23	57,38	0,82	13	13	60,00
5,50	3,22	0,23	56,04	0,82	13	13	59,98
5,58	3,29	0,24	55,52	0,81	13	13	60,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
5,66	3,42	0,25	56,14	0,81	11	11	60,00
5,75	3,60	0,27	57,70	0,80	11	11	60,01
5,83	3,86	0,29	60,12	0,80	11	11	59,99
5,91	4,14	0,31	63,05	0,79	11	11	60,00
6,00	4,45	0,34	67,15	0,79	11	11	59,98
6,08	4,79	0,37	72,48	0,78	11	11	60,00
6,16	5,14	0,39	78,00	0,78	11	11	60,00
6,25	5,46	0,42	82,52	0,77	11	11	60,01
6,33	5,78	0,45	85,68	0,76	11	11	59,98
6,41	6,07	0,47	87,85	0,76	11	11	60,00
6,50	6,33	0,50	89,84	0,75	11	11	59,98
6,58	6,59	0,53	91,72	0,75	11	11	60,00
6,66	6,83	0,55	93,06	0,74	11	11	60,00
6,75	7,06	0,58	93,71	0,74	11	11	60,01
6,83	7,28	0,60	94,63	0,73	11	11	59,98
6,91	7,49	0,62	96,12	0,72	11	11	60,00
7,00	7,69	0,65	98,09	0,72	11	11	59,99
7,08	7,88	0,67	100,11	0,71	11	11	60,00
7,16	8,05	0,69	102,13	0,71	11	11	60,00
7,25	8,21	0,71	104,31	0,70	11	11	60,02
7,33	8,37	0,73	106,64	0,69	11	11	59,99
7,41	8,51	0,74	108,31	0,69	11	11	60,00
7,50	8,64	0,76	109,45	0,68	11	11	59,99
7,58	8,76	0,77	110,67	0,67	11	11	60,00
7,66	8,86	0,78	112,36	0,67	7	11	60,00
7,75	8,94	0,78	114,20	0,66	7	11	60,02
7,83	8,99	0,79	115,72	0,66	7	11	59,99
7,91	9,00	0,79	116,50	0,65	7	11	60,00
8,00	8,96	0,78	116,41	0,64	7	11	59,99
8,08	8,86	0,77	115,27	0,64	11	11	60,00
8,16	8,69	0,76	112,30	0,63	11	11	60,00
8,25	8,43	0,74	107,55	0,62	11	11	60,02
8,33	8,14	0,71	102,47	0,62	11	11	60,02

Tabla A2.21. Valores numéricos de la figura A2.21.

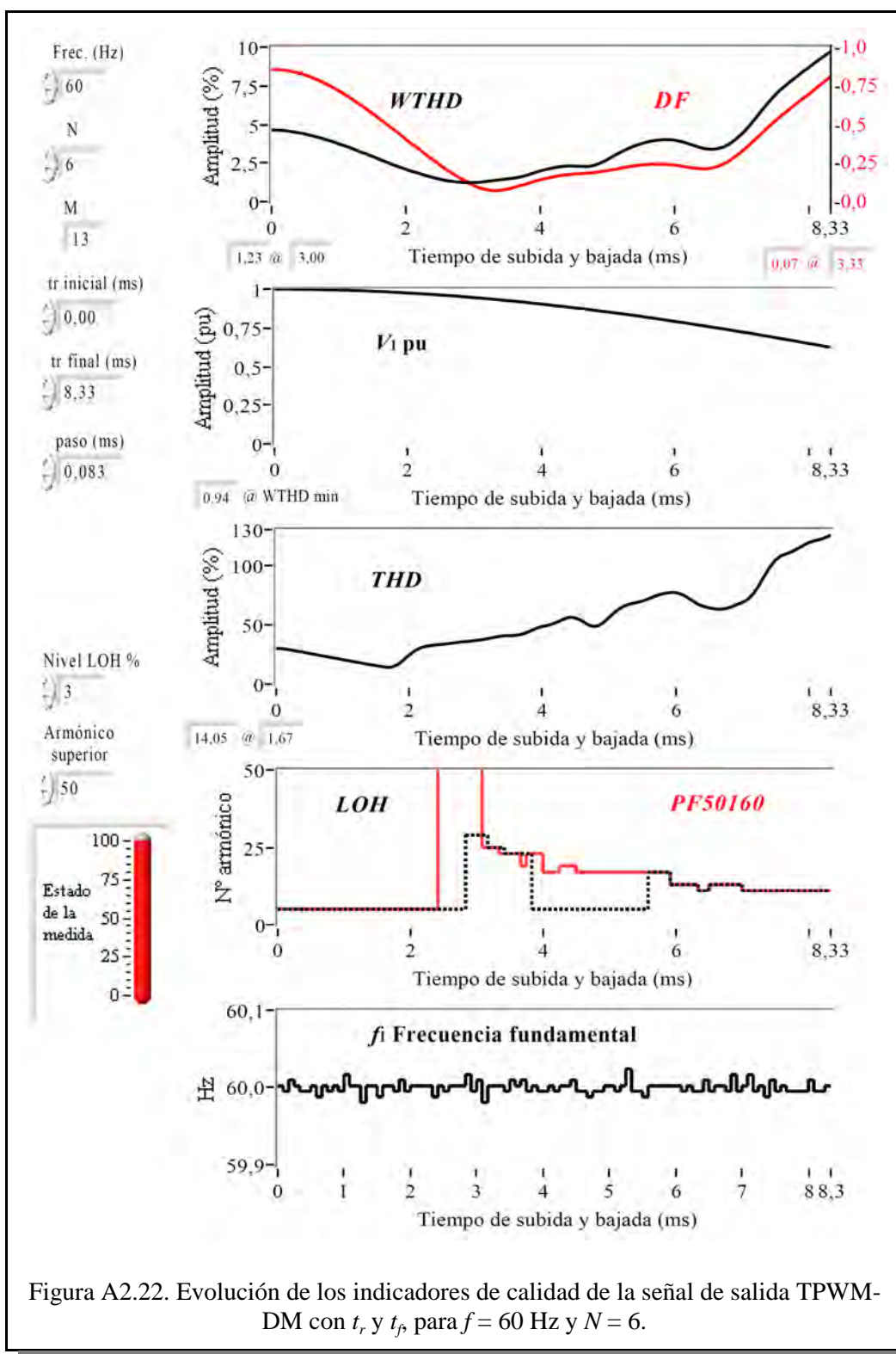


Figura A2.22. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 60$ Hz y $N = 6$.

$f_s=60\text{Hz}$, $N=6$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
0.00	4.64	0.86	30.02	1.00	5	5	60.00
0.08	4.63	0.86	29.79	1.00	5	5	60.00
0.17	4.61	0.85	29.19	1.00	5	5	60.00
0.25	4.57	0.85	28.40	1.00	5	5	60.01
0.33	4.51	0.84	27.49	1.00	5	5	60.00
0.42	4.45	0.83	26.59	1.00	5	5	60.00
0.50	4.38	0.82	25.72	1.00	5	5	60.00
0.58	4.30	0.81	24.89	1.00	5	5	60.00
0.67	4.19	0.79	23.94	1.00	5	5	59.99
0.75	4.10	0.78	23.14	1.00	5	5	60.00
0.83	3.99	0.76	22.21	1.00	5	5	60.00
0.92	3.88	0.74	21.40	0.99	5	5	60.00
1.00	3.75	0.72	20.49	0.99	5	5	60.00
1.08	3.63	0.70	19.66	0.99	5	5	60.02
1.17	3.50	0.67	18.82	0.99	5	5	60.00
1.25	3.36	0.65	17.96	0.99	5	5	60.00
1.33	3.22	0.62	17.08	0.99	5	5	59.98
1.42	3.08	0.60	16.27	0.99	5	5	60.00
1.50	2.94	0.57	15.48	0.99	5	5	60.00
1.58	2.79	0.55	14.62	0.98	5	5	59.99
1.67	2.64	0.52	14.05	0.98	5	5	60.00
1.75	2.50	0.49	14.40	0.98	5	5	60.00
1.83	2.36	0.46	16.50	0.98	5	5	60.00
1.92	2.23	0.43	20.12	0.98	5	5	60.01
2.00	2.10	0.40	24.33	0.98	5	5	60.00
2.08	1.98	0.38	27.97	0.97	5	5	60.00
2.17	1.88	0.35	30.34	0.97	5	5	60.00
2.25	1.76	0.32	31.74	0.97	5	5	60.00
2.33	1.65	0.29	32.44	0.97	5	5	60.00
2.42	1.55	0.27	32.93	0.96	5	5	59.99
2.50	1.46	0.24	33.41	0.96	5	60	60.00
2.58	1.39	0.22	33.93	0.96	5	60	60.00
2.67	1.33	0.19	34.47	0.96	5	60	60.00
2.75	1.28	0.17	35.07	0.95	5	60	60.00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
2.83	1.25	0.15	35.65	0.95	5	60	60.00
2.92	1.23	0.13	36.13	0.95	29	60	60.02
3.00	1.23	0.11	36.63	0.94	29	60	60.00
3.08	1.25	0.09	37.15	0.94	29	60	60.01
3.17	1.28	0.08	37.93	0.94	29	25	59.98
3.25	1.33	0.07	38.85	0.94	25	25	60.00
3.33	1.38	0.07	39.83	0.93	25	25	60.00
3.42	1.42	0.07	40.48	0.93	25	23	60.00
3.50	1.46	0.08	40.72	0.93	23	23	60.00
3.58	1.50	0.09	40.82	0.92	23	23	60.01
3.67	1.57	0.10	41.46	0.92	23	23	60.00
3.75	1.64	0.11	42.80	0.91	23	19	60.01
3.83	1.75	0.12	44.92	0.91	23	23	60.00
3.92	1.87	0.13	46.94	0.91	5	23	60.00
4.00	1.98	0.14	48.39	0.90	5	23	60.00
4.08	2.07	0.15	49.32	0.90	5	17	60.00
4.17	2.16	0.16	50.69	0.90	5	17	60.00
4.25	2.23	0.16	52.66	0.89	5	17	60.00
4.33	2.28	0.17	54.78	0.89	5	19	60.00
4.41	2.31	0.17	56.18	0.88	5	19	60.00
4.50	2.31	0.18	55.70	0.88	5	19	60.01
4.58	2.29	0.18	53.60	0.87	5	17	60.00
4.66	2.27	0.18	50.64	0.87	5	17	60.00
4.75	2.29	0.19	48.52	0.87	5	17	59.99
4.83	2.37	0.19	48.76	0.86	5	17	60.00
4.91	2.52	0.20	51.50	0.86	5	17	60.00
5.00	2.70	0.20	55.58	0.85	5	17	60.00
5.08	2.90	0.21	59.96	0.85	5	17	60.00
5.16	3.11	0.21	63.54	0.84	5	17	60.00
5.25	3.30	0.22	66.06	0.84	5	17	60.00
5.33	3.47	0.23	67.54	0.83	5	17	60.02
5.41	3.61	0.23	68.55	0.83	5	17	60.00
5.50	3.73	0.24	69.65	0.82	5	17	60.00
5.58	3.84	0.24	71.38	0.82	5	17	59.99

Tabla A2.22. Valores numéricos de la figura A2.22.

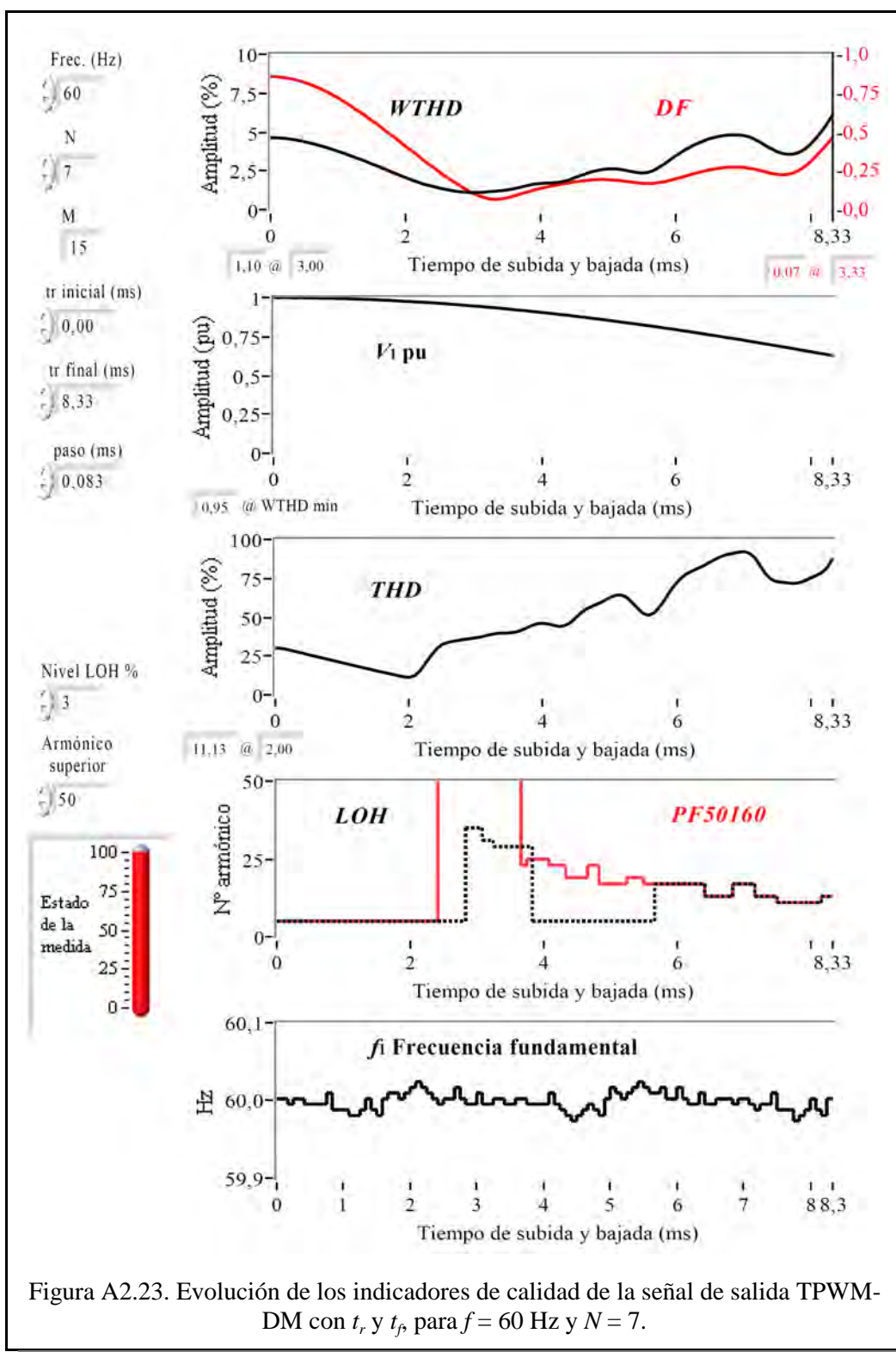


Figura A2.23. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 60$ Hz y $N = 7$.

$f_s=60 \text{ Hz}, N=7$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,02	1,00	5	5	60,00
0,08	4,63	0,86	29,80	1,00	5	5	60,00
0,17	4,61	0,85	29,21	1,00	5	5	60,00
0,25	4,57	0,85	28,38	1,00	5	5	60,00
0,33	4,52	0,84	27,51	1,00	5	5	60,00
0,42	4,46	0,83	26,66	1,00	5	5	60,00
0,50	4,38	0,82	25,75	1,00	5	5	60,00
0,58	4,29	0,81	24,85	1,00	5	5	60,00
0,67	4,20	0,79	24,02	1,00	5	5	60,00
0,75	4,10	0,78	23,13	1,00	5	5	60,00
0,83	4,00	0,76	22,32	1,00	5	5	60,01
0,92	3,88	0,74	21,42	0,99	5	5	59,99
1,00	3,76	0,72	20,56	0,99	5	5	59,99
1,08	3,63	0,70	19,70	0,99	5	5	59,99
1,17	3,50	0,67	18,83	0,99	5	5	59,98
1,25	3,37	0,65	18,01	0,99	5	5	59,98
1,33	3,23	0,63	17,16	0,99	5	5	59,99
1,42	3,10	0,60	16,39	0,99	5	5	60,00
1,50	2,95	0,57	15,50	0,99	5	5	59,99
1,58	2,81	0,55	14,71	0,98	5	5	59,98
1,67	2,66	0,52	13,90	0,98	5	5	60,00
1,75	2,51	0,49	13,10	0,98	5	5	60,01
1,83	2,37	0,47	12,33	0,98	5	5	60,01
1,92	2,21	0,44	11,48	0,98	5	5	60,00
2,00	2,07	0,41	11,13	0,98	5	5	60,01
2,08	1,93	0,38	12,13	0,97	5	5	60,02
2,17	1,81	0,36	15,31	0,97	5	5	60,02
2,25	1,68	0,32	20,36	0,97	5	5	60,02
2,33	1,58	0,30	25,31	0,97	5	5	60,01
2,42	1,49	0,27	29,61	0,96	5	5	60,00
2,50	1,40	0,24	32,33	0,96	5	60	60,00
2,58	1,32	0,22	33,71	0,96	5	60	60,00
2,67	1,25	0,19	34,45	0,96	5	60	60,00
2,75	1,19	0,17	34,98	0,95	5	60	60,02

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
2,83	1,14	0,15	35,59	0,95	5	60	60,00
2,92	1,11	0,13	36,12	0,95	35	60	60,00
3,00	1,10	0,11	36,62	0,95	35	60	60,00
3,08	1,11	0,09	37,26	0,94	35	60	60,01
3,17	1,13	0,08	38,13	0,94	31	60	60,00
3,25	1,16	0,07	38,96	0,94	31	60	60,00
3,33	1,19	0,07	39,52	0,93	29	60	60,00
3,42	1,22	0,07	39,69	0,93	29	60	60,00
3,50	1,26	0,08	39,71	0,93	29	60	60,00
3,58	1,32	0,08	40,10	0,92	29	60	60,00
3,67	1,40	0,10	41,16	0,92	29	60	60,00
3,75	1,49	0,11	42,75	0,92	29	23	60,00
3,83	1,58	0,12	44,44	0,91	29	25	60,00
3,92	1,65	0,13	45,68	0,91	5	25	60,00
4,00	1,69	0,14	45,99	0,90	5	25	60,00
4,08	1,71	0,14	45,56	0,90	5	25	60,00
4,17	1,72	0,15	44,56	0,90	5	23	60,01
4,25	1,74	0,16	43,88	0,89	5	23	60,00
4,33	1,80	0,17	44,43	0,89	5	23	59,99
4,41	1,89	0,17	46,48	0,88	5	19	59,98
4,50	2,03	0,18	49,81	0,88	5	19	59,97
4,58	2,17	0,18	52,97	0,88	5	19	59,98
4,66	2,30	0,19	55,48	0,87	5	19	59,99
4,75	2,42	0,19	57,15	0,87	5	23	60,00
4,83	2,51	0,19	58,68	0,86	5	23	59,99
4,91	2,58	0,19	60,40	0,86	5	17	59,98
5,00	2,62	0,19	62,38	0,85	5	17	60,02
5,08	2,63	0,19	63,98	0,85	5	17	60,02
5,16	2,61	0,19	64,27	0,84	5	17	60,01
5,25	2,55	0,18	62,86	0,84	5	17	60,00
5,33	2,47	0,18	59,57	0,83	5	19	60,01
5,41	2,40	0,17	55,66	0,83	5	19	60,02
5,50	2,36	0,17	52,39	0,82	5	19	60,02
5,58	2,39	0,17	51,15	0,82	5	17	60,02

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
5,66	2,50	0,17	52,67	0,81	5	17	60,01
5,75	2,69	0,17	56,72	0,81	17	17	60,01
5,83	2,92	0,18	61,85	0,80	17	17	60,02
5,91	3,18	0,19	67,34	0,80	17	17	60,00
6,00	3,44	0,20	72,04	0,79	17	17	60,00
6,08	3,68	0,21	75,61	0,79	17	17	60,02
6,16	3,90	0,22	78,14	0,78	17	17	60,00
6,25	4,10	0,23	79,99	0,78	17	17	60,00
6,33	4,27	0,24	81,55	0,77	17	17	60,00
6,41	4,42	0,25	83,32	0,77	17	17	60,01
6,50	4,55	0,26	85,27	0,76	13	13	60,00
6,58	4,66	0,26	87,22	0,75	13	13	60,00
6,66	4,74	0,27	88,92	0,75	13	13	60,00
6,75	4,79	0,27	90,12	0,74	13	13	60,00
6,83	4,81	0,27	90,91	0,74	13	13	60,00
6,91	4,82	0,27	91,64	0,73	17	17	60,00
7,00	4,79	0,27	92,13	0,73	17	17	60,00
7,08	4,70	0,27	91,31	0,72	17	17	60,00
7,16	4,56	0,26	88,31	0,71	17	17	60,00
7,25	4,37	0,25	83,21	0,71	13	13	59,99
7,33	4,15	0,24	77,85	0,70	13	13	60,00
7,41	3,94	0,23	74,20	0,70	13	13	60,00
7,50	3,75	0,23	72,67	0,69	13	13	60,01
7,58	3,62	0,22	72,32	0,68	11	11	59,99
7,66	3,56	0,23	71,88	0,68	11	11	59,99
7,75	3,57	0,24	71,58	0,67	11	11	59,99
7,83	3,69	0,25	72,03	0,66	11	11	59,97
7,91	3,89	0,28	73,34	0,66	11	11	59,98
8,00	4,19	0,31	74,99	0,65	11	11	59,99
8,08	4,57	0,34	76,56	0,65	11	11	60,00
8,16	5,02	0,38	78,40	0,64	11	11	59,99
8,25	5,52	0,42	81,55	0,63	13	13	59,98
8,33	6,09	0,46	87,64	0,63	13	13	60,00

Tabla A2.23. Valores numéricos de la figura A2.23.

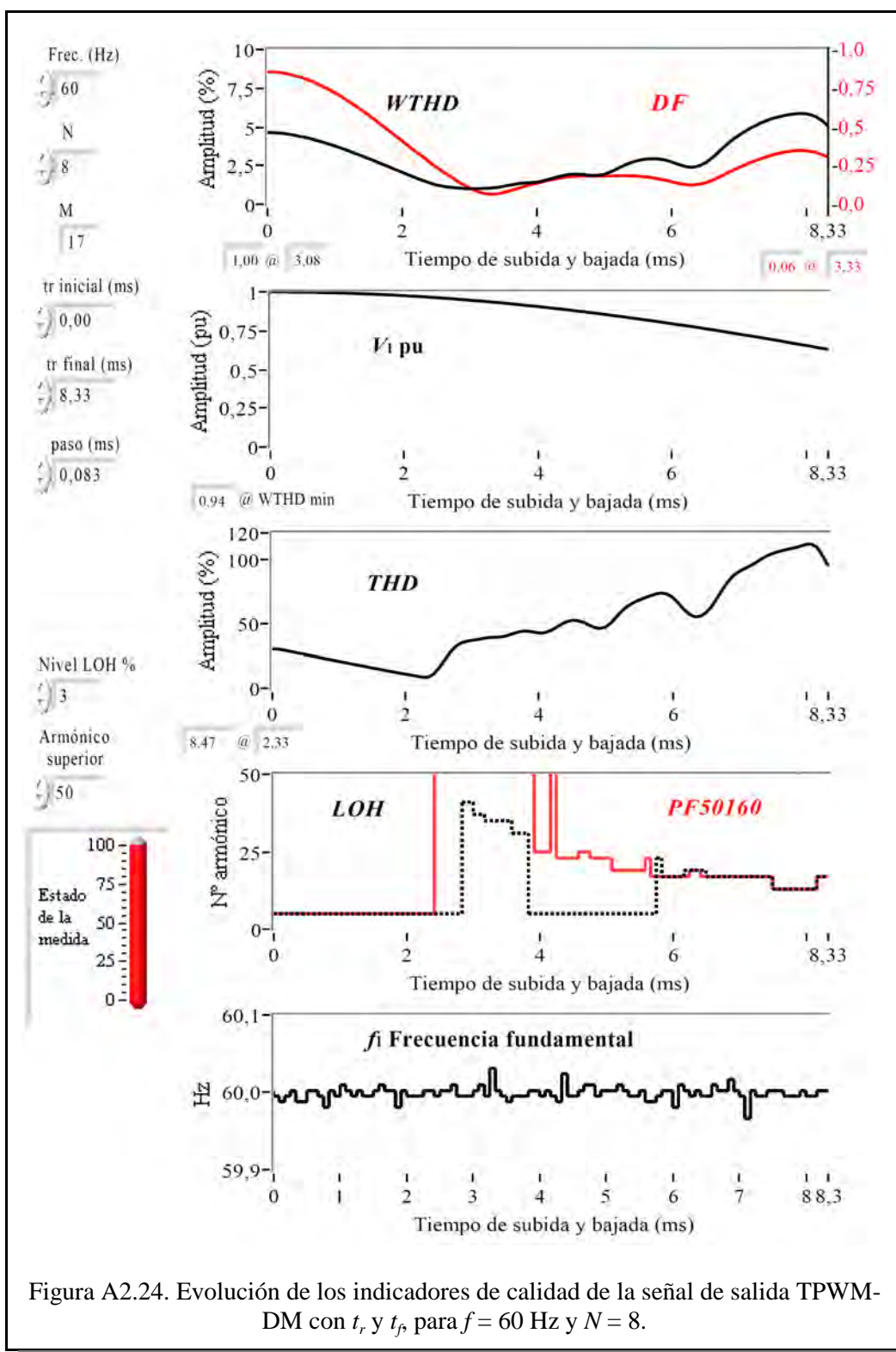


Figura A2.24. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 60$ Hz y $N = 8$.

$f_s=60 \text{ Hz}, N=8$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
0.00	4.64	0.86	30.02	1.00	5	5	60.00
0.08	4.63	0.86	29.79	1.00	5	5	60.00
0.17	4.60	0.85	29.18	1.00	5	5	59.99
0.25	4.57	0.85	28.35	1.00	5	5	60.00
0.33	4.52	0.84	27.54	1.00	5	5	60.00
0.42	4.45	0.83	26.60	1.00	5	5	59.99
0.50	4.38	0.82	25.75	1.00	5	5	59.99
0.58	4.30	0.81	24.91	1.00	5	5	60.00
0.67	4.21	0.79	24.05	1.00	5	5	60.00
0.75	4.11	0.78	23.17	1.00	5	5	60.00
0.83	4.00	0.76	22.28	1.00	5	5	59.98
0.92	3.89	0.74	21.48	0.99	5	5	60.00
1.00	3.77	0.72	20.62	0.99	5	5	60.00
1.08	3.65	0.70	19.81	0.99	5	5	60.01
1.17	3.52	0.68	18.93	0.99	5	5	60.00
1.25	3.38	0.65	18.05	0.99	5	5	60.00
1.33	3.25	0.63	17.29	0.99	5	5	60.00
1.42	3.11	0.60	16.43	0.99	5	5	60.00
1.50	2.96	0.58	15.58	0.99	5	5	60.00
1.58	2.82	0.55	14.80	0.98	5	5	60.00
1.67	2.67	0.52	13.94	0.98	5	5	60.01
1.75	2.52	0.50	13.12	0.98	5	5	60.00
1.83	2.37	0.47	12.33	0.98	5	5	60.00
1.92	2.22	0.44	11.52	0.98	5	5	59.98
2.00	2.08	0.41	10.75	0.98	5	5	60.00
2.08	1.93	0.38	10.02	0.97	5	5	60.00
2.17	1.78	0.35	9.27	0.97	5	5	60.00
2.25	1.64	0.33	8.48	0.97	5	5	60.00
2.33	1.51	0.30	8.47	0.97	5	5	60.00
2.42	1.38	0.27	10.58	0.96	5	5	60.00
2.50	1.26	0.24	15.41	0.96	5	60	60.00
2.58	1.18	0.22	21.47	0.96	5	60	60.00
2.67	1.13	0.19	27.26	0.96	5	60	60.00
2.75	1.09	0.17	31.83	0.95	5	60	60.01
5.66	2.94	0.18	71.13	0.82	5	23	59.99
5.75	2.95	0.17	72.52	0.81	5	17	59.99
5.83	2.92	0.16	73.28	0.81	23	17	60.00
5.91	2.86	0.16	72.61	0.80	17	17	60.00
6.00	2.75	0.15	70.11	0.79	17	17	60.00
6.08	2.62	0.14	65.89	0.79	17	17	59.98
6.16	2.49	0.13	60.88	0.78	17	17	60.01
6.25	2.41	0.13	56.99	0.78	19	17	60.00
6.33	2.40	0.13	54.87	0.77	19	19	60.00
6.41	2.48	0.13	55.23	0.77	19	19	60.00
6.50	2.65	0.14	57.86	0.76	19	17	60.00
6.58	2.91	0.15	62.54	0.76	17	17	60.00
6.66	3.22	0.17	68.96	0.75	17	17	60.01
6.75	3.55	0.18	75.89	0.75	17	17	60.00
6.83	3.88	0.20	82.21	0.74	17	17	60.00
6.91	4.18	0.22	86.94	0.73	17	17	60.02
7.00	4.44	0.24	90.01	0.73	17	17	60.00
7.08	4.67	0.25	92.25	0.72	17	17	60.00
7.16	4.88	0.27	94.36	0.72	17	17	59.97
7.25	5.07	0.28	96.87	0.71	17	17	60.00
7.33	5.25	0.29	99.68	0.70	17	17	60.00
7.41	5.41	0.31	102.12	0.70	17	17	60.00
7.50	5.54	0.32	103.87	0.69	17	17	60.00
7.58	5.64	0.33	105.26	0.69	13	13	60.00
7.66	5.73	0.34	106.42	0.68	13	13	60.00
7.75	5.80	0.34	107.43	0.67	13	13	60.00
7.83	5.84	0.35	108.35	0.67	13	13	60.00
7.91	5.87	0.35	109.60	0.66	13	13	60.00
8.00	5.86	0.35	110.97	0.66	13	13	60.00
8.08	5.79	0.34	111.31	0.65	13	13	60.00
8.16	5.64	0.33	108.77	0.64	13	13	60.00
8.25	5.39	0.32	102.55	0.64	17	17	60.00
8.33	5.07	0.30	94.46	0.63	17	17	60.00
2.83	1.06	0.15	34.66	0.95	5	60	60.00
2.92	1.03	0.13	35.96	0.95	41	60	60.00
3.00	1.01	0.11	36.62	0.95	41	60	60.00
3.08	1.00	0.09	37.29	0.94	37	60	60.00
3.17	1.02	0.08	38.15	0.94	37	60	60.01
3.25	1.03	0.07	38.79	0.94	35	60	60.00
3.33	1.06	0.06	39.00	0.93	35	60	60.03
3.42	1.09	0.07	39.19	0.93	35	60	60.00
3.50	1.15	0.07	39.90	0.93	35	60	60.00
3.58	1.22	0.08	41.27	0.92	35	60	59.99
3.67	1.29	0.09	42.72	0.92	31	60	60.00
3.75	1.34	0.11	43.67	0.92	31	60	60.00
3.83	1.38	0.12	43.74	0.91	31	60	60.00
3.92	1.40	0.13	43.02	0.91	5	60	60.00
4.00	1.43	0.14	42.31	0.91	5	25	60.00
4.08	1.49	0.14	42.46	0.90	5	25	60.00
4.17	1.58	0.15	43.89	0.90	5	25	60.00
4.25	1.69	0.16	46.32	0.89	5	60	60.00
4.33	1.80	0.17	48.99	0.89	5	23	59.99
4.41	1.88	0.17	51.03	0.89	5	23	60.02
4.50	1.94	0.18	52.18	0.88	5	23	60.00
4.58	1.95	0.18	51.97	0.88	5	23	60.00
4.66	1.93	0.18	50.62	0.87	5	25	60.00
4.75	1.89	0.18	48.52	0.87	5	25	60.01
4.83	1.87	0.18	46.59	0.86	5	23	60.01
4.91	1.88	0.18	45.77	0.86	5	23	60.00
5.00	1.93	0.18	46.89	0.85	5	23	60.00
5.08	2.06	0.18	50.32	0.85	5	23	60.00
5.16	2.22	0.18	54.91	0.85	5	19	60.00
5.25	2.41	0.18	59.62	0.84	5	19	60.01
5.33	2.57	0.18	63.25	0.84	5	19	60.00
5.41	2.71	0.18	65.89	0.83	5	19	60.00
5.50	2.82	0.18	67.85	0.83	5	19	60.00
5.58	2.90	0.18	69.50	0.82	5	19	60.00

Tabla A2.24. Valores numéricos de la figura A2.24.

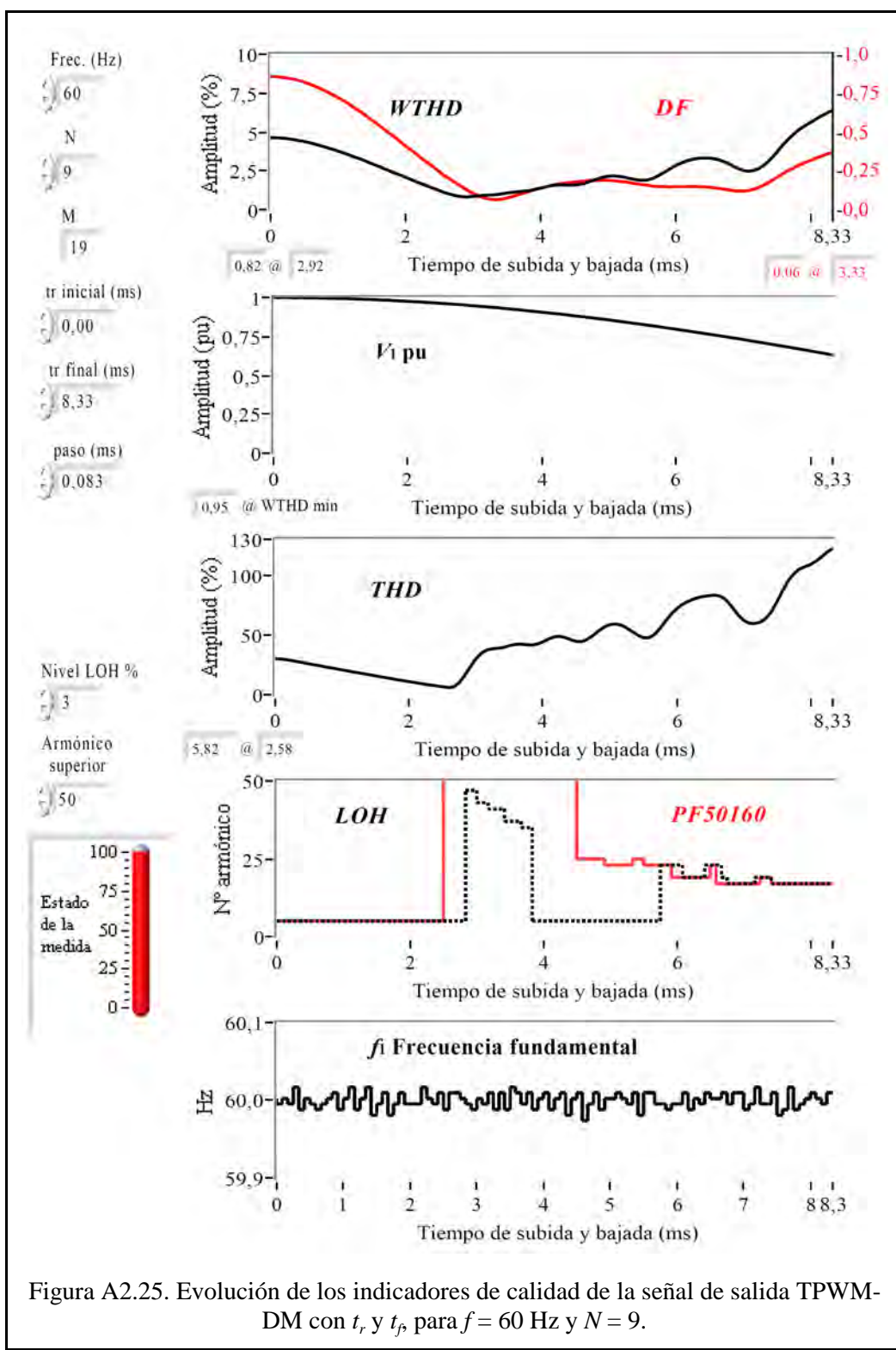


Figura A2.25. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f , para $f = 60$ Hz y $N = 9$.

f=60Hz, N=9

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF ₅₀₁₆₀ (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,02	1,00	5	5	60,00
0,08	4,63	0,86	29,78	1,00	5	5	60,00
0,17	4,61	0,85	29,19	1,00	5	5	60,00
0,25	4,57	0,85	28,37	1,00	5	5	60,00
0,33	4,52	0,84	27,61	1,00	5	5	60,02
0,42	4,45	0,83	26,64	1,00	5	5	59,99
0,50	4,38	0,82	25,79	1,00	5	5	60,00
0,58	4,30	0,81	24,91	1,00	5	5	60,00
0,67	4,21	0,79	24,07	1,00	5	5	59,99
0,75	4,11	0,78	23,20	1,00	5	5	60,00
0,83	4,00	0,76	22,35	1,00	5	5	60,00
0,92	3,89	0,74	21,49	0,99	5	5	60,01
1,00	3,77	0,72	20,63	0,99	5	5	59,99
1,08	3,65	0,70	19,84	0,99	5	5	60,00
1,17	3,52	0,68	18,98	0,99	5	5	60,02
1,25	3,38	0,65	18,10	0,99	5	5	59,99
1,33	3,26	0,63	17,32	0,99	5	5	60,00
1,42	3,12	0,61	16,51	0,99	5	5	60,02
1,50	2,96	0,58	15,58	0,99	5	5	59,98
1,58	2,82	0,55	14,79	0,98	5	5	60,00
1,67	2,68	0,52	14,01	0,98	5	5	60,01
1,75	2,53	0,50	13,16	0,98	5	5	59,98
1,83	2,38	0,47	12,35	0,98	5	5	60,00
1,92	2,24	0,44	11,59	0,98	5	5	60,01
2,00	2,08	0,41	10,79	0,98	5	5	60,00
2,08	1,94	0,38	10,02	0,97	5	5	60,00
2,17	1,79	0,36	9,26	0,97	5	5	60,00
2,25	1,65	0,33	8,48	0,97	5	5	60,02
2,33	1,51	0,30	7,81	0,97	5	5	60,00
2,42	1,37	0,27	7,20	0,96	5	5	60,00
2,50	1,24	0,25	6,56	0,96	5	5	60,01
2,58	1,10	0,22	5,82	0,96	5	60	59,99
2,67	1,00	0,20	5,34	0,96	5	60	60,01
2,75	0,89	0,17	4,76	0,95	5	60	60,01

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF ₅₀₁₆₀ (HO)	f_1 (Hz)
2,83	0,83	0,15	15,89	0,95	5	60	60,00
2,92	0,82	0,13	22,98	0,95	47	60	60,00
3,00	0,85	0,11	29,64	0,95	47	60	59,99
3,08	0,89	0,09	34,67	0,94	43	60	60,00
3,17	0,92	0,08	37,38	0,94	43	60	60,00
3,25	0,93	0,07	38,30	0,94	41	60	60,01
3,33	0,96	0,06	38,72	0,93	41	60	59,99
3,42	1,00	0,07	39,43	0,93	41	60	60,01
3,50	1,06	0,07	40,80	0,93	37	60	59,99
3,58	1,12	0,08	41,93	0,92	37	60	60,02
3,67	1,16	0,09	42,27	0,92	37	60	60,01
3,75	1,19	0,11	41,82	0,92	35	60	60,00
3,83	1,23	0,12	41,44	0,91	35	60	60,01
3,92	1,30	0,13	42,17	0,91	5	60	59,99
4,00	1,38	0,14	43,97	0,91	5	60	60,00
4,08	1,47	0,15	46,40	0,90	5	60	60,01
4,17	1,55	0,16	48,26	0,90	5	60	59,99
4,25	1,58	0,16	48,67	0,89	5	60	60,00
4,33	1,58	0,17	47,69	0,89	5	60	60,01
4,41	1,58	0,17	45,93	0,89	5	60	59,98
4,50	1,58	0,18	44,46	0,88	5	60	60,00
4,58	1,62	0,18	44,32	0,88	5	25	60,01
4,66	1,71	0,19	46,16	0,87	5	25	59,97
4,75	1,83	0,19	49,38	0,87	5	25	60,00
4,83	1,95	0,19	53,04	0,86	5	25	60,01
4,91	2,07	0,19	56,43	0,86	5	25	59,99
5,00	2,14	0,19	58,53	0,86	5	23	60,00
5,08	2,17	0,19	59,14	0,85	5	23	60,00
5,16	2,14	0,18	58,24	0,85	5	23	60,01
5,25	2,08	0,18	55,91	0,84	5	23	60,00
5,33	2,00	0,17	52,95	0,84	5	23	60,00
5,41	1,92	0,17	49,84	0,83	5	25	60,01
5,50	1,89	0,16	47,64	0,83	5	25	59,98
5,58	1,91	0,16	47,46	0,82	5	23	60,01

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF ₅₀₁₆₀ (HO)	f_1 (Hz)
5,66	2,01	0,15	50,14	0,82	5	23	60,01
5,75	2,18	0,15	55,15	0,81	5	23	60,00
5,83	2,39	0,15	61,36	0,81	23	23	60,00
5,91	2,62	0,15	67,20	0,80	23	23	59,99
6,00	2,82	0,15	71,76	0,80	23	19	60,00
6,08	2,99	0,15	75,29	0,79	23	19	60,00
6,16	3,13	0,15	77,81	0,79	19	19	60,01
6,25	3,24	0,15	79,90	0,78	19	19	59,99
6,33	3,30	0,15	81,23	0,77	19	19	60,00
6,41	3,33	0,15	82,27	0,77	19	19	60,00
6,50	3,32	0,14	82,92	0,76	23	19	60,01
6,58	3,28	0,14	83,23	0,76	23	23	60,00
6,66	3,19	0,14	82,10	0,75	23	17	60,00
6,75	3,05	0,13	78,71	0,75	19	17	60,01
6,83	2,86	0,12	72,93	0,74	17	17	60,00
6,91	2,68	0,12	67,00	0,74	17	17	60,01
7,00	2,54	0,12	62,25	0,73	17	17	60,01
7,08	2,47	0,12	59,72	0,72	17	17	59,99
7,16	2,52	0,13	59,44	0,72	17	17	60,00
7,25	2,67	0,14	60,58	0,71	19	17	60,02
7,33	2,92	0,16	63,68	0,71	19	19	60,00
7,41	3,26	0,18	69,12	0,70	19	19	60,00
7,50	3,66	0,21	77,30	0,69	17	17	60,01
7,58	4,09	0,23	86,63	0,69	17	17	59,98
7,66	4,49	0,25	94,84	0,68	17	17	59,99
7,75	4,84	0,27	100,93	0,67	17	17	60,02
7,83	5,14	0,29	104,81	0,67	17	17	59,99
7,91	5,38	0,30	106,94	0,66	17	17	60,00
8,00	5,60	0,32	108,80	0,66	17	17	60,00
8,08	5,82	0,33	111,62	0,65	17	17	60,01
8,16	6,02	0,34	115,21	0,64	17	17	60,00
8,25	6,22	0,36	119,15	0,64	17	17	60,00
8,33	6,40	0,37	122,31	0,63	17	17	60,01

Tabla A2.25. Valores numéricos de la figura A2.25.

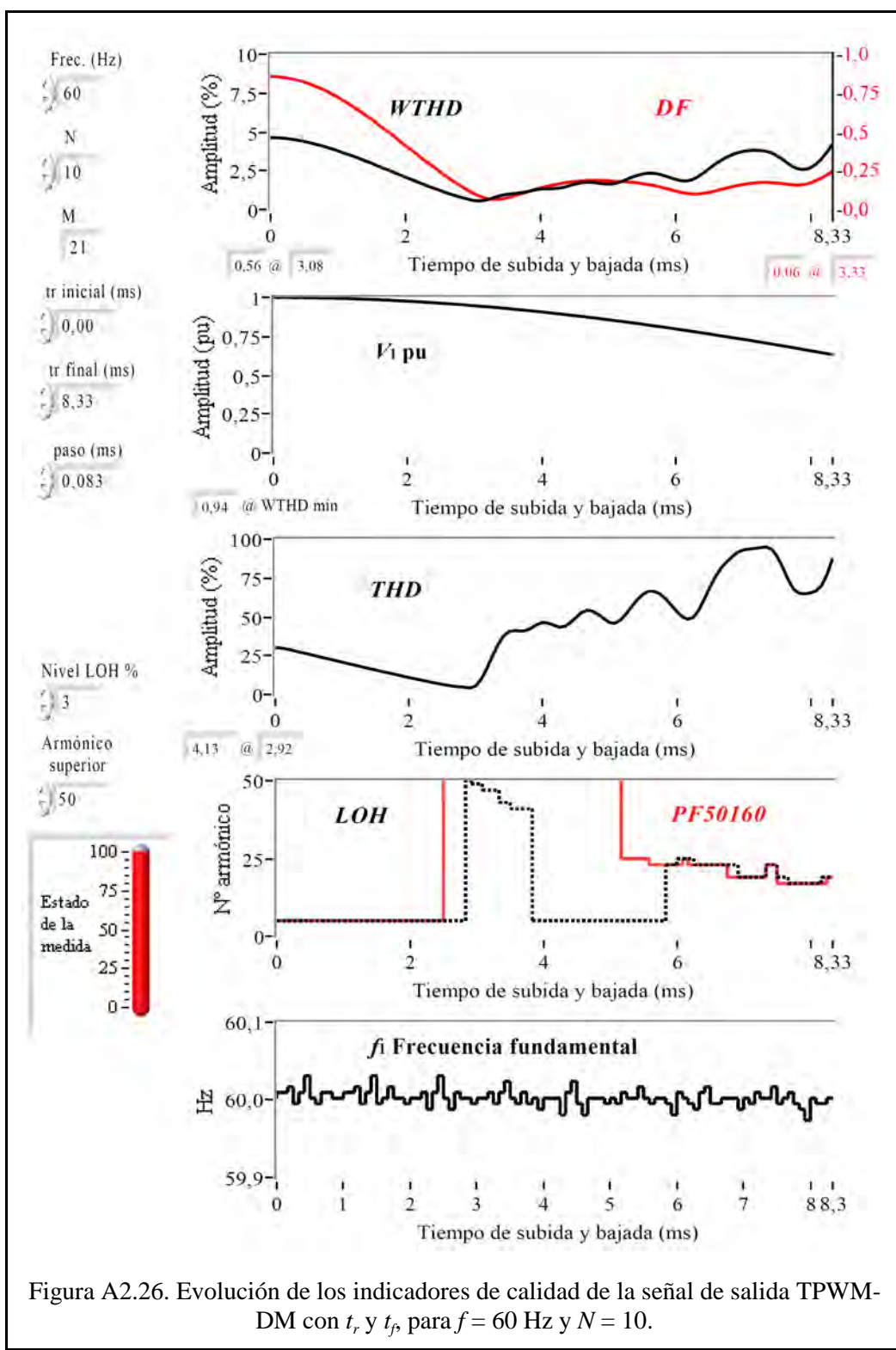


Figura A2.26. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 10$.

$f_s=60\text{Hz}$, $N=10$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,02	1,00	5	5	60,00
0,08	4,63	0,86	29,82	1,00	5	5	60,01
0,17	4,61	0,85	29,25	1,00	5	5	60,01
0,25	4,57	0,85	28,45	1,00	5	5	60,02
0,33	4,52	0,84	27,53	1,00	5	5	60,00
0,42	4,46	0,83	26,71	1,00	5	5	60,01
0,50	4,39	0,82	25,92	1,00	5	5	60,03
0,58	4,30	0,81	24,96	1,00	5	5	60,00
0,67	4,21	0,79	24,07	1,00	5	5	60,00
0,75	4,12	0,78	23,26	1,00	5	5	60,01
0,83	4,01	0,76	22,42	1,00	5	5	60,01
0,92	3,90	0,74	21,54	0,99	5	5	60,00
1,00	3,78	0,72	20,70	0,99	5	5	60,00
1,08	3,65	0,70	19,84	0,99	5	5	60,01
1,17	3,53	0,68	19,00	0,99	5	5	60,01
1,25	3,40	0,66	18,21	0,99	5	5	60,02
1,33	3,26	0,63	17,33	0,99	5	5	60,00
1,42	3,12	0,61	16,50	0,99	5	5	60,01
1,50	2,99	0,58	15,73	0,99	5	5	60,03
1,58	2,83	0,55	14,82	0,98	5	5	60,00
1,67	2,68	0,53	14,04	0,98	5	5	60,00
1,75	2,54	0,50	13,27	0,98	5	5	60,02
1,83	2,39	0,47	12,43	0,98	5	5	60,00
1,92	2,24	0,44	11,60	0,98	5	5	60,00
2,00	2,09	0,41	10,82	0,98	5	5	60,00
2,08	1,95	0,39	10,08	0,97	5	5	60,00
2,17	1,80	0,36	9,31	0,97	5	5	60,00
2,25	1,66	0,33	8,55	0,97	5	5	60,01
2,33	1,51	0,30	7,77	0,97	5	5	59,99
2,42	1,38	0,27	7,11	0,97	5	5	60,01
2,50	1,25	0,25	6,48	0,96	5	5	60,03
2,58	1,11	0,22	5,77	0,96	5	60	60,00
2,67	0,99	0,19	5,23	0,96	5	60	59,99
2,75	0,88	0,17	4,90	0,96	5	60	60,01

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
2,83	0,78	0,15	4,58	0,95	5	60	60,00
2,92	0,68	0,13	4,13	0,95	60	60	60,00
3,00	0,60	0,11	3,33	0,95	49	60	60,00
3,08	0,56	0,09	9,85	0,94	49	60	60,00
3,17	0,58	0,08	16,72	0,94	47	60	60,00
3,25	0,68	0,07	24,68	0,94	47	60	60,01
3,33	0,80	0,06	32,20	0,93	47	60	60,00
3,42	0,90	0,07	37,69	0,93	43	60	60,01
3,50	0,97	0,07	40,42	0,93	43	60	60,02
3,58	1,01	0,08	41,11	0,92	41	60	60,00
3,67	1,05	0,10	40,76	0,92	41	60	60,00
3,75	1,10	0,11	41,10	0,92	41	60	60,01
3,83	1,18	0,12	42,80	0,91	41	60	60,00
3,92	1,26	0,13	44,98	0,91	5	60	60,00
4,00	1,32	0,14	46,25	0,91	5	60	59,99
4,08	1,34	0,15	45,93	0,90	5	60	60,00
4,17	1,35	0,16	44,51	0,90	5	60	60,00
4,25	1,37	0,16	43,32	0,89	5	60	60,00
4,33	1,42	0,17	43,81	0,89	5	60	59,98
4,41	1,52	0,18	46,33	0,89	5	60	60,01
4,50	1,62	0,18	49,60	0,88	5	60	60,02
4,58	1,71	0,18	52,69	0,88	5	60	60,00
4,66	1,76	0,19	54,13	0,87	5	60	59,98
4,75	1,76	0,19	53,61	0,87	5	60	60,00
4,83	1,72	0,19	51,44	0,87	5	60	60,00
4,91	1,67	0,19	48,59	0,86	5	60	60,00
5,00	1,64	0,19	46,23	0,86	5	60	60,00
5,08	1,66	0,18	45,82	0,85	5	60	60,00
5,16	1,74	0,18	47,85	0,85	5	60	60,00
5,25	1,88	0,18	51,88	0,84	5	25	60,01
5,33	2,03	0,18	56,72	0,84	5	25	60,00
5,41	2,17	0,17	61,22	0,83	5	25	60,00
5,50	2,27	0,17	64,47	0,83	5	25	60,02
5,58	2,34	0,16	66,40	0,82	5	25	60,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
5,66	2,34	0,16	66,35	0,82	5	23	60,00
5,75	2,29	0,15	64,68	0,81	5	23	60,00
5,83	2,19	0,14	61,67	0,81	5	23	60,00
5,91	2,07	0,13	57,76	0,80	23	23	60,00
6,00	1,95	0,12	53,62	0,80	23	23	59,98
6,08	1,86	0,11	50,11	0,79	25	23	60,01
6,16	1,84	0,10	48,42	0,79	25	25	60,00
6,25	1,92	0,10	49,58	0,78	25	23	60,00
6,33	2,10	0,10	54,30	0,78	23	23	59,99
6,41	2,36	0,10	61,50	0,77	23	23	60,01
6,50	2,63	0,11	69,06	0,76	23	23	60,02
6,58	2,90	0,12	76,04	0,76	23	23	60,00
6,66	3,14	0,13	81,35	0,75	23	23	60,00
6,75	3,34	0,14	85,36	0,75	23	23	60,00
6,83	3,51	0,15	88,75	0,74	23	19	60,00
6,91	3,65	0,15	91,48	0,74	23	19	60,00
7,00	3,74	0,16	93,03	0,73	19	19	59,99
7,08	3,80	0,17	93,63	0,72	19	19	60,00
7,16	3,82	0,17	93,90	0,72	19	19	60,00
7,25	3,81	0,17	94,44	0,71	19	19	60,01
7,33	3,77	0,18	95,00	0,71	19	19	60,00
7,41	3,67	0,17	93,53	0,70	23	23	60,00
7,50	3,49	0,17	89,15	0,69	23	23	60,02
7,58	3,26	0,17	82,13	0,69	19	17	60,00
7,66	2,99	0,16	74,21	0,68	19	17	60,00
7,75	2,75	0,16	67,79	0,68	17	17	60,01
7,83	2,61	0,16	65,09	0,67	17	17	60,00
7,91	2,58	0,16	64,75	0,66	17	17	59,99
8,00	2,68	0,17	65,33	0,66	17	17	59,97
8,08	2,91	0,19	66,51	0,65	17	17	60,00
8,16	3,25	0,20	69,89	0,64	17	17	60,00
8,25	3,70	0,22	77,01	0,64	19	17	60,00
8,33	4,21	0,25	87,48	0,63	19	19	60,00

Tabla A2.26. Valores numéricos de la figura A2.26.

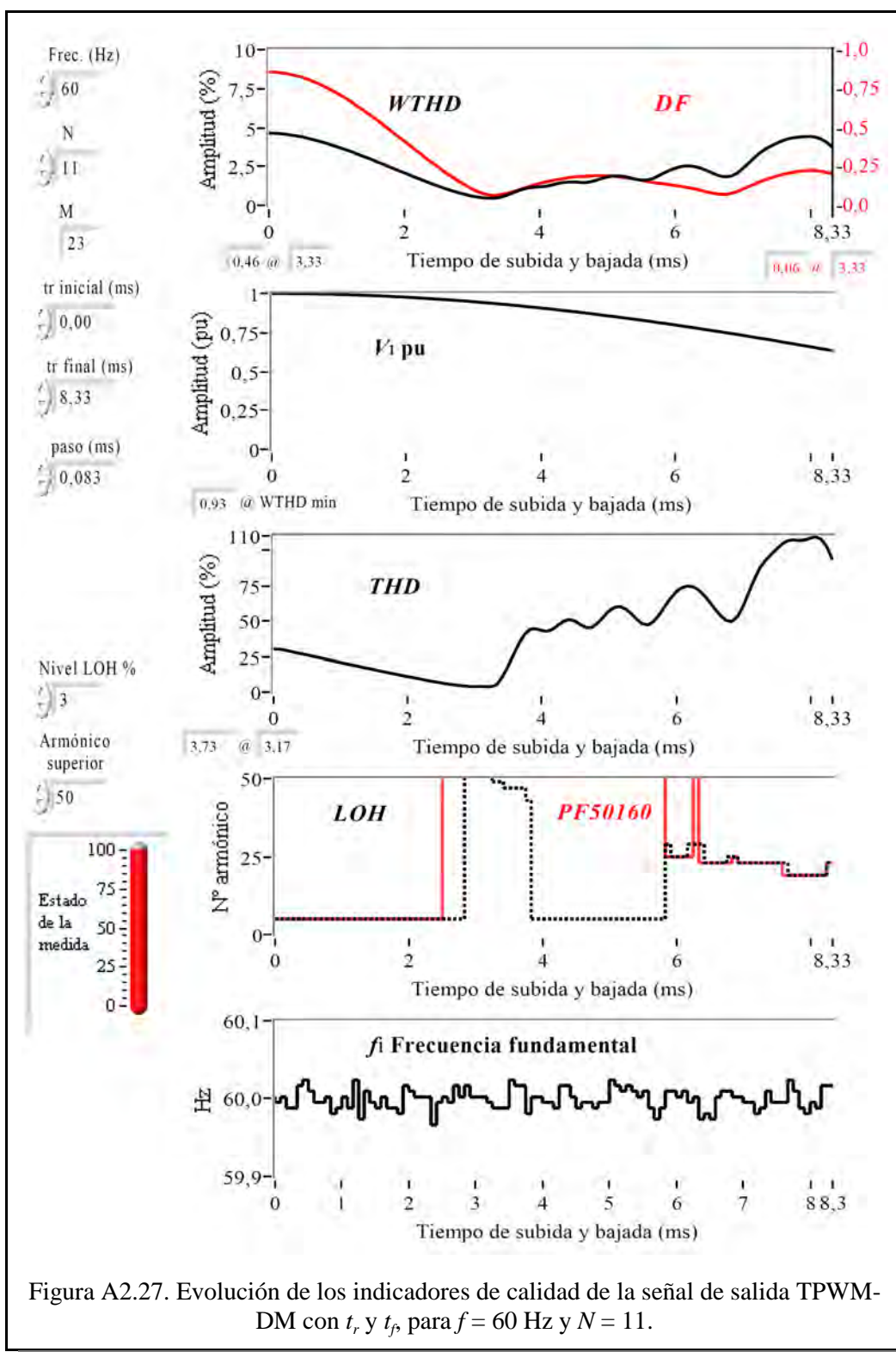


Figura A2.27. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 11$.

f=60Hz, N=11

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
0.00	4.64	0.86	30.02	1.00	5	5	60.00
0.08	4.63	0.86	29.81	1.00	5	5	60.00
0.17	4.61	0.85	29.23	1.00	5	5	60.00
0.25	4.57	0.85	28.42	1.00	5	5	59.99
0.33	4.52	0.84	27.50	1.00	5	5	59.99
0.42	4.46	0.83	26.71	1.00	5	5	60.02
0.50	4.39	0.82	25.90	1.00	5	5	60.02
0.58	4.31	0.81	24.99	1.00	5	5	60.01
0.67	4.21	0.79	24.08	1.00	5	5	60.00
0.75	4.12	0.78	23.26	1.00	5	5	60.00
0.83	4.01	0.76	22.39	1.00	5	5	60.00
0.92	3.89	0.74	21.49	0.99	5	5	59.98
1.00	3.77	0.72	20.67	0.99	5	5	59.99
1.08	3.66	0.70	19.90	0.99	5	5	60.00
1.17	3.52	0.68	18.99	0.99	5	5	59.99
1.25	3.40	0.66	18.22	0.99	5	5	60.02
1.33	3.24	0.63	17.26	0.99	5	5	59.97
1.42	3.12	0.61	16.49	0.99	5	5	60.01
1.50	2.98	0.58	15.70	0.99	5	5	60.00
1.58	2.83	0.55	14.84	0.98	5	5	59.99
1.67	2.69	0.53	14.06	0.98	5	5	60.00
1.75	2.54	0.50	13.22	0.98	5	5	59.99
1.83	2.38	0.47	12.40	0.98	5	5	59.99
1.92	2.23	0.44	11.57	0.98	5	5	59.98
2.00	2.10	0.41	10.87	0.98	5	5	60.02
2.08	1.95	0.39	10.10	0.97	5	5	60.01
2.17	1.80	0.36	9.29	0.97	5	5	60.00
2.25	1.66	0.33	8.55	0.97	5	5	60.00
2.33	1.51	0.30	7.80	0.97	5	5	60.00
2.42	1.37	0.27	7.08	0.97	5	5	59.97
2.50	1.24	0.25	6.43	0.96	5	5	60.00
2.58	1.12	0.22	5.79	0.96	5	60	60.00
2.67	0.99	0.19	5.19	0.96	5	60	60.00
2.75	0.88	0.17	4.71	0.96	5	60	60.02

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
2.83	0.77	0.15	4.25	0.95	5	60	60.00
2.92	0.69	0.13	3.92	0.95	60	60	60.02
3.00	0.60	0.11	3.74	0.95	60	60	60.00
3.08	0.53	0.09	3.81	0.94	60	60	60.00
3.17	0.48	0.08	3.73	0.94	60	60	60.00
3.25	0.46	0.07	3.75	0.94	60	60	60.00
3.33	0.46	0.06	5.32	0.93	49	60	59.99
3.42	0.51	0.07	10.83	0.93	49	60	59.99
3.50	0.62	0.08	18.23	0.93	47	60	59.99
3.58	0.75	0.08	26.22	0.92	47	60	60.02
3.67	0.90	0.10	34.42	0.92	47	60	60.02
3.75	1.03	0.11	40.69	0.92	47	60	60.02
3.83	1.12	0.12	44.05	0.91	43	60	59.98
3.92	1.16	0.13	44.32	0.91	5	60	60.00
4.00	1.18	0.14	43.11	0.91	5	60	60.00
4.08	1.22	0.15	42.47	0.90	5	60	60.00
4.17	1.29	0.16	44.00	0.90	5	60	60.00
4.25	1.38	0.16	47.08	0.89	5	60	59.99
4.33	1.45	0.17	49.74	0.89	5	60	60.02
4.41	1.50	0.18	50.75	0.89	5	60	60.02
4.50	1.50	0.18	49.63	0.88	5	60	60.00
4.58	1.47	0.19	47.12	0.88	5	60	59.99
4.66	1.46	0.19	45.01	0.87	5	60	60.00
4.75	1.50	0.19	45.16	0.87	5	60	60.00
4.83	1.60	0.19	48.21	0.87	5	60	59.99
4.91	1.71	0.19	52.50	0.86	5	60	60.00
5.00	1.82	0.19	56.77	0.86	5	60	60.00
5.08	1.88	0.19	59.34	0.85	5	60	60.02
5.16	1.90	0.18	59.98	0.85	5	60	60.02
5.25	1.85	0.18	58.25	0.84	5	60	60.01
5.33	1.78	0.17	55.04	0.84	5	60	60.02
5.41	1.69	0.17	50.92	0.83	5	60	60.01
5.50	1.63	0.16	47.93	0.83	5	60	60.00
5.58	1.63	0.15	47.11	0.82	5	60	60.01

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
5.66	1.71	0.15	49.41	0.82	5	60	59.99
5.75	1.87	0.14	54.20	0.81	5	60	59.97
5.83	2.06	0.14	60.08	0.81	5	60	59.99
5.91	2.23	0.13	65.53	0.80	29	25	60.01
6.00	2.38	0.13	70.13	0.80	25	25	60.01
6.08	2.49	0.12	73.25	0.79	25	25	60.00
6.16	2.53	0.12	74.44	0.79	25	25	60.01
6.25	2.53	0.11	73.97	0.78	29	25	60.00
6.33	2.46	0.10	71.78	0.78	29	60	60.00
6.41	2.35	0.09	68.13	0.77	29	23	59.97
6.50	2.19	0.08	63.30	0.76	23	23	59.98
6.58	2.03	0.08	58.07	0.76	23	23	59.97
6.66	1.90	0.07	53.48	0.75	23	23	60.00
6.75	1.82	0.07	50.08	0.75	23	23	60.01
6.83	1.87	0.08	49.44	0.74	25	23	60.01
6.91	2.05	0.09	52.83	0.74	25	25	60.00
7.00	2.33	0.10	60.01	0.73	23	23	60.00
7.08	2.68	0.12	69.63	0.72	23	23	60.00
7.16	3.01	0.13	78.99	0.72	23	23	60.00
7.25	3.33	0.15	87.06	0.71	23	23	59.98
7.33	3.59	0.16	92.53	0.71	23	23	59.99
7.41	3.79	0.18	96.62	0.70	23	23	60.01
7.50	3.98	0.19	100.49	0.70	23	23	60.00
7.58	4.14	0.20	104.13	0.69	23	23	60.00
7.66	4.25	0.20	106.50	0.68	23	19	60.00
7.75	4.34	0.21	107.13	0.68	19	19	60.02
7.83	4.38	0.22	106.68	0.67	19	19	60.01
7.91	4.41	0.22	106.89	0.66	19	19	59.99
8.00	4.42	0.22	108.21	0.66	19	19	59.98
8.08	4.39	0.22	109.30	0.65	19	19	60.00
8.16	4.26	0.22	107.51	0.65	19	19	59.99
8.25	4.05	0.21	102.31	0.64	19	19	60.02
8.33	3.74	0.20	93.25	0.63	23	23	60.02

Tabla A2.27. Valores numéricos de la figura A2.27.

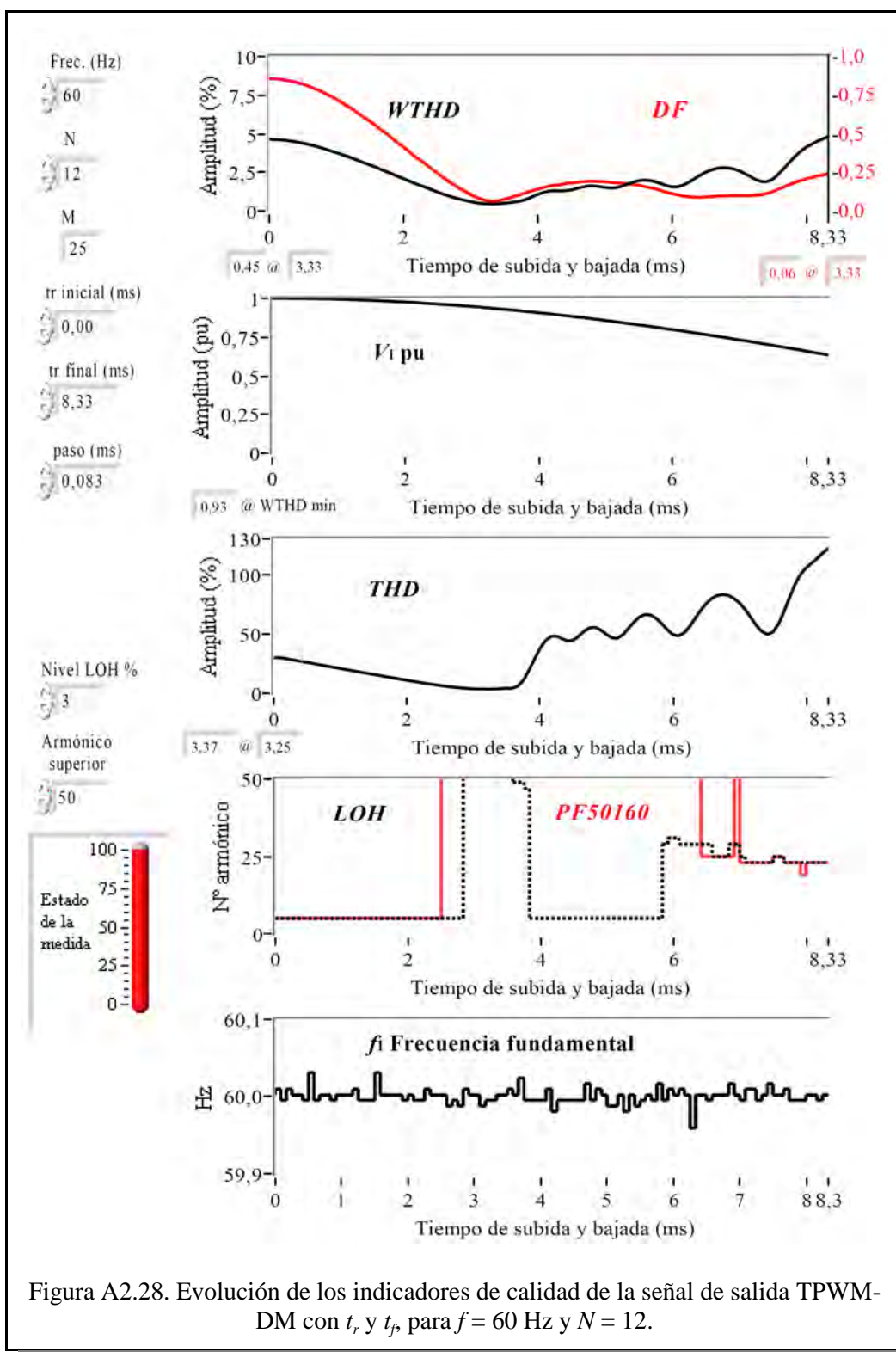


Figura A2.28. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 12$.

$f_s=60\text{Hz}$, $N=12$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
0.00	4,64	0,86	30,02	1,00	5	5	60,00
0,08	4,63	0,86	29,81	1,00	5	5	60,01
0,17	4,61	0,85	29,23	1,00	5	5	60,00
0,25	4,57	0,85	28,44	1,00	5	5	60,01
0,33	4,52	0,84	27,56	1,00	5	5	60,00
0,42	4,46	0,83	26,69	1,00	5	5	60,00
0,50	4,39	0,82	25,83	1,00	5	5	60,00
0,58	4,31	0,81	25,03	1,00	5	5	60,03
0,67	4,21	0,79	24,10	1,00	5	5	60,00
0,75	4,12	0,78	23,26	1,00	5	5	60,00
0,83	4,01	0,76	22,41	1,00	5	5	60,00
0,92	3,90	0,74	21,53	0,99	5	5	60,00
1,00	3,78	0,72	20,73	0,99	5	5	60,00
1,08	3,65	0,70	19,82	0,99	5	5	60,00
1,17	3,54	0,68	19,08	0,99	5	5	60,00
1,25	3,40	0,66	18,21	0,99	5	5	60,01
1,33	3,26	0,63	17,34	0,99	5	5	60,00
1,42	3,12	0,61	16,51	0,99	5	5	60,00
1,50	2,98	0,58	15,71	0,99	5	5	60,00
1,58	2,85	0,56	14,97	0,99	5	5	60,03
1,67	2,69	0,53	14,06	0,98	5	5	60,00
1,75	2,55	0,50	13,29	0,98	5	5	60,00
1,83	2,40	0,47	12,49	0,98	5	5	60,00
1,92	2,24	0,44	11,66	0,98	5	5	60,00
2,00	2,09	0,41	10,86	0,98	5	5	60,00
2,08	1,95	0,39	10,10	0,97	5	5	60,00
2,17	1,79	0,36	9,26	0,97	5	5	60,00
2,25	1,66	0,33	8,57	0,97	5	5	60,00
2,33	1,53	0,30	7,87	0,97	5	5	60,01
2,42	1,38	0,28	7,15	0,97	5	5	60,00
2,50	1,25	0,25	6,47	0,96	5	5	60,00
2,58	1,11	0,22	5,77	0,96	5	60	60,00
2,67	0,99	0,19	5,18	0,96	5	60	59,99
2,75	0,88	0,17	4,67	0,96	5	60	60,00
5,66	1,98	0,15	65,64	0,82	5	60	60,00
5,75	1,91	0,14	62,87	0,81	5	60	60,00
5,83	1,78	0,13	58,23	0,81	5	60	60,02
5,91	1,65	0,12	53,27	0,80	29	60	60,00
6,00	1,56	0,11	49,35	0,80	31	60	60,01
6,08	1,56	0,10	48,25	0,79	31	60	60,00
6,16	1,66	0,10	50,72	0,79	29	60	60,01
6,25	1,84	0,09	56,08	0,78	29	60	60,00
6,33	2,07	0,09	63,00	0,78	29	60	59,96
6,41	2,30	0,09	69,81	0,77	29	60	60,00
6,50	2,49	0,09	75,54	0,77	29	25	60,00
6,58	2,64	0,09	79,73	0,76	29	25	60,00
6,66	2,75	0,10	82,29	0,75	25	25	60,00
6,75	2,80	0,10	83,04	0,75	25	25	60,00
6,83	2,79	0,10	82,22	0,74	25	25	60,00
6,91	2,73	0,10	79,76	0,74	29	25	60,02
7,00	2,61	0,10	75,87	0,73	29	60	60,00
7,08	2,44	0,10	70,52	0,73	25	23	60,00
7,16	2,24	0,10	64,03	0,72	23	23	60,01
7,25	2,04	0,10	57,39	0,71	23	23	60,01
7,33	1,90	0,11	52,04	0,71	23	23	60,00
7,41	1,89	0,11	49,52	0,70	23	23	60,00
7,50	2,04	0,12	51,22	0,70	23	23	60,02
7,58	2,34	0,14	57,94	0,69	25	25	60,00
7,66	2,72	0,15	68,10	0,68	25	25	60,00
7,75	3,13	0,17	80,18	0,68	23	23	60,01
7,83	3,52	0,18	91,39	0,67	23	23	60,00
7,91	3,84	0,20	99,86	0,67	23	23	60,00
8,00	4,11	0,21	105,56	0,66	23	19	60,00
8,08	4,32	0,22	109,38	0,65	23	23	60,00
8,16	4,50	0,23	113,35	0,65	23	23	60,00
8,25	4,67	0,23	117,93	0,64	23	23	60,00
8,33	4,81	0,24	121,60	0,63	23	23	60,00
2,83	0,77	0,15	4,24	0,95	5	60	59,99
2,92	0,69	0,13	3,92	0,95	60	60	60,01
3,00	0,60	0,11	3,67	0,95	60	60	60,00
3,08	0,53	0,09	3,51	0,94	60	60	60,00
3,17	0,49	0,08	3,44	0,94	60	60	59,99
3,25	0,46	0,07	3,37	0,94	60	60	60,00
3,33	0,45	0,06	3,46	0,93	60	60	60,00
3,42	0,47	0,07	3,80	0,93	60	60	60,00
3,50	0,50	0,07	4,15	0,93	60	60	60,00
3,58	0,53	0,08	4,15	0,92	60	60	60,01
3,67	0,58	0,10	5,78	0,92	49	60	60,00
3,75	0,64	0,11	10,65	0,92	49	60	60,02
3,83	0,76	0,12	18,89	0,91	47	60	60,00
3,92	0,91	0,13	28,41	0,91	5	60	60,00
4,00	1,06	0,14	37,16	0,91	5	60	60,00
4,08	1,20	0,15	44,13	0,90	5	60	60,00
4,17	1,29	0,16	47,75	0,90	5	60	60,01
4,25	1,31	0,17	48,02	0,90	5	60	59,98
4,33	1,29	0,17	45,92	0,89	5	60	60,00
4,41	1,31	0,18	44,04	0,89	5	60	60,00
4,50	1,35	0,18	44,56	0,88	5	60	60,00
4,58	1,44	0,18	47,86	0,88	5	60	60,00
4,66	1,54	0,19	52,12	0,87	5	60	60,00
4,75	1,61	0,19	54,94	0,87	5	60	60,02
4,83	1,63	0,19	55,43	0,87	5	60	60,00
4,91	1,59	0,19	53,14	0,86	5	60	60,01
5,00	1,53	0,19	49,63	0,86	5	60	60,00
5,08	1,49	0,19	46,59	0,85	5	60	59,99
5,16	1,50	0,18	46,25	0,85	5	60	59,99
5,25	1,59	0,18	49,33	0,84	5	60	60,00
5,33	1,72	0,18	54,68	0,84	5	60	59,98
5,41	1,85	0,17	60,06	0,83	5	60	60,00
5,50	1,95	0,17	64,26	0,83	5	60	59,99
5,58	2,00	0,16	66,22	0,82	5	60	60,00

Tabla A2.28. Valores numéricos de la figura A2.28.

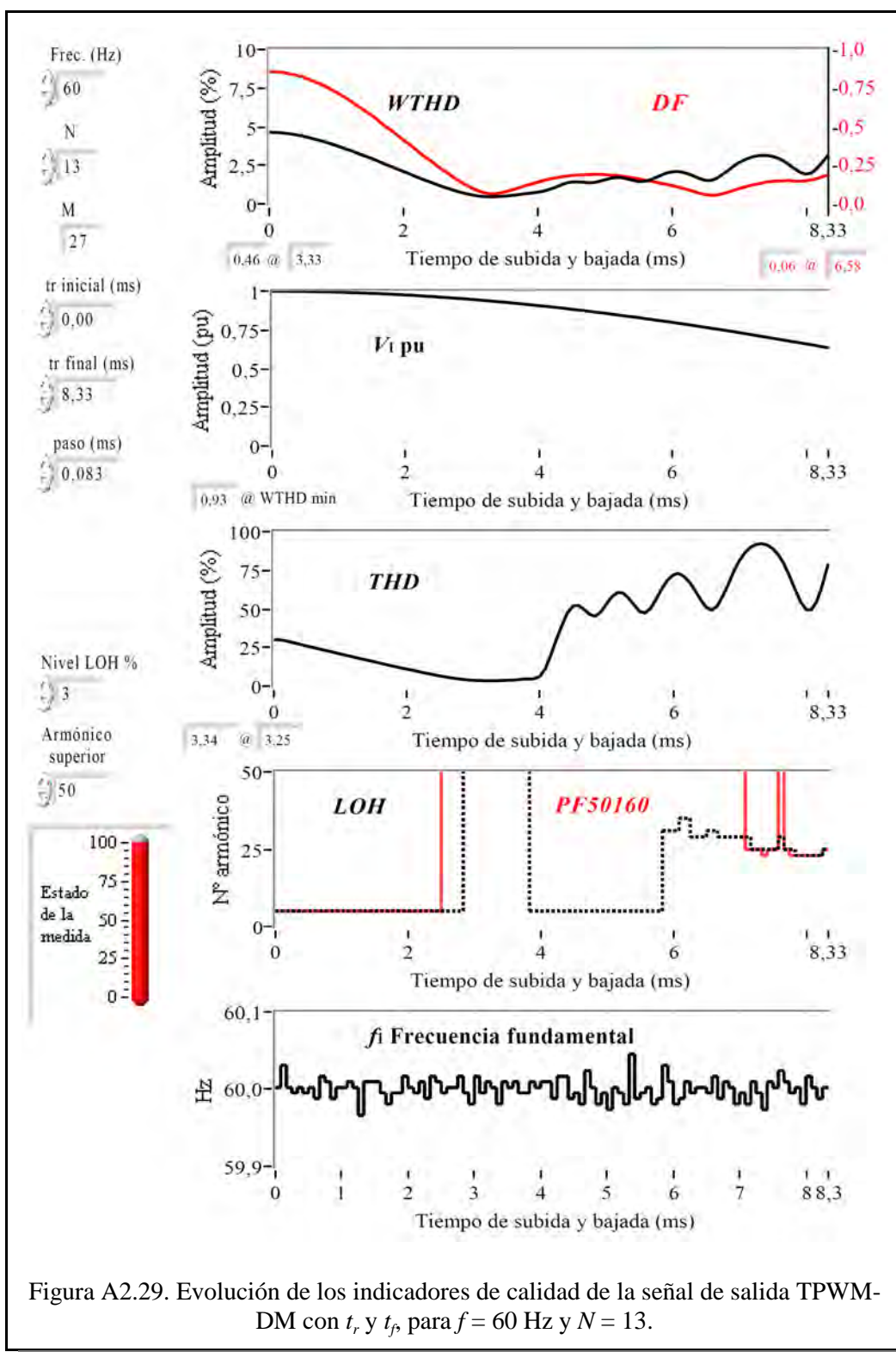


Figura A2.29. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 13$.

$f_s=60\text{Hz}$, $N=13$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,02	1,00	5	5	60,00
0,08	4,63	0,86	29,82	1,00	5	5	60,00
0,17	4,61	0,85	29,32	1,00	5	5	60,03
0,25	4,57	0,85	28,46	1,00	5	5	60,00
0,33	4,52	0,84	27,58	1,00	5	5	60,00
0,42	4,46	0,83	26,69	1,00	5	5	60,00
0,50	4,39	0,82	25,86	1,00	5	5	60,00
0,58	4,31	0,81	24,98	1,00	5	5	60,00
0,67	4,20	0,79	24,03	1,00	5	5	59,99
0,75	4,12	0,78	23,30	1,00	5	5	60,02
0,83	4,02	0,76	22,46	1,00	5	5	60,01
0,92	3,90	0,74	21,55	1,00	5	5	59,99
1,00	3,78	0,72	20,69	0,99	5	5	60,00
1,08	3,66	0,70	19,86	0,99	5	5	60,00
1,17	3,53	0,68	19,04	0,99	5	5	60,01
1,25	3,40	0,66	18,21	0,99	5	5	60,00
1,33	3,25	0,63	17,29	0,99	5	5	59,97
1,42	3,12	0,61	16,55	0,99	5	5	60,01
1,50	2,99	0,58	15,76	0,99	5	5	60,01
1,58	2,85	0,56	14,95	0,99	5	5	60,01
1,67	2,69	0,53	14,07	0,98	5	5	60,00
1,75	2,54	0,50	13,24	0,98	5	5	59,98
1,83	2,40	0,47	12,48	0,98	5	5	60,00
1,92	2,24	0,44	11,66	0,98	5	5	60,00
2,00	2,10	0,42	10,90	0,98	5	5	60,02
2,08	1,96	0,39	10,15	0,97	5	5	60,00
2,17	1,81	0,36	9,37	0,97	5	5	60,00
2,25	1,66	0,33	8,59	0,97	5	5	60,01
2,33	1,52	0,30	7,84	0,97	5	5	59,99
2,42	1,39	0,28	7,17	0,97	5	5	60,02
2,50	1,25	0,25	6,45	0,96	5	5	60,01
2,58	1,12	0,22	5,79	0,96	5	60	60,00
2,67	1,00	0,20	5,23	0,96	5	60	60,00
2,75	0,88	0,17	4,72	0,96	5	60	60,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
2,83	0,78	0,15	4,28	0,95	5	60	60,02
2,92	0,68	0,13	3,91	0,95	60	60	60,00
3,00	0,60	0,11	3,66	0,95	60	60	59,98
3,08	0,54	0,09	3,47	0,94	60	60	60,02
3,17	0,49	0,08	3,39	0,94	60	60	60,00
3,25	0,46	0,07	3,34	0,94	60	60	60,01
3,33	0,46	0,06	3,36	0,93	60	60	60,00
3,42	0,48	0,07	3,56	0,93	60	60	59,98
3,50	0,50	0,08	3,61	0,93	60	60	60,01
3,58	0,54	0,09	3,70	0,92	60	60	60,00
3,67	0,57	0,10	3,94	0,92	60	60	60,01
3,75	0,62	0,11	4,39	0,92	60	60	60,00
3,83	0,66	0,12	4,53	0,91	60	60	60,00
3,92	0,70	0,13	4,59	0,91	5	60	60,01
4,00	0,75	0,14	6,18	0,91	5	60	60,00
4,08	0,82	0,15	11,33	0,90	5	60	60,01
4,17	0,92	0,16	20,05	0,90	5	60	60,01
4,25	1,05	0,17	30,28	0,90	5	60	59,99
4,33	1,19	0,17	39,40	0,89	5	60	60,02
4,41	1,33	0,18	47,45	0,89	5	60	60,02
4,50	1,41	0,18	51,76	0,88	5	60	59,99
4,58	1,43	0,19	52,15	0,88	5	60	60,00
4,66	1,41	0,19	49,54	0,87	5	60	59,98
4,75	1,37	0,19	46,31	0,87	5	60	60,02
4,83	1,39	0,19	45,18	0,87	5	60	60,00
4,91	1,45	0,19	47,87	0,86	5	60	59,98
5,00	1,56	0,19	52,94	0,86	5	60	60,00
5,08	1,65	0,19	57,86	0,85	5	60	59,97
5,16	1,71	0,19	60,53	0,85	5	60	60,00
5,25	1,70	0,18	60,20	0,84	5	60	60,00
5,33	1,63	0,18	56,80	0,84	5	60	59,98
5,41	1,54	0,17	52,38	0,83	5	60	60,05
5,50	1,46	0,16	48,14	0,83	5	60	59,99
5,58	1,45	0,16	47,28	0,82	5	60	60,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
5,66	1,53	0,15	50,37	0,82	5	60	60,00
5,75	1,68	0,14	56,46	0,81	5	60	59,98
5,83	1,84	0,13	63,04	0,81	5	60	59,99
5,91	1,98	0,13	68,47	0,80	31	60	60,03
6,00	2,07	0,12	71,90	0,80	31	60	60,01
6,08	2,10	0,11	72,84	0,79	31	60	59,98
6,16	2,04	0,10	70,88	0,79	35	60	59,99
6,25	1,94	0,09	67,06	0,78	35	60	60,01
6,33	1,79	0,08	61,65	0,78	29	60	60,00
6,41	1,63	0,07	55,70	0,77	29	60	60,00
6,50	1,52	0,06	50,87	0,77	29	60	60,00
6,58	1,52	0,06	49,14	0,76	31	60	60,00
6,66	1,64	0,06	51,74	0,75	31	60	60,02
6,75	1,88	0,06	58,41	0,75	29	60	59,99
6,83	2,14	0,07	66,08	0,74	29	60	60,01
6,91	2,43	0,09	74,40	0,74	29	60	60,00
7,00	2,67	0,10	81,32	0,73	29	60	59,98
7,08	2,85	0,11	86,25	0,73	29	60	60,00
7,16	3,00	0,12	89,84	0,72	29	25	59,98
7,25	3,09	0,13	91,67	0,71	25	25	60,01
7,33	3,14	0,13	92,17	0,71	25	25	60,00
7,41	3,14	0,14	91,30	0,70	25	23	59,97
7,50	3,08	0,15	88,94	0,70	25	25	60,01
7,58	2,97	0,15	84,94	0,69	25	25	60,00
7,66	2,79	0,15	79,28	0,68	29	60	60,02
7,75	2,54	0,15	71,37	0,68	25	25	60,01
7,83	2,27	0,15	62,80	0,67	25	23	60,00
7,91	2,04	0,15	54,81	0,67	23	23	60,00
8,00	1,92	0,15	49,50	0,66	23	23	59,98
8,08	2,00	0,16	49,34	0,65	23	23	60,02
8,16	2,30	0,16	55,37	0,65	23	23	60,00
8,25	2,71	0,18	65,85	0,64	23	23	59,99
8,33	3,18	0,19	79,01	0,63	25	25	60,00

Tabla A2.29. Valores numéricos de la figura A2.29.

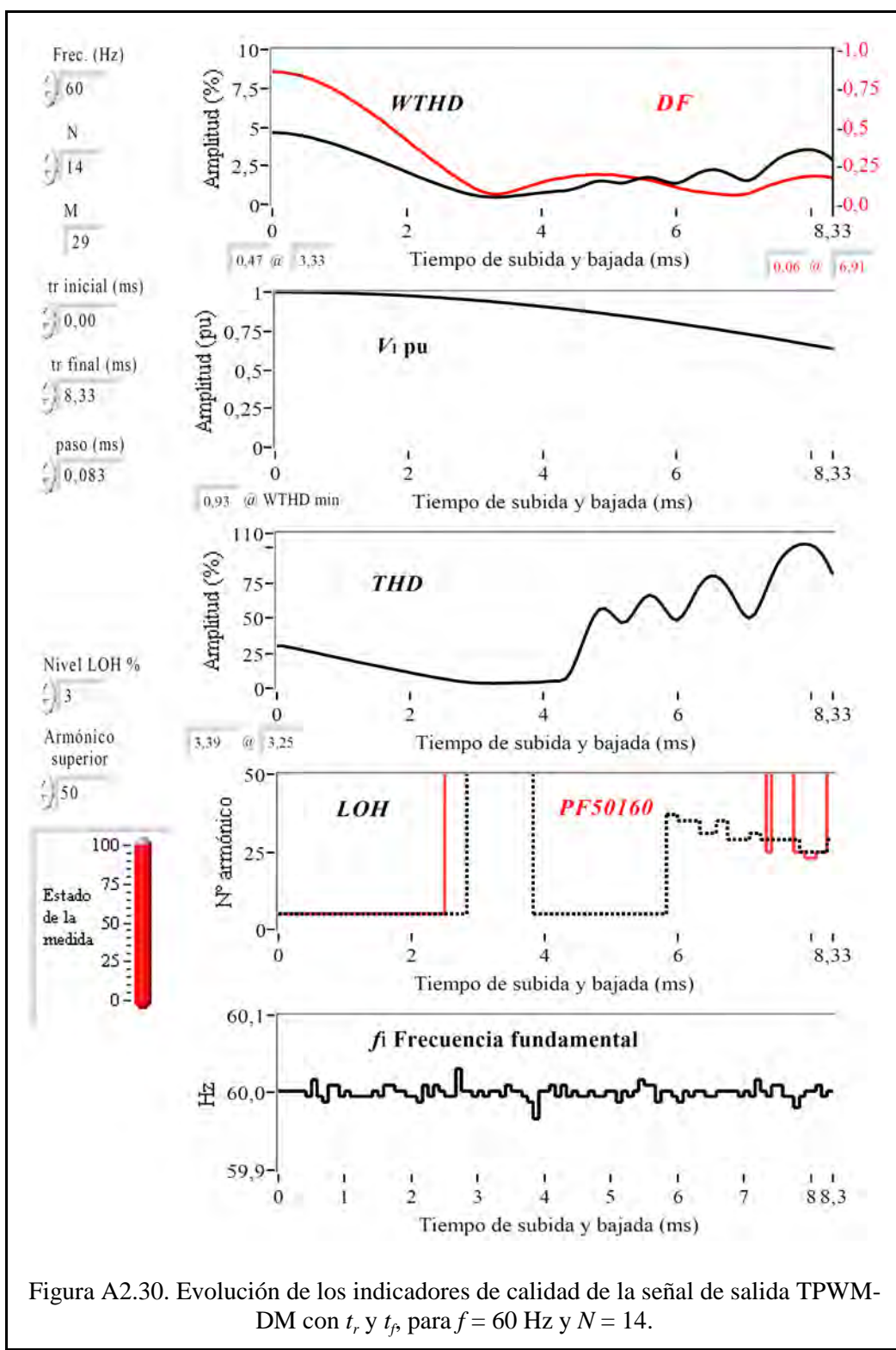
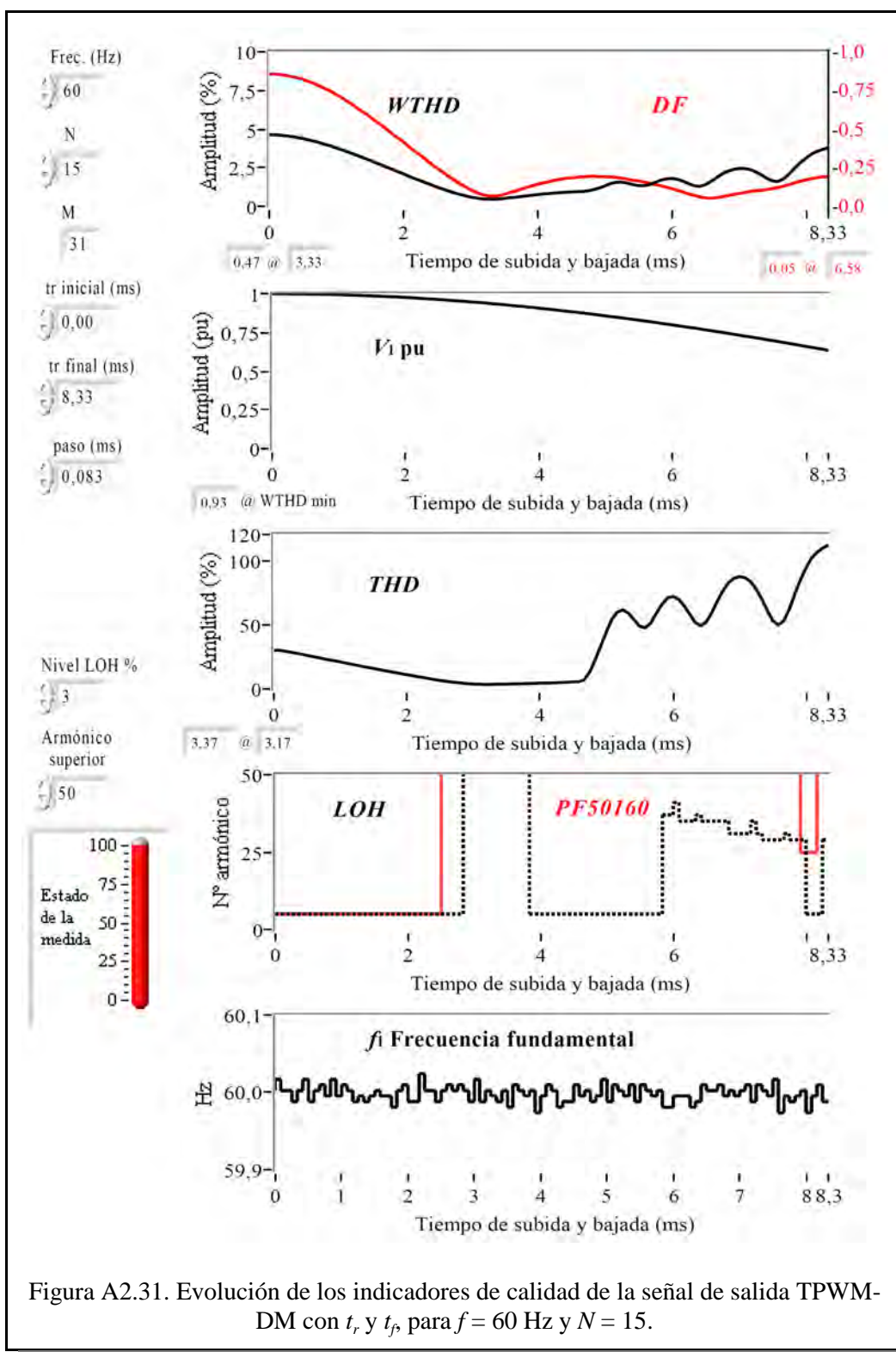


Figura A2.30. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 14$.

$f=60\text{Hz}, N=14$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
0.00	4.64	0.86	30.02	1.00	5	5	60.00
0.08	4.63	0.86	29.82	1.00	5	5	60.00
0.17	4.61	0.85	29.24	1.00	5	5	60.00
0.25	4.57	0.85	28.44	1.00	5	5	60.00
0.33	4.52	0.84	27.55	1.00	5	5	60.00
0.42	4.46	0.83	26.72	1.00	5	5	60.00
0.50	4.38	0.82	25.81	1.00	5	5	60.00
0.58	4.31	0.81	25.05	1.00	5	5	60.02
0.67	4.21	0.79	24.08	1.00	5	5	60.00
0.75	4.11	0.78	23.23	1.00	5	5	59.99
0.83	4.02	0.76	22.44	1.00	5	5	60.01
0.92	3.90	0.74	21.59	1.00	5	5	60.01
1.00	3.78	0.72	20.70	0.99	5	5	60.00
1.08	3.66	0.70	19.87	0.99	5	5	60.00
1.17	3.52	0.68	18.99	0.99	5	5	60.00
1.25	3.39	0.66	18.18	0.99	5	5	60.00
1.33	3.26	0.63	17.37	0.99	5	5	60.00
1.42	3.12	0.61	16.53	0.99	5	5	60.00
1.50	2.98	0.58	15.73	0.99	5	5	60.00
1.58	2.85	0.56	14.98	0.99	5	5	60.00
1.67	2.70	0.53	14.12	0.98	5	5	60.01
1.75	2.55	0.50	13.33	0.98	5	5	60.01
1.83	2.41	0.47	12.53	0.98	5	5	60.00
1.92	2.25	0.44	11.69	0.98	5	5	60.00
2.00	2.10	0.41	10.90	0.98	5	5	60.00
2.08	1.95	0.39	10.12	0.97	5	5	60.00
2.17	1.80	0.36	9.31	0.97	5	5	59.99
2.25	1.67	0.33	8.61	0.97	5	5	60.01
2.33	1.52	0.30	7.84	0.97	5	5	60.00
2.42	1.39	0.28	7.19	0.97	5	5	60.01
2.50	1.25	0.25	6.48	0.96	5	5	60.00
2.58	1.12	0.22	5.82	0.96	5	60	60.00
2.67	1.00	0.20	5.25	0.96	5	60	60.00
2.75	0.89	0.17	4.72	0.96	5	60	60.03
5.66	1.73	0.15	64.69	0.82	5	60	60.01
5.75	1.63	0.14	60.50	0.81	5	60	59.99
5.83	1.50	0.13	55.04	0.81	5	60	60.00
5.91	1.39	0.12	49.92	0.80	37	60	60.00
6.00	1.36	0.11	48.14	0.80	37	60	60.00
6.08	1.45	0.10	51.27	0.79	35	60	59.99
6.16	1.63	0.10	57.71	0.79	35	60	60.00
6.25	1.83	0.09	65.53	0.78	35	60	60.00
6.33	2.01	0.08	72.32	0.78	35	60	60.00
6.41	2.16	0.08	77.25	0.77	31	60	60.00
6.50	2.23	0.07	79.57	0.77	31	60	60.00
6.58	2.24	0.07	79.42	0.76	31	60	60.00
6.66	2.18	0.07	76.83	0.76	35	60	60.00
6.75	2.05	0.06	72.14	0.75	35	60	60.00
6.83	1.88	0.06	65.66	0.74	29	60	60.00
6.91	1.69	0.06	58.43	0.74	29	60	60.00
7.00	1.55	0.06	52.11	0.73	29	60	60.00
7.08	1.53	0.07	49.60	0.73	29	60	60.00
7.16	1.69	0.09	52.51	0.72	31	60	60.00
7.25	1.96	0.10	60.05	0.72	31	60	60.02
7.33	2.29	0.11	69.66	0.71	29	60	60.00
7.41	2.61	0.13	79.23	0.70	29	25	60.00
7.50	2.89	0.14	87.48	0.70	29	60	60.01
7.58	3.10	0.15	93.42	0.69	29	60	60.01
7.66	3.26	0.16	97.52	0.68	29	60	60.00
7.75	3.39	0.17	100.25	0.68	29	60	60.00
7.83	3.48	0.17	101.86	0.67	29	25	59.98
7.91	3.53	0.18	102.32	0.67	25	25	60.00
8.00	3.54	0.18	101.78	0.66	25	23	60.00
8.08	3.49	0.18	99.75	0.65	25	23	60.00
8.16	3.36	0.18	95.49	0.65	25	25	60.01
8.25	3.16	0.18	89.27	0.64	25	25	60.00
8.33	2.88	0.17	80.74	0.63	29	60	60.00
2.83	0.78	0.15	4.29	0.95	5	60	60.00
2.92	0.68	0.13	3.93	0.95	60	60	60.00
3.00	0.60	0.11	3.65	0.95	60	60	60.00
3.08	0.54	0.09	3.48	0.94	60	60	60.00
3.17	0.50	0.08	3.42	0.94	60	60	60.00
3.25	0.47	0.07	3.39	0.94	60	60	60.00
3.33	0.47	0.07	3.45	0.93	60	60	60.00
3.42	0.48	0.07	3.50	0.93	60	60	60.00
3.50	0.50	0.08	3.58	0.93	60	60	60.01
3.58	0.54	0.09	3.68	0.92	60	60	60.00
3.67	0.58	0.10	3.80	0.92	60	60	60.00
3.75	0.62	0.11	3.88	0.92	60	60	60.00
3.83	0.66	0.12	4.05	0.91	60	60	59.99
3.92	0.71	0.13	4.20	0.91	5	60	59.97
4.00	0.75	0.14	4.44	0.91	5	60	60.00
4.08	0.79	0.15	4.82	0.90	5	60	60.00
4.17	0.83	0.16	5.03	0.90	5	60	60.01
4.25	0.86	0.17	5.07	0.90	5	60	60.01
4.33	0.88	0.17	6.73	0.89	5	60	60.01
4.41	0.93	0.18	12.11	0.89	5	60	60.00
4.50	1.02	0.18	21.30	0.88	5	60	60.00
4.58	1.14	0.19	31.70	0.88	5	60	60.00
4.66	1.28	0.19	42.00	0.87	5	60	60.00
4.75	1.42	0.19	50.53	0.87	5	60	60.00
4.83	1.50	0.19	55.71	0.87	5	60	60.00
4.91	1.52	0.19	56.56	0.86	5	60	60.00
5.00	1.48	0.19	53.86	0.86	5	60	60.00
5.08	1.43	0.19	49.54	0.85	5	60	60.00
5.16	1.37	0.18	46.34	0.85	5	60	59.99
5.25	1.40	0.18	47.40	0.84	5	60	60.00
5.33	1.50	0.18	52.48	0.84	5	60	60.00
5.41	1.63	0.17	58.87	0.83	5	60	60.00
5.50	1.72	0.17	63.70	0.83	5	60	60.02
5.58	1.76	0.16	66.03	0.82	5	60	60.01

Tabla A2.30. Valores numéricos de la figura A2.30.



$f_s=60\text{Hz}$, $N=15$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,02	1,00	5	5	60,00
0,08	4,63	0,86	29,83	1,00	5	5	60,02
0,17	4,61	0,85	29,26	1,00	5	5	60,00
0,25	4,57	0,85	28,42	1,00	5	5	60,00
0,33	4,52	0,84	27,57	1,00	5	5	59,99
0,42	4,46	0,83	26,69	1,00	5	5	60,00
0,50	4,39	0,82	25,87	1,00	5	5	60,02
0,58	4,30	0,81	24,95	1,00	5	5	59,99
0,67	4,22	0,80	24,17	1,00	5	5	60,00
0,75	4,12	0,78	23,27	1,00	5	5	60,01
0,83	4,01	0,76	22,38	1,00	5	5	60,00
0,92	3,92	0,75	21,68	1,00	5	5	60,02
1,00	3,78	0,72	20,73	0,99	5	5	60,00
1,08	3,67	0,70	19,93	0,99	5	5	60,01
1,17	3,53	0,68	19,05	0,99	5	5	60,00
1,25	3,40	0,66	18,20	0,99	5	5	59,99
1,33	3,26	0,63	17,34	0,99	5	5	60,00
1,42	3,12	0,61	16,54	0,99	5	5	59,99
1,50	2,98	0,58	15,72	0,99	5	5	60,00
1,58	2,83	0,55	14,85	0,98	5	5	60,00
1,67	2,69	0,53	14,08	0,98	5	5	60,00
1,75	2,54	0,50	13,27	0,98	5	5	60,00
1,83	2,40	0,47	12,50	0,98	5	5	59,98
1,92	2,25	0,44	11,68	0,98	5	5	60,00
2,00	2,11	0,42	10,95	0,98	5	5	60,01
2,08	1,95	0,39	10,11	0,97	5	5	59,99
2,17	1,81	0,36	9,38	0,97	5	5	59,99
2,25	1,68	0,33	8,67	0,97	5	5	60,02
2,33	1,52	0,30	7,87	0,97	5	5	60,00
2,42	1,39	0,28	7,19	0,97	5	5	60,00
2,50	1,25	0,25	6,44	0,96	5	5	59,99
2,58	1,13	0,22	5,85	0,96	5	60	60,00
2,67	1,00	0,20	5,24	0,96	5	60	60,01
2,75	0,89	0,17	4,74	0,96	5	60	60,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
2,83	0,78	0,15	4,30	0,95	5	60	60,01
2,92	0,69	0,13	3,97	0,95	60	60	60,00
3,00	0,60	0,11	3,69	0,95	60	60	59,99
3,08	0,54	0,09	3,52	0,94	60	60	60,02
3,17	0,49	0,08	3,37	0,94	60	60	59,99
3,25	0,47	0,07	3,41	0,94	60	60	60,00
3,33	0,47	0,07	3,43	0,93	60	60	60,00
3,42	0,48	0,07	3,46	0,93	60	60	59,99
3,50	0,50	0,08	3,55	0,93	60	60	60,00
3,58	0,56	0,09	3,77	0,92	60	60	59,98
3,67	0,59	0,10	3,83	0,92	60	60	60,01
3,75	0,63	0,11	3,93	0,92	60	60	60,00
3,83	0,68	0,12	4,06	0,91	60	60	60,00
3,92	0,72	0,13	4,18	0,91	5	60	60,00
4,00	0,76	0,14	4,33	0,91	5	60	59,97
4,08	0,80	0,15	4,43	0,90	5	60	60,00
4,17	0,82	0,16	4,48	0,90	5	60	60,01
4,25	0,86	0,17	4,64	0,90	5	60	60,00
4,33	0,88	0,17	4,82	0,89	5	60	59,98
4,41	0,91	0,18	5,10	0,89	5	60	59,99
4,50	0,93	0,18	5,43	0,88	5	60	59,99
4,58	0,94	0,19	5,45	0,88	5	60	60,01
4,66	0,97	0,19	6,09	0,88	5	60	60,00
4,75	0,99	0,19	12,77	0,87	5	60	60,00
4,83	1,07	0,19	22,73	0,87	5	60	59,99
4,91	1,17	0,19	33,35	0,86	5	60	60,00
5,00	1,31	0,19	44,09	0,86	5	60	60,02
5,08	1,46	0,19	54,05	0,85	5	60	59,99
5,16	1,55	0,19	59,66	0,85	5	60	60,01
5,25	1,57	0,18	61,23	0,84	5	60	60,00
5,33	1,52	0,18	58,68	0,84	5	60	60,00
5,41	1,42	0,17	53,40	0,83	5	60	60,01
5,50	1,35	0,17	48,40	0,83	5	60	59,99
5,58	1,33	0,16	47,36	0,82	5	60	60,01

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
5,66	1,40	0,15	51,22	0,82	5	60	60,00
5,75	1,54	0,14	58,59	0,81	5	60	60,00
5,83	1,69	0,13	65,49	0,81	5	60	60,00
5,91	1,78	0,12	70,42	0,80	37	60	59,98
6,00	1,81	0,11	71,73	0,80	37	60	59,98
6,08	1,75	0,10	69,71	0,79	41	60	60,00
6,16	1,63	0,09	64,43	0,79	35	60	60,00
6,25	1,47	0,08	57,93	0,78	35	60	60,00
6,33	1,34	0,07	51,58	0,78	35	60	59,98
6,41	1,29	0,06	48,95	0,77	37	60	59,99
6,50	1,39	0,05	51,75	0,77	35	60	60,01
6,58	1,61	0,05	59,07	0,76	35	60	60,00
6,66	1,86	0,06	68,01	0,76	35	60	60,00
6,75	2,08	0,06	75,98	0,75	35	60	60,01
6,83	2,27	0,07	82,30	0,74	35	60	60,00
6,91	2,39	0,08	85,87	0,74	31	60	60,00
7,00	2,45	0,08	87,16	0,73	31	60	60,00
7,08	2,45	0,09	86,25	0,73	31	60	60,00
7,16	2,39	0,10	83,35	0,72	31	60	60,01
7,25	2,24	0,10	77,45	0,71	35	60	59,99
7,33	2,05	0,10	70,00	0,71	31	60	60,01
7,41	1,82	0,11	61,00	0,70	29	60	60,00
7,50	1,64	0,11	53,10	0,70	29	60	60,00
7,58	1,61	0,12	49,52	0,69	29	60	60,02
7,66	1,77	0,13	52,75	0,69	29	60	59,97
7,75	2,09	0,14	61,88	0,68	31	60	60,00
7,83	2,47	0,15	73,81	0,67	29	60	59,99
7,91	2,82	0,16	84,69	0,67	29	60	60,00
8,00	3,12	0,17	93,84	0,66	29	25	60,00
8,08	3,38	0,18	101,43	0,65	5	25	59,97
8,16	3,55	0,19	106,09	0,65	5	25	60,00
8,25	3,68	0,19	109,30	0,64	5	60	60,01
8,33	3,79	0,19	111,55	0,63	29	60	59,99

Tabla A2.31. Valores numéricos de la figura A2.31.

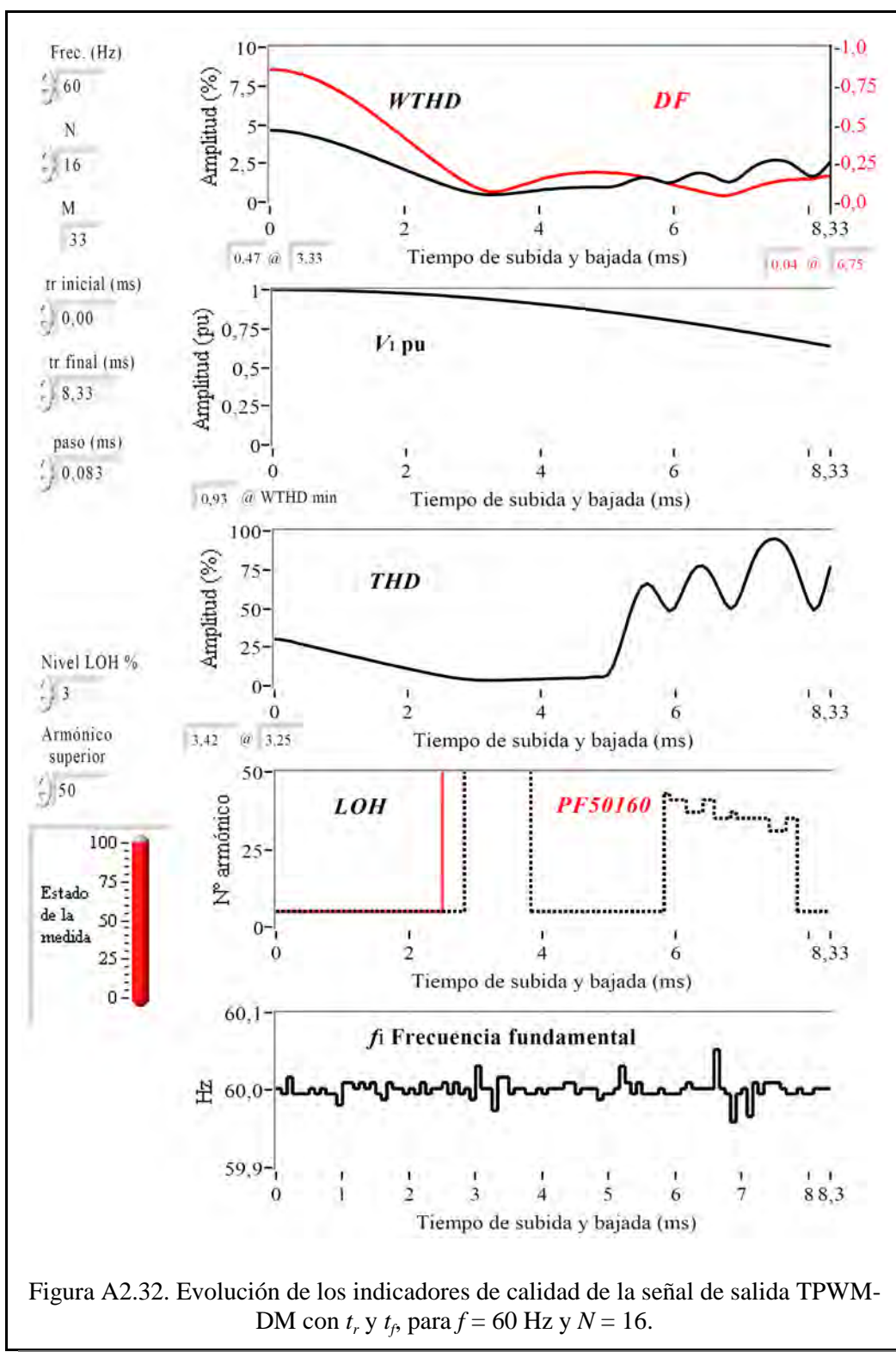


Figura A2.32. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 16$.

$f=60\text{Hz}$, $N=16$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,02	1,00	5	5	60,00
0,08	4,63	0,86	29,83	1,00	5	5	60,00
0,17	4,61	0,85	29,21	1,00	5	5	60,00
0,25	4,58	0,85	28,55	1,00	5	5	60,02
0,33	4,52	0,84	27,55	1,00	5	5	60,00
0,42	4,46	0,83	26,70	1,00	5	5	60,00
0,50	4,38	0,82	25,77	1,00	5	5	60,00
0,58	4,30	0,81	24,97	1,00	5	5	60,00
0,67	4,21	0,79	24,08	1,00	5	5	60,00
0,75	4,12	0,78	23,30	1,00	5	5	60,00
0,83	4,01	0,76	22,37	1,00	5	5	60,00
0,92	3,90	0,74	21,55	0,99	5	5	60,00
1,00	3,78	0,72	20,69	0,99	5	5	59,98
1,08	3,67	0,70	19,93	0,99	5	5	60,01
1,17	3,54	0,68	19,07	0,99	5	5	60,01
1,25	3,41	0,66	18,25	0,99	5	5	60,00
1,33	3,27	0,63	17,41	0,99	5	5	60,01
1,42	3,13	0,61	16,57	0,99	5	5	60,00
1,50	2,99	0,58	15,76	0,99	5	5	60,01
1,58	2,84	0,56	14,94	0,99	5	5	60,00
1,67	2,68	0,53	14,05	0,98	5	5	59,99
1,75	2,55	0,50	13,33	0,98	5	5	60,01
1,83	2,40	0,47	12,49	0,98	5	5	60,00
1,92	2,26	0,45	11,74	0,98	5	5	60,00
2,00	2,10	0,41	10,89	0,98	5	5	60,00
2,08	1,96	0,39	10,19	0,97	5	5	60,00
2,17	1,81	0,36	9,41	0,97	5	5	60,00
2,25	1,67	0,33	8,64	0,97	5	5	60,01
2,33	1,53	0,30	7,89	0,97	5	5	60,00
2,42	1,39	0,28	7,21	0,97	5	5	60,00
2,50	1,25	0,25	6,49	0,96	5	5	60,00
2,58	1,13	0,22	5,87	0,96	5	60	60,01
2,67	1,00	0,20	5,26	0,96	5	60	60,00
2,75	0,89	0,17	4,74	0,96	5	60	60,01

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
2,83	0,78	0,15	4,26	0,95	5	60	60,00
2,92	0,69	0,13	3,95	0,95	60	60	60,00
3,00	0,60	0,11	3,68	0,95	60	60	59,99
3,08	0,55	0,09	3,53	0,94	60	60	60,03
3,17	0,50	0,08	3,46	0,94	60	60	60,00
3,25	0,47	0,07	3,42	0,94	60	60	60,00
3,33	0,47	0,07	3,46	0,93	60	60	59,97
3,42	0,48	0,07	3,52	0,93	60	60	60,02
3,50	0,51	0,08	3,61	0,93	60	60	60,02
3,58	0,55	0,09	3,73	0,93	60	60	60,00
3,67	0,59	0,10	3,82	0,92	60	60	60,00
3,75	0,63	0,11	3,94	0,92	60	60	60,00
3,83	0,67	0,12	4,02	0,91	60	60	60,00
3,92	0,71	0,13	4,12	0,91	5	60	60,00
4,00	0,76	0,14	4,25	0,91	5	60	60,00
4,08	0,82	0,16	4,50	0,90	5	60	60,00
4,17	0,83	0,16	4,50	0,90	5	60	60,00
4,25	0,86	0,17	4,58	0,89	5	60	60,00
4,33	0,90	0,18	4,72	0,89	5	60	60,01
4,41	0,91	0,18	4,79	0,89	5	60	60,01
4,50	0,93	0,19	4,87	0,88	5	60	60,01
4,58	0,94	0,19	4,90	0,88	5	60	60,00
4,66	0,96	0,19	5,11	0,88	5	60	60,00
4,75	0,96	0,19	5,46	0,87	5	60	60,00
4,83	0,97	0,19	5,66	0,87	5	60	60,00
4,91	0,97	0,19	5,42	0,86	5	60	59,99
5,00	0,96	0,19	6,92	0,86	5	60	60,00
5,08	0,98	0,19	13,07	0,85	5	60	60,00
5,16	1,05	0,19	23,08	0,85	5	60	60,00
5,25	1,16	0,18	34,88	0,84	5	60	60,03
5,33	1,32	0,18	47,06	0,84	5	60	60,01
5,41	1,46	0,17	56,96	0,83	5	60	60,00
5,50	1,57	0,17	63,65	0,83	5	60	60,01
5,58	1,59	0,16	65,94	0,82	5	60	60,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
5,66	1,55	0,15	63,79	0,82	5	60	60,00
5,75	1,43	0,14	58,34	0,81	5	60	60,00
5,83	1,30	0,13	51,95	0,81	5	60	60,00
5,91	1,23	0,12	48,12	0,80	43	60	60,00
6,00	1,28	0,11	50,10	0,80	41	60	60,00
6,08	1,43	0,10	57,23	0,79	41	60	60,00
6,16	1,61	0,09	65,83	0,79	41	60	60,00
6,25	1,77	0,09	72,82	0,78	37	60	60,01
6,33	1,86	0,08	76,81	0,78	37	60	60,00
6,41	1,88	0,07	77,49	0,77	37	60	60,00
6,50	1,82	0,06	74,64	0,77	41	60	60,00
6,58	1,69	0,05	69,00	0,76	41	60	60,00
6,66	1,54	0,04	61,34	0,76	35	60	60,05
6,75	1,34	0,04	53,74	0,75	35	60	60,00
6,83	1,28	0,04	49,58	0,74	35	60	60,00
6,91	1,39	0,05	52,11	0,74	37	60	59,96
7,00	1,64	0,06	60,13	0,73	35	60	60,00
7,08	1,93	0,08	70,36	0,73	35	60	60,00
7,16	2,21	0,09	80,11	0,72	35	60	59,97
7,25	2,42	0,10	87,36	0,72	35	60	60,01
7,33	2,57	0,11	91,89	0,71	35	60	60,00
7,41	2,67	0,12	94,32	0,70	35	60	60,01
7,50	2,72	0,13	94,88	0,70	31	60	60,01
7,58	2,71	0,14	93,53	0,69	31	60	60,01
7,66	2,64	0,14	90,36	0,68	31	60	60,00
7,75	2,48	0,14	84,03	0,68	35	60	60,00
7,83	2,24	0,14	75,02	0,67	35	60	60,00
7,91	1,97	0,15	64,37	0,67	5	60	60,00
8,00	1,73	0,15	54,03	0,66	5	60	60,00
8,08	1,64	0,15	48,68	0,65	5	60	60,00
8,16	1,82	0,16	52,11	0,65	5	60	60,00
8,25	2,17	0,16	63,05	0,64	5	60	60,00
8,33	2,60	0,17	77,15	0,63	5	60	60,00

Tabla A2.32. Valores numéricos de la figura A2.32.

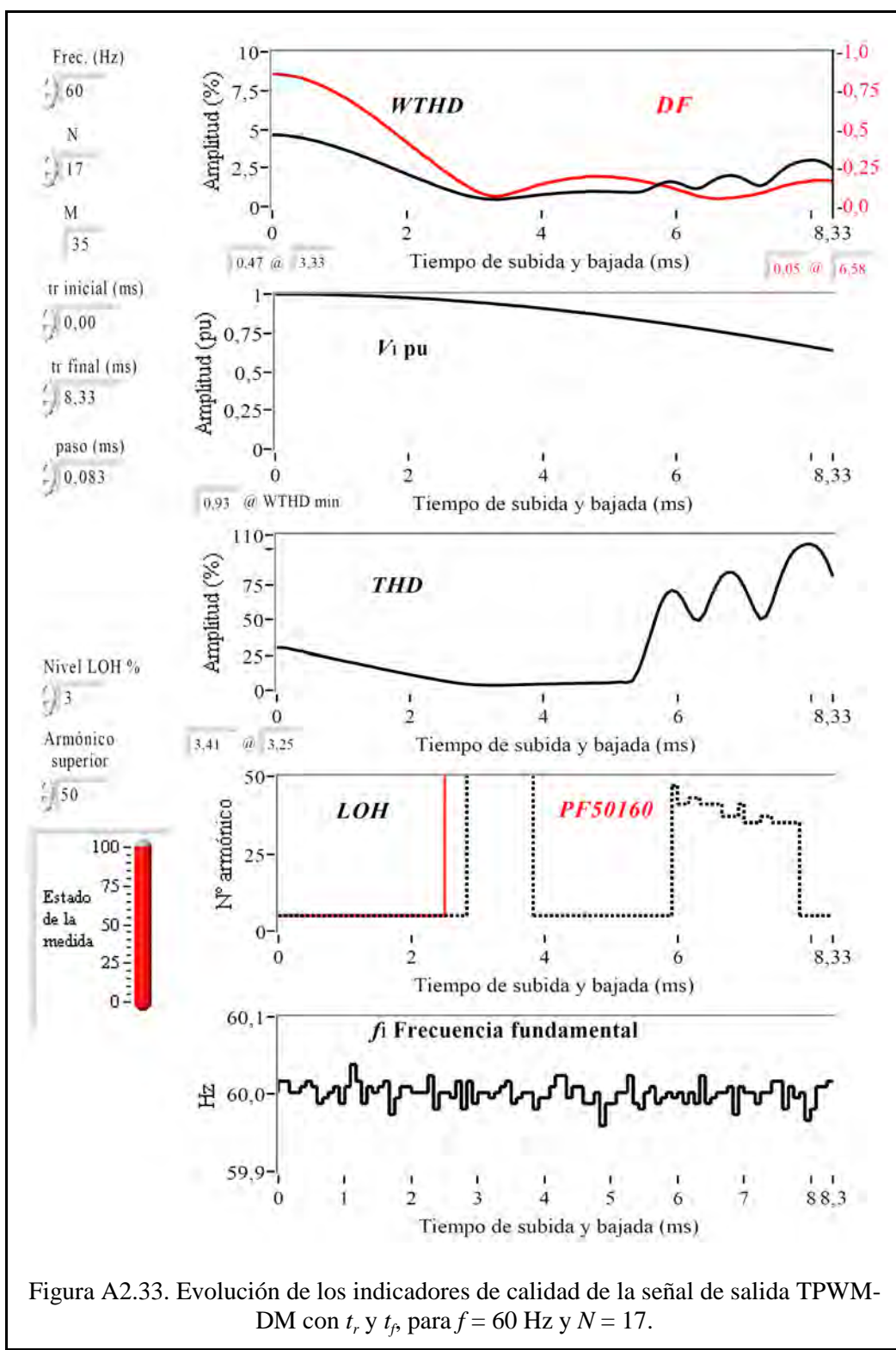


Figura A2.33. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 17$.

f=60Hz, N=17

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,02	1,00	5	5	60,00
0,08	4,63	0,86	29,82	1,00	5	5	60,02
0,17	4,61	0,85	29,27	1,00	5	5	60,02
0,25	4,57	0,85	28,46	1,00	5	5	60,00
0,33	4,52	0,84	27,58	1,00	5	5	60,00
0,42	4,46	0,83	26,74	1,00	5	5	60,01
0,50	4,39	0,82	25,89	1,00	5	5	60,02
0,58	4,30	0,81	24,96	1,00	5	5	59,99
0,67	4,21	0,79	24,10	1,00	5	5	60,00
0,75	4,12	0,78	23,27	1,00	5	5	60,00
0,83	4,01	0,76	22,43	1,00	5	5	60,00
0,92	3,90	0,74	21,56	1,00	5	5	60,01
1,00	3,78	0,72	20,72	0,99	5	5	59,99
1,08	3,66	0,70	19,90	0,99	5	5	60,01
1,17	3,55	0,68	19,15	0,99	5	5	60,04
1,25	3,41	0,66	18,30	0,99	5	5	60,02
1,33	3,26	0,63	17,38	0,99	5	5	59,99
1,42	3,14	0,61	16,62	0,99	5	5	60,01
1,50	2,99	0,58	15,75	0,99	5	5	60,00
1,58	2,85	0,56	14,98	0,99	5	5	60,01
1,67	2,70	0,53	14,14	0,98	5	5	60,02
1,75	2,56	0,50	13,34	0,98	5	5	59,97
1,83	2,39	0,47	12,48	0,98	5	5	60,00
1,92	2,25	0,44	11,70	0,98	5	5	60,01
2,00	2,11	0,42	10,95	0,98	5	5	60,01
2,08	1,96	0,39	10,14	0,97	5	5	60,00
2,17	1,82	0,36	9,43	0,97	5	5	60,00
2,25	1,67	0,33	8,63	0,97	5	5	60,00
2,33	1,55	0,31	8,00	0,97	5	5	60,02
2,42	1,38	0,28	7,17	0,97	5	5	59,98
2,50	1,25	0,25	6,49	0,96	5	5	60,00
2,58	1,13	0,22	5,89	0,96	5	60	60,00
2,67	1,00	0,20	5,27	0,96	5	60	60,00
2,75	0,89	0,17	4,73	0,96	5	60	60,02

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
2,83	0,78	0,15	4,30	0,95	5	60	59,98
2,92	0,69	0,13	3,96	0,95	60	60	60,02
3,00	0,60	0,11	3,70	0,95	60	60	59,99
3,08	0,54	0,09	3,54	0,94	60	60	60,00
3,17	0,50	0,08	3,47	0,94	60	60	60,00
3,25	0,47	0,07	3,41	0,94	60	60	60,00
3,33	0,47	0,07	3,44	0,93	60	60	60,00
3,42	0,51	0,08	3,62	0,93	60	60	60,01
3,50	0,55	0,09	3,75	0,93	60	60	59,99
3,58	0,59	0,10	3,82	0,92	60	60	60,00
3,67	0,63	0,11	3,95	0,92	60	60	60,00
3,75	0,68	0,12	4,06	0,91	60	60	60,00
3,83	0,73	0,13	4,21	0,91	5	60	59,98
4,00	0,76	0,14	4,28	0,91	5	60	60,00
4,08	0,80	0,15	4,42	0,90	5	60	60,00
4,17	0,83	0,16	4,45	0,90	5	60	60,01
4,25	0,86	0,17	4,55	0,90	5	60	60,02
4,33	0,89	0,17	4,64	0,89	5	60	60,02
4,41	0,91	0,18	4,71	0,89	5	60	60,00
4,50	0,93	0,18	4,77	0,88	5	60	60,01
4,58	0,94	0,19	4,82	0,88	5	60	60,01
4,66	0,97	0,19	4,98	0,88	5	60	59,99
4,75	0,98	0,20	5,06	0,87	5	60	59,99
4,83	0,98	0,20	5,05	0,87	5	60	60,00
4,91	0,97	0,19	5,01	0,86	5	60	59,96
5,00	0,97	0,19	5,20	0,86	5	60	59,99
5,08	0,96	0,19	5,56	0,85	5	60	59,99
5,16	0,94	0,18	5,67	0,85	5	60	60,00
5,25	0,93	0,18	5,40	0,84	5	60	60,00
5,33	0,91	0,18	6,73	0,84	5	60	60,02
5,41	0,92	0,17	13,76	0,83	5	60	59,99
5,50	0,97	0,16	24,06	0,83	5	60	59,98
5,58	1,10	0,16	36,55	0,82	5	60	60,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
5,66	1,26	0,15	49,01	0,82	5	60	60,01
5,75	1,44	0,14	60,54	0,81	5	60	59,99
5,83	1,56	0,13	67,79	0,81	5	60	60,00
5,91	1,61	0,12	70,70	0,80	5	60	60,00
6,00	1,57	0,11	69,25	0,80	47	60	60,00
6,08	1,46	0,10	64,36	0,79	41	60	60,00
6,16	1,29	0,09	56,18	0,79	41	60	59,99
6,25	1,17	0,08	50,15	0,78	43	60	60,00
6,33	1,16	0,07	49,21	0,78	43	60	59,99
6,41	1,30	0,06	54,75	0,77	41	60	60,02
6,50	1,54	0,05	65,07	0,77	41	60	59,99
6,58	1,74	0,05	73,64	0,76	41	60	60,00
6,66	1,99	0,05	80,26	0,76	41	60	60,00
6,75	1,99	0,05	83,36	0,75	37	60	60,00
6,83	2,01	0,06	83,35	0,74	37	60	60,01
6,91	1,95	0,06	80,09	0,74	37	60	59,97
7,00	1,81	0,07	73,57	0,73	41	60	60,01
7,08	1,62	0,07	65,12	0,73	35	60	60,00
7,16	1,43	0,08	56,17	0,72	35	60	60,00
7,25	1,33	0,09	50,04	0,72	35	60	59,99
7,33	1,44	0,10	51,99	0,71	37	60	60,00
7,41	1,71	0,11	60,98	0,70	37	60	60,00
7,50	2,04	0,12	72,92	0,70	35	60	60,02
7,58	2,35	0,13	83,73	0,69	35	60	60,02
7,66	2,59	0,14	92,51	0,68	35	60	59,98
7,75	2,78	0,15	98,40	0,68	35	60	60,01
7,83	2,89	0,15	101,53	0,67	35	60	60,00
7,91	2,97	0,16	103,20	0,67	5	60	60,00
8,00	3,00	0,16	103,40	0,66	5	60	59,97
8,08	2,99	0,17	101,93	0,65	5	60	59,98
8,16	2,89	0,17	97,91	0,65	5	60	60,01
8,25	2,71	0,17	91,02	0,64	5	60	60,01
8,33	2,43	0,16	80,67	0,64	5	60	60,02

Tabla A2.33. Valores numéricos de la figura A2.33.

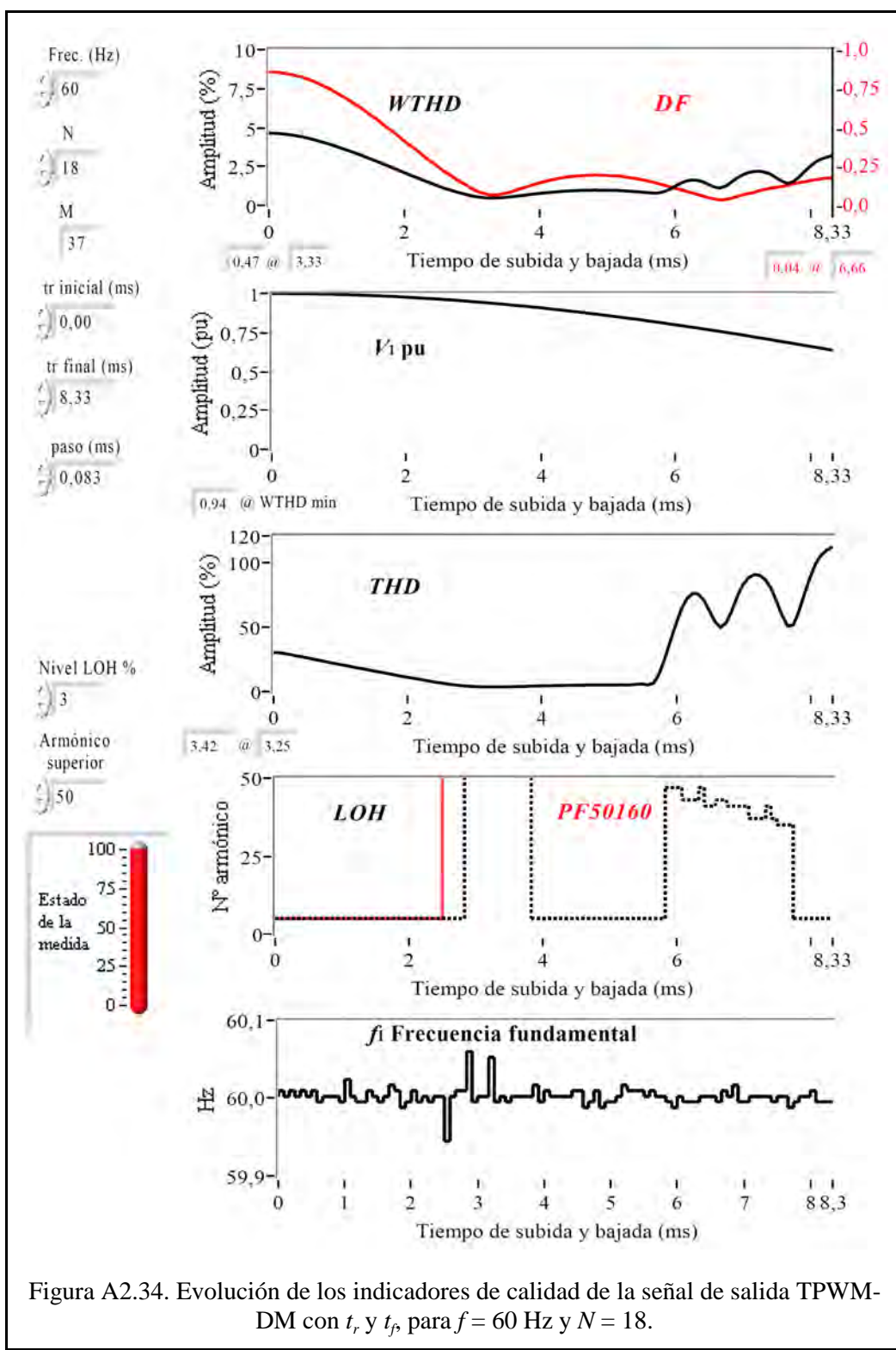


Figura A2.34. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 18$.

$f=60\text{Hz}, N=18$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,02	1,00	5	5	60,00
0,08	4,63	0,86	29,80	1,00	5	5	60,01
0,17	4,61	0,85	29,20	1,00	5	5	60,00
0,25	4,57	0,85	28,45	1,00	5	5	60,01
0,33	4,52	0,84	27,49	1,00	5	5	60,00
0,42	4,46	0,83	26,72	1,00	5	5	60,01
0,50	4,39	0,82	25,85	1,00	5	5	60,00
0,58	4,31	0,81	25,02	1,00	5	5	60,01
0,67	4,22	0,80	24,19	1,00	5	5	60,00
0,75	4,12	0,78	23,27	1,00	5	5	60,00
0,83	4,01	0,76	22,41	1,00	5	5	60,00
0,92	3,90	0,74	21,59	0,99	5	5	60,00
1,00	3,78	0,72	20,69	0,99	5	5	60,00
1,08	3,66	0,70	19,91	0,99	5	5	60,02
1,17	3,53	0,68	19,05	0,99	5	5	60,00
1,25	3,40	0,66	18,22	0,99	5	5	60,00
1,33	3,27	0,63	17,44	0,99	5	5	60,00
1,42	3,13	0,61	16,59	0,99	5	5	60,01
1,50	2,99	0,58	15,75	0,99	5	5	60,00
1,58	2,85	0,56	14,96	0,99	5	5	60,00
1,67	2,70	0,53	14,13	0,98	5	5	60,02
1,75	2,56	0,50	13,37	0,98	5	5	60,02
1,83	2,41	0,47	12,55	0,98	5	5	60,01
1,92	2,25	0,44	11,70	0,98	5	5	59,99
2,00	2,10	0,42	10,93	0,98	5	5	60,00
2,08	1,96	0,39	10,17	0,97	5	5	60,01
2,17	1,82	0,36	9,41	0,97	5	5	60,00
2,25	1,67	0,33	8,67	0,97	5	5	60,00
2,33	1,52	0,30	7,89	0,97	5	5	60,00
2,42	1,39	0,28	7,20	0,97	5	5	60,00
2,50	1,25	0,25	6,49	0,96	5	5	60,00
2,58	1,11	0,22	5,81	0,96	5	60	59,94
2,67	1,01	0,20	5,30	0,96	5	60	60,00
2,75	0,89	0,17	4,78	0,96	5	60	60,01

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
2,83	0,79	0,15	4,33	0,95	5	60	60,01
2,92	0,71	0,13	4,03	0,95	60	60	60,06
3,00	0,61	0,11	3,72	0,95	60	60	60,00
3,08	0,54	0,09	3,57	0,94	60	60	60,00
3,17	0,50	0,08	3,48	0,94	60	60	60,00
3,25	0,47	0,07	3,42	0,94	60	60	60,05
3,33	0,47	0,07	3,48	0,94	60	60	60,00
3,42	0,49	0,07	3,53	0,93	60	60	60,00
3,50	0,51	0,08	3,63	0,93	60	60	60,00
3,58	0,54	0,09	3,67	0,93	60	60	60,00
3,67	0,59	0,10	3,86	0,92	60	60	60,00
3,75	0,63	0,11	3,93	0,92	60	60	60,00
3,83	0,67	0,12	4,04	0,91	60	60	60,00
3,92	0,73	0,13	4,21	0,91	5	60	60,02
4,00	0,77	0,14	4,33	0,91	5	60	60,00
4,08	0,80	0,15	4,41	0,90	5	60	60,01
4,17	0,84	0,16	4,53	0,90	5	60	60,00
4,25	0,87	0,17	4,58	0,90	5	60	60,00
4,33	0,90	0,18	4,70	0,89	5	60	60,00
4,41	0,92	0,18	4,76	0,89	5	60	60,00
4,50	0,93	0,18	4,76	0,88	5	60	60,01
4,58	0,96	0,19	4,85	0,88	5	60	60,01
4,66	0,96	0,19	4,90	0,88	5	60	59,99
4,75	0,97	0,19	4,95	0,87	5	60	60,00
4,83	0,98	0,20	4,96	0,87	5	60	60,01
4,91	0,97	0,19	4,94	0,86	5	60	59,99
5,00	0,97	0,19	4,99	0,86	5	60	60,00
5,08	0,95	0,19	5,01	0,85	5	60	60,00
5,16	0,96	0,19	5,06	0,85	5	60	60,00
5,25	0,93	0,18	4,99	0,84	5	60	60,02
5,33	0,91	0,18	5,07	0,84	5	60	60,01
5,41	0,89	0,17	5,58	0,83	5	60	60,01
5,50	0,86	0,17	5,69	0,83	5	60	60,01
5,58	0,82	0,16	5,06	0,82	5	60	60,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
5,66	0,79	0,15	6,46	0,82	5	60	60,01
5,75	0,78	0,14	13,71	0,81	5	60	60,00
5,83	0,86	0,13	25,27	0,81	5	60	60,00
5,91	1,01	0,12	38,64	0,80	47	60	60,00
6,00	1,21	0,11	52,10	0,80	47	60	59,99
6,08	1,41	0,10	63,58	0,79	47	60	60,00
6,16	1,56	0,09	71,87	0,79	43	60	60,00
6,25	1,63	0,08	75,58	0,78	43	60	60,00
6,33	1,61	0,07	75,02	0,78	43	60	60,00
6,41	1,52	0,06	70,26	0,77	47	60	60,00
6,50	1,35	0,05	62,18	0,77	41	60	60,00
6,58	1,18	0,04	53,82	0,76	41	60	60,00
6,66	1,11	0,04	49,37	0,76	43	60	60,00
6,75	1,23	0,04	53,03	0,75	43	60	60,01
6,83	1,46	0,04	62,45	0,74	41	60	60,00
6,91	1,73	0,06	73,42	0,74	41	60	60,02
7,00	1,95	0,07	82,27	0,73	41	60	60,00
7,08	2,10	0,08	87,72	0,73	41	60	60,00
7,16	2,17	0,08	90,05	0,72	37	60	60,00
7,25	2,19	0,09	89,61	0,72	37	60	60,00
7,33	2,14	0,10	86,17	0,71	37	60	60,00
7,41	2,00	0,11	79,49	0,70	41	60	60,00
7,50	1,78	0,11	69,46	0,70	37	60	60,00
7,58	1,55	0,12	58,54	0,69	35	60	60,00
7,66	1,42	0,13	50,47	0,69	35	60	60,00
7,75	1,51	0,14	51,19	0,68	35	60	59,99
7,83	1,80	0,15	61,48	0,67	5	60	60,00
7,91	2,15	0,15	75,14	0,67	5	60	60,00
8,00	2,49	0,16	87,79	0,66	5	60	60,00
8,08	2,78	0,16	98,54	0,65	5	60	60,01
8,16	2,97	0,17	105,06	0,65	5	60	60,00
8,25	3,10	0,17	108,96	0,64	5	60	60,00
8,33	3,19	0,17	111,31	0,64	5	60	60,00

Tabla A2.34. Valores numéricos de la figura A2.34.

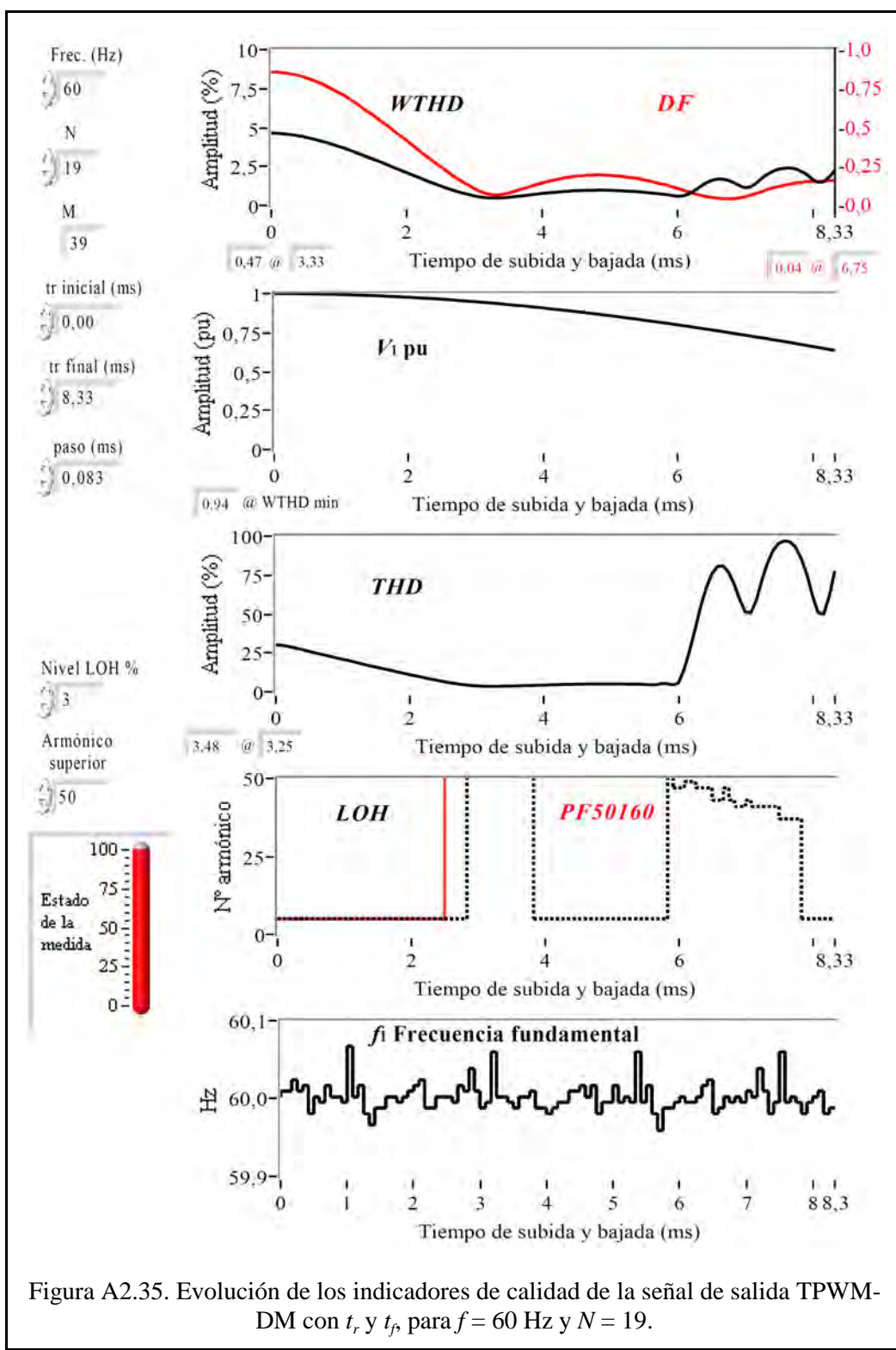


Figura A2.35. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 19$.

f=60Hz, N=19

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50160 (HO)	f_1 (Hz)
0.00	4.64	0.86	30.02	1.00	5	5	60.00
0.08	4.63	0.86	29.82	1.00	5	5	60.01
0.17	4.61	0.85	29.26	1.00	5	5	60.01
0.25	4.57	0.85	28.50	1.00	5	5	60.02
0.33	4.52	0.84	27.62	1.00	5	5	60.01
0.42	4.46	0.83	26.75	1.00	5	5	60.02
0.50	4.39	0.82	25.84	1.00	5	5	59.98
0.58	4.31	0.81	25.01	1.00	5	5	60.00
0.67	4.21	0.79	24.11	1.00	5	5	60.00
0.75	4.12	0.78	23.32	1.00	5	5	60.02
0.83	4.01	0.76	22.43	1.00	5	5	60.00
0.92	3.90	0.74	21.57	0.99	5	5	60.00
1.00	3.78	0.72	20.73	0.99	5	5	60.00
1.08	3.69	0.71	20.07	0.99	5	5	60.07
1.17	3.54	0.68	19.07	0.99	5	5	60.00
1.25	3.41	0.66	18.27	0.99	5	5	60.02
1.33	3.26	0.63	17.35	0.99	5	5	59.98
1.42	3.11	0.61	16.49	0.99	5	5	59.97
1.50	2.99	0.58	15.77	0.99	5	5	59.99
1.58	2.84	0.56	14.95	0.99	5	5	59.99
1.67	2.70	0.53	14.14	0.98	5	5	60.00
1.75	2.56	0.50	13.36	0.98	5	5	60.00
1.83	2.40	0.47	12.51	0.98	5	5	60.00
1.92	2.26	0.44	11.74	0.98	5	5	60.00
2.00	2.11	0.42	10.95	0.98	5	5	60.01
2.08	1.97	0.39	10.20	0.97	5	5	60.02
2.17	1.82	0.36	9.46	0.97	5	5	59.99
2.25	1.67	0.33	8.64	0.97	5	5	59.99
2.33	1.53	0.30	7.90	0.97	5	5	59.99
2.42	1.39	0.28	7.22	0.97	5	5	60.00
2.50	1.26	0.25	6.53	0.96	5	5	60.00
2.58	1.13	0.22	5.86	0.96	5	60	60.00
2.67	1.00	0.20	5.28	0.96	5	60	60.00
2.75	0.89	0.17	4.76	0.96	5	60	60.02
5.66	0.78	0.15	4.52	0.82	5	60	59.98
5.75	0.74	0.14	5.23	0.81	5	60	59.96
5.83	0.71	0.13	5.27	0.81	5	60	59.99
5.91	0.64	0.12	4.38	0.80	60	60	59.99
6.00	0.59	0.11	5.55	0.80	47	60	60.00
6.08	0.60	0.10	13.65	0.79	47	60	60.00
6.16	0.71	0.09	26.05	0.79	49	60	60.00
6.25	0.92	0.08	40.20	0.78	49	60	60.00
6.33	1.17	0.07	54.54	0.78	47	60	60.00
6.41	1.40	0.06	66.75	0.77	47	60	60.02
6.50	1.58	0.05	75.57	0.77	47	60	60.02
6.58	1.69	0.05	80.50	0.76	43	60	59.98
6.66	1.70	0.04	80.68	0.76	43	60	59.99
6.75	1.63	0.04	76.75	0.75	47	60	60.00
6.83	1.48	0.04	69.01	0.74	43	60	60.00
6.91	1.28	0.05	59.14	0.74	41	60	60.00
7.00	1.15	0.05	51.08	0.73	41	60	60.00
7.08	1.19	0.07	50.81	0.73	43	60	60.01
7.16	1.41	0.08	59.09	0.72	41	60	60.00
7.25	1.72	0.09	72.01	0.72	41	60	60.04
7.33	1.99	0.10	82.92	0.71	41	60	60.01
7.41	2.20	0.11	91.02	0.70	41	60	59.98
7.50	2.33	0.12	95.43	0.70	41	60	60.00
7.58	2.39	0.13	96.83	0.69	37	60	60.06
7.66	2.41	0.14	96.28	0.69	37	60	60.00
7.75	2.35	0.14	92.77	0.68	37	60	60.00
7.83	2.20	0.15	85.56	0.67	37	60	60.00
7.91	1.99	0.15	75.54	0.67	5	60	59.98
8.00	1.69	0.15	61.71	0.66	5	60	60.00
8.08	1.49	0.15	50.87	0.65	5	60	60.00
8.16	1.52	0.15	49.85	0.65	5	60	60.01
8.25	1.82	0.16	61.12	0.64	5	60	59.98
8.33	2.23	0.16	77.45	0.64	5	60	59.99
2.83	0.78	0.15	4.31	0.95	5	60	60.01
2.92	0.70	0.13	4.00	0.95	60	60	60.04
3.00	0.61	0.11	3.75	0.95	60	60	60.01
3.08	0.54	0.09	3.57	0.94	60	60	59.99
3.17	0.50	0.08	3.51	0.94	60	60	60.00
3.25	0.48	0.07	3.48	0.94	60	60	60.06
3.33	0.47	0.07	3.51	0.94	60	60	60.00
3.42	0.49	0.07	3.58	0.93	60	60	60.00
3.50	0.51	0.08	3.65	0.93	60	60	60.00
3.58	0.55	0.09	3.79	0.93	60	60	59.99
3.67	0.60	0.10	3.89	0.92	60	60	60.00
3.75	0.63	0.11	3.95	0.92	60	60	60.00
3.83	0.67	0.12	4.05	0.91	60	60	60.01
3.92	0.72	0.13	4.20	0.91	5	60	59.99
4.00	0.76	0.14	4.27	0.91	5	60	59.99
4.08	0.80	0.15	4.39	0.90	5	60	59.98
4.17	0.83	0.16	4.49	0.90	5	60	59.99
4.25	0.86	0.17	4.55	0.90	5	60	60.00
4.33	0.90	0.18	4.67	0.89	5	60	60.00
4.41	0.92	0.18	4.75	0.89	5	60	60.01
4.50	0.94	0.19	4.83	0.88	5	60	60.01
4.58	0.95	0.19	4.87	0.88	5	60	60.02
4.66	0.97	0.19	4.93	0.88	5	60	60.00
4.75	0.97	0.19	4.91	0.87	5	60	60.02
4.83	0.99	0.20	5.00	0.87	5	60	59.98
4.91	0.98	0.20	4.97	0.86	5	60	60.00
5.00	0.97	0.19	4.98	0.86	5	60	60.00
5.08	0.96	0.19	4.94	0.85	5	60	60.02
5.16	0.95	0.19	4.93	0.85	5	60	60.00
5.25	0.92	0.18	4.82	0.84	5	60	60.00
5.33	0.91	0.18	4.83	0.84	5	60	60.00
5.41	0.89	0.17	4.83	0.84	5	60	60.06
5.50	0.85	0.17	4.67	0.83	5	60	60.00
5.58	0.81	0.16	4.43	0.82	5	60	60.02

Tabla A2.35. Valores numéricos de la figura A2.35.

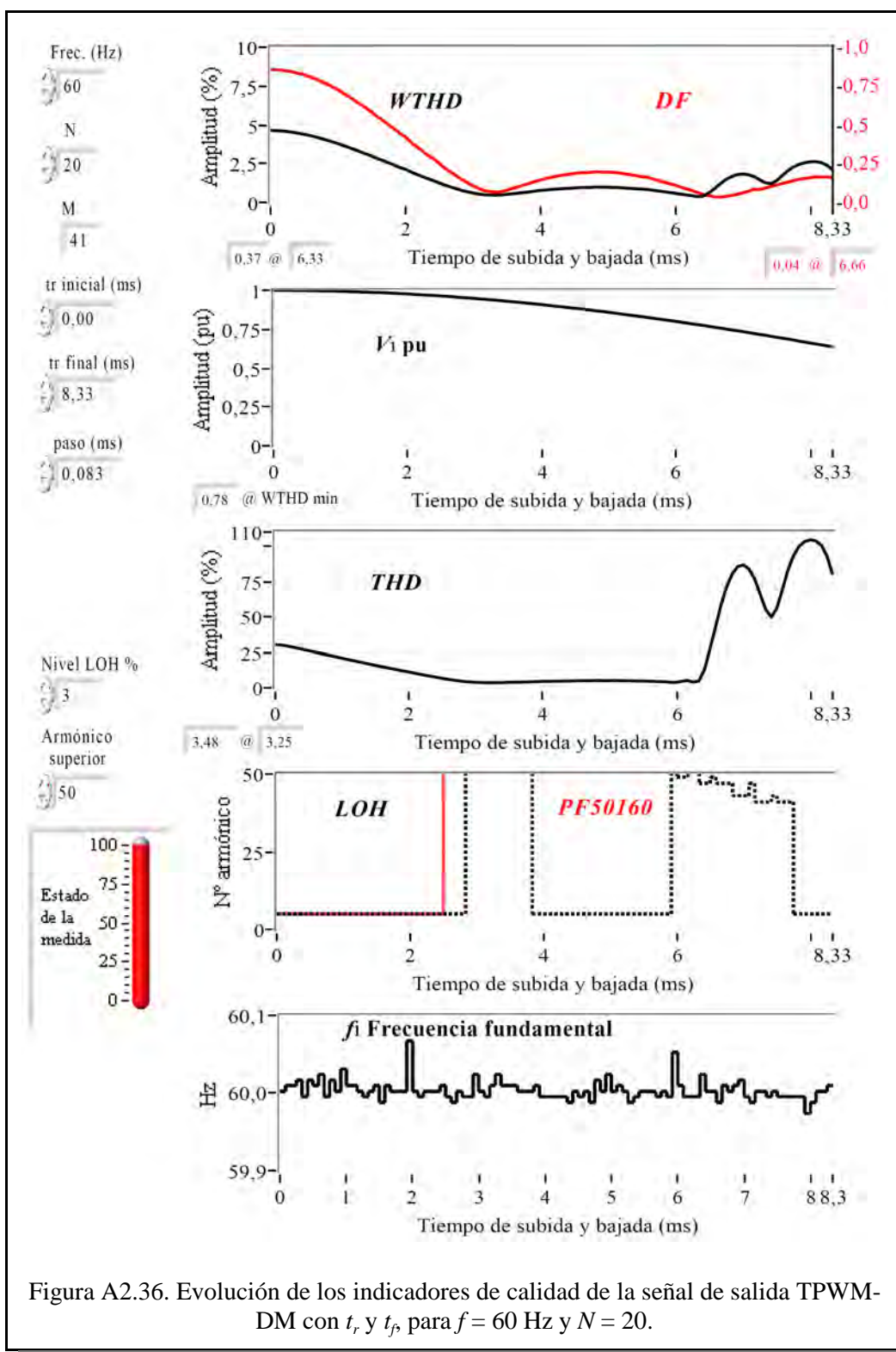


Figura A2.36. Evolución de los indicadores de calidad de la señal de salida TPWM-DM con t_r y t_f para $f = 60$ Hz y $N = 20$.

$f_s=60\text{Hz}, N=20$

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
0,00	4,64	0,86	30,02	1,00	5	5	60,00
0,08	4,63	0,86	29,81	1,00	5	5	60,00
0,17	4,61	0,85	29,26	1,00	5	5	60,01
0,25	4,57	0,85	28,46	1,00	5	5	60,02
0,33	4,52	0,84	27,62	1,00	5	5	60,02
0,42	4,46	0,83	26,66	1,00	5	5	60,00
0,50	4,39	0,82	25,90	1,00	5	5	60,02
0,58	4,31	0,81	25,02	1,00	5	5	60,01
0,67	4,23	0,80	24,21	1,00	5	5	60,02
0,75	4,12	0,78	23,29	1,00	5	5	60,00
0,83	4,02	0,76	22,47	1,00	5	5	60,02
0,92	3,91	0,74	21,60	0,99	5	5	60,00
1,00	3,80	0,73	20,82	0,99	5	5	60,03
1,08	3,66	0,70	19,91	0,99	5	5	60,01
1,17	3,54	0,68	19,09	0,99	5	5	60,01
1,25	3,40	0,66	18,23	0,99	5	5	60,00
1,33	3,27	0,63	17,39	0,99	5	5	60,00
1,42	3,13	0,61	16,57	0,99	5	5	60,00
1,50	2,99	0,58	15,78	0,99	5	5	60,01
1,58	2,82	0,55	14,84	0,98	5	5	59,99
1,67	2,71	0,53	14,19	0,98	5	5	60,01
1,75	2,56	0,50	13,36	0,98	5	5	60,00
1,83	2,41	0,47	12,55	0,98	5	5	60,00
1,92	2,25	0,44	11,74	0,98	5	5	60,00
2,00	2,14	0,42	11,13	0,98	5	5	60,07
2,08	1,97	0,39	10,20	0,97	5	5	60,00
2,17	1,82	0,36	9,43	0,97	5	5	60,00
2,25	1,68	0,33	8,68	0,97	5	5	60,00
2,33	1,53	0,30	7,94	0,97	5	5	60,00
2,42	1,41	0,28	7,28	0,97	5	5	60,00
2,50	1,26	0,25	6,55	0,96	5	5	60,01
2,58	1,13	0,22	5,87	0,96	5	60	60,00
2,67	1,00	0,20	5,27	0,96	5	60	59,99
2,75	0,89	0,17	4,77	0,96	5	60	60,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
2,83	0,78	0,15	4,30	0,95	5	60	60,00
2,92	0,69	0,13	3,96	0,95	60	60	60,00
3,00	0,61	0,11	3,74	0,95	60	60	60,02
3,08	0,54	0,09	3,55	0,94	60	60	60,00
3,17	0,50	0,08	3,49	0,94	60	60	60,00
3,25	0,48	0,07	3,48	0,94	60	60	60,01
3,33	0,48	0,07	3,52	0,94	60	60	60,02
3,42	0,49	0,07	3,56	0,93	60	60	60,01
3,50	0,52	0,08	3,68	0,93	60	60	60,01
3,58	0,56	0,09	3,83	0,93	60	60	60,01
3,67	0,59	0,10	3,87	0,92	60	60	60,00
3,75	0,64	0,11	4,01	0,92	60	60	60,00
3,83	0,68	0,12	4,11	0,91	60	60	60,00
3,92	0,73	0,13	4,24	0,91	5	60	60,01
4,00	0,77	0,14	4,35	0,91	5	60	60,00
4,08	0,81	0,15	4,43	0,90	5	60	60,00
4,17	0,84	0,16	4,51	0,90	5	60	60,00
4,25	0,87	0,17	4,59	0,90	5	60	60,00
4,33	0,90	0,18	4,69	0,89	5	60	60,00
4,41	0,91	0,18	4,71	0,89	5	60	59,99
4,50	0,94	0,19	4,80	0,88	5	60	60,00
4,58	0,96	0,19	4,87	0,88	5	60	60,00
4,66	0,97	0,19	4,90	0,88	5	60	60,00
4,75	0,97	0,19	4,91	0,87	5	60	59,99
4,83	0,99	0,20	5,01	0,87	5	60	60,02
4,91	0,98	0,20	4,99	0,86	5	60	60,00
5,00	0,98	0,19	4,99	0,86	5	60	60,02
5,08	0,98	0,19	5,00	0,85	5	60	60,00
5,16	0,96	0,19	4,96	0,85	5	60	60,01
5,25	0,93	0,18	4,86	0,84	5	60	60,00
5,33	0,91	0,18	4,81	0,84	5	60	59,99
5,41	0,88	0,17	4,73	0,83	5	60	60,00
5,50	0,86	0,17	4,61	0,83	5	60	60,00
5,58	0,84	0,16	4,52	0,82	5	60	60,00

t_r (ms)	WTHD (%)	DF (%)	THD (%)	V_1 (pu)	LOH (HO)	PF 50/60 (HO)	f_1 (Hz)
5,66	0,79	0,15	4,34	0,82	5	60	60,00
5,75	0,74	0,14	4,28	0,81	5	60	60,00
5,83	0,69	0,13	4,08	0,81	5	60	60,00
5,91	0,64	0,12	3,73	0,80	5	60	60,00
6,00	0,60	0,11	3,73	0,80	60	60	60,05
6,08	0,54	0,10	4,56	0,79	49	60	60,01
6,16	0,49	0,09	5,06	0,79	49	60	60,00
6,25	0,43	0,08	3,84	0,78	60	60	60,00
6,33	0,37	0,06	4,71	0,78	60	60	60,00
6,41	0,40	0,05	12,63	0,77	47	60	60,02
6,50	0,61	0,04	27,07	0,77	47	60	60,00
6,58	0,90	0,04	42,57	0,76	49	60	60,00
6,66	1,20	0,04	58,19	0,76	47	60	59,99
6,75	1,47	0,04	71,22	0,75	47	60	60,01
6,83	1,66	0,04	80,29	0,74	47	60	60,00
6,91	1,79	0,05	85,52	0,74	43	60	60,01
7,00	1,83	0,06	86,54	0,73	43	60	60,02
7,08	1,79	0,07	83,74	0,73	43	60	60,00
7,16	1,67	0,08	76,77	0,72	47	60	59,99
7,25	1,46	0,08	66,20	0,72	41	60	60,00
7,33	1,27	0,09	55,08	0,71	41	60	60,00
7,41	1,22	0,10	49,75	0,70	41	60	60,00
7,50	1,40	0,11	55,86	0,70	43	60	60,00
7,58	1,71	0,12	69,19	0,69	41	60	60,00
7,66	2,03	0,13	82,75	0,69	41	60	60,00
7,75	2,28	0,14	93,30	0,68	41	60	60,00
7,83	2,45	0,15	99,80	0,67	5	60	60,00
7,91	2,55	0,15	103,12	0,67	5	60	60,00
8,00	2,61	0,16	104,41	0,66	5	60	59,97
8,08	2,63	0,16	103,67	0,65	5	60	59,99
8,16	2,56	0,16	100,39	0,65	5	60	60,00
8,25	2,39	0,16	92,76	0,64	5	60	60,00
8,33	2,11	0,16	80,05	0,64	5	60	60,01

Tabla A2.36. Valores numéricos de la figura A2.36.

Anexo A3

Programación del μ C

Índice

Anexo A3. Programación del μC	A3-1
A3.1 Definiciones	A3-1
A3.2 Rutina de interrupción del temporizador 1	A3-3
A3.3 Programa de inicio de funcionamiento	A3-4
A3.4 Programa principal	A3-7
A3.5 Rutina de arranque suave	A3-9
A3.6 Rutina de tratamiento del ADC	A3-11
A3.7 Tablas de modulación	A3-13
A3.8 Tamaño del programa	A3-15

Índice de tablas

Tabla A3.1a. Nombre, descripción y localización de los registros, variables y constantes utilizados en el programa.	A3-1
Tabla A3.1b. Nombre, descripción y localización de los registros, variables y constantes utilizados en el programa (continuación).	A3-2
Tabla A3.1c. Nombre y descripción de los registros, variables y constantes utilizados en el programa (continuación).	A3-3

Índice de listados

Listado A3.1. Rutina de interrupción del temporizador 1.	A3-4
Listado A3.2a. Programa de inicio del sistema.	A3-4
Listado A3.2b. Programa de inicio del sistema (continuación).	A3-4
Listado A3.2c. Programa de inicio del sistema (continuación).	A3-6
Listado A3.3a. Programa principal del sistema.	A3-8
Listado A3.3b. Programa principal del sistema (continuación).	A3-9
Listado A3.4a. Rutina de arranque suave.	A3-9
Listado A3.4b. Rutina de arranque suave (continuación).	A3-11
Listado A3.5. Rutina de tratamiento del ADC.	A3-12
Listado A3.6a. Tablas de modulación TPWM-DM.	A3-13
Listado A3.6b. Tablas de modulación TPWM-DM (continuación).	A3-14

Anexo A3. Programación del μC

Este anexo contiene toda la programación complementaria a la modulación, descrita en el capítulo 5. Estos programas son necesarios para el funcionamiento del modulador, pero no son en sí mismos los que realizan la modulación.

A3.1 Definiciones

A lo largo del programa se utilizan numerosas etiquetas para identificar registros, variables, constantes. La tabla A3.1 resume estas etiquetas junto con una descripción de su función y su localización en el sistema.

Nombre	Tipo	Descripción	Direcc.
ACTUAR	V	0xFF = fin ciclo PWM	0x0A
ACTUAR2	V	0xFF = fin tiempo programado arranque suave	0x23
ADCON0	R	Control ADC	0x0FC2
ADCON1	R	Control ADC	0x0FC1
BSR	R	Selección banco memoria	0x0FE0
BSR_TEMP	V	Almacén temporal BSR	0x02
BSR_TEMP2	V	Almacén temporal BSR	0x86
CAMBIOTR	V	Indicador cambio de fase en arranque suave	0x82
CCP1CON	R	Control CCP1	0x0FBD
CCPR1H	R	Valor H CCP1	0x0FBF
CCPR1L	R	Valor L CCP1	0x0FBE
CONFIGxH	R	Configuración del μC	0x300001
CONFIG2H	R	Configuración del μC	0x300003
CONFIG2L	R	Configuración del μC	0x300002
CONFIG3H	R	Configuración del μC	0x300005
CONFIG4L	R	Configuración del μC	0x300006
CONFIG5H	R	Configuración del μC	0x300009
CONFIG5L	R	Configuración del μC	0x300008

R= Registro del μC , V = Variable

Tabla A3.1a. Nombre, descripción y localización de los registros, variables y constantes utilizados en el programa.

CONFIG6H	R	Configuración del μ C	0x3000B
CONFIG6L	R	Configuración del μ C	0x3000A
CONFIG7H	R	Configuración del μ C	0x3000D
CONFIG7L	R	Configuración del μ C	0x3000C
CONTADOR1	V	Cuenta INT modulación para señal 50 Hz	0x09
contcfg6L	C	Valor para CONFIG6L	0xFF**
contcfg7H	C	Valor para CONFIG7H	0xFF**
contcfg7L	C	Valor para CONFIG7L	0xFF**
CUENTAINT	V	Lleva n° INT modulación para verificación	0x0B
DEFPORTA	C	Definición de las patillas del puerto A	0xFF**
DEFPORTB	C	Definición de las patillas del puerto B	0xF1**
DIRTABLA2H	V	Parte alta de la dirección de la tabla 2	0x0E
DIRTABLA2L	V	Parte baja de dirección de la tabla 2	0x0D
DIRTABLA3H	V	Parte alta de la dirección de la tabla 3	0x10
DIRTABLA3L	V	Parte baja de dirección de la tabla 3	0x0F
DIRTABLA4H	V	Parte alta de la dirección de la tabla 4	0x12
DIRTABLA4L	V	Parte baja de dirección de la tabla 4	0x11
DIRTABLA5H	V	Parte alta de la dirección de la tabla 5	0x14
DIRTABLA5L	V	Parte baja de dirección de la tabla 5	0x13
DIRTABLA6H	V	Parte alta de la dirección de la tabla 6	0x16
DIRTABLA6L	V	Parte baja de dirección de la tabla 6	0x15
DIRTABLA7H	V	Parte alta de la dirección de la tabla 7	0x18
DIRTABLA7L	V	Parte baja de dirección de la tabla 7	0x17
DIRTABLA8H	V	Parte alta de la dirección de la tabla 8	0x1A
DIRTABLA8L	V	Parte baja de dirección de la tabla 8	0x19
DIRTABLA9H	V	Parte alta de la dirección de la tabla 9	0x1C
DIRTABLA9L	V	Parte baja de dirección de la tabla 9	0x1B
DIRTABLAH	V	Parte alta de la dirección de la tabla en uso	0x1E
DIRTABLAL	V	Parte baja de la dirección de la tabla en uso	0x1D
ENTRADA	V	0xFF = arranque suave sí	0x87
TR	V	Cuenta TR arranque suave	0x20
TRFINAL	V	Identifica TR final (2) de arranque suave	0x83
INTCON	R	Control de interrupciones	0x0FF2
IPR1	R	Prioridad de interrupciones	0x0F9F
IPR2	R	Prioridad de interrupciones	0x0FA2
LONGTABLA	V	Longitud de las tablas	0x0C
PIE1	R	Habilitación de interrupciones	0x0F9D
PIE2	R	Habilitación de interrupciones	0x0FA0
PIR1	R	Interrupciones periféricos	0x0F9E
PIR2	R	Interrupciones periféricos	0x0FA1
PORTA	R	Puerto A	0x0F80
PORTB	R	Puerto B	0x0F81

R= Registro del μ C, V = Variable, C = Constante (no dirección)

Tabla A3.1b. Nombre, descripción y localización de los registros, variables y constantes utilizados en el programa (continuación).

Nombre	Tipo	Descripción	Direcc.
PORTD	R	Puerto D	0x0F83
ST_TEMP2	V	Almacén temporal STATUS	0x85
STATUS_TEMP	V	Almacén temporal STATUS	0x01
T1CON	R	Control temporizador 1	0x0FCD
T3CON	R	Control temporizador 3	0x0FB1
TBLPTRH	R	Parte alta del puntero de tabla	0x0FF7
TBLPTRL	R	Parte baja del puntero de tabla	0x0FF6
TBLPTRU	R	Parte superior del puntero de tabla	0x0FF8
TEMP	V	Contenido temporal ADC	0x80
TIEMPO1	V	Nº interrupciones temporizador 3	0x22
TMR1H	R	Parte alta temporizador 1	0x0FCF
TMR1L	R	Parte baja temporizador 1	0x0FCE
TMR3H	R	Parte alta temporizador 3	0x0FB3
TMR3L	R	Parte baja temporizador 3	0x0FB2
TRISA	R	Registro de dirección del puerto A	0x0F92
TRISB	R	Registro de dirección del puerto B	0x0F93
TRISD	R	Registro de dirección del puerto D	0x0F95
W_TEMP	V	Almacén temporal para WREG	0x00
W_TEMP2	V	Almacén temporal para WREG	0x84
WREG	R	Registro de trabajo del μ C	0x0FE8

R= Registro del μ C, V = Variable

Tabla A3.1c. Nombre y descripción de los registros, variables y constantes utilizados en el programa (continuación).

A3.2 Rutina de interrupción del temporizador 1

En esta implementación, el temporizador 1 tiene como misión establecer los intervalos en los que se cambia la potencia de la señal (el tiempo de subida de esta) durante la secuencia de arranque suave. Para ello, a este temporizador se le hace funcionar con un reloj de 1 MHz de frecuencia y se inicia con el valor 0x0000 para que genere interrupción cada 65.536 μ s.

La rutina de interrupción de este temporizador es la que se muestra en el listado A3.1. En ella se cuenta el número de veces que sucede esta interrupción, disminuyendo en una unidad el contenido de la variable TIEMPO1 (línea 80) y cuando sucede 19 veces, (TIEMPO1 = 0x00), recarga el valor de la variable a 0x13 (líneas 82 y 83) y cambia el contenido de la variable ACTUAR2 de 0x00 a 0xFF

(línea 84). El tiempo transcurrido durante 19 interrupciones de este temporizador es $\approx 1,25$ s, que es el tiempo que se ha establecido para el cambio de cada nivel de potencia. Cuando el valor de ACTUAR2 es 0xFF, la parte del programa que realiza el arranque suave cambia la pendiente de la señal de salida.

Las líneas 86 a 89 constituyen la salida de la rutina de interrupción, desactivando el indicador de la interrupción (línea 86) y recuperando de la memoria el registro de trabajo (WREG, línea 87) y el registro de estado (STATUS, línea 88).

```

00074 ;*****
00075 ;interrupcion del temporizador
00076
00077 org 0x800
000800 6E00 00078 INTTEM1 movwf W_TEMP
000802 CFD8 F001 00079 movff STATUS, STATUS_TEMP
000806 0622 00080 INTTEM1B decf TIEMPO1
000808 E103 00081 bnz INTTEMP1_1
00080A 0E13 00082 movlw 0x13
00080C 6E22 00083 movwf TIEMPO1
00080E 6823 00084 setf ACTUAR2
00085
000810 909E 00086 INTTEMP1_1 bcf PIR1,0
000812 5000 00087 movf W_TEMP,W
000814 C001 FFD8 00088 movff STATUS_TEMP,STATUS
000818 0011 00089 retfie 1

```

Listado A3.1. Rutina de interrupción del temporizador 1.

A3.3 Programa de inicio de funcionamiento

Aunque la rutina de interrupción de la modulación es la parte más importante y crítica del programa, antes de poder comenzar a ejecutarla es necesario iniciar todo el sistema. Para ello se ha escrito el programa de iniciación que se puede ver en los listados A3.2a, b y c. En el listado A3.2a se establecen los puntos de entrada de las distintas partes: el programa de iniciación del sistema en la dirección 0x0080, donde salta desde la iniciación física (reset); la rutina de interrupción de la modulación, en la dirección 0x0900, donde salta cuando hay interrupción del módulo CCP1 y la rutina de interrupción de baja prioridad en la dirección 0x0800, donde salta cuando hay interrupción del temporizador TRM1.

```

000000          00014 ;Comienzo del programa
000000 EF40 F000 00015          org      0x00
000000          00016          goto    INICIO ;INICIO en 0x0080
000000          00017
000000          00018
000008          00019          org      0x08 ;INT prioridad alta
000008 EF80 F004 00020          goto    INTMOD ;en 0x900
000008          00021
000008          00022
000018          00023          org      0x18 ;INT prioridad baja
000018 EF00 F004 00024          goto    INT2 ;en 0x800
    
```

Listado A3.2a. Programa de inicio del sistema.

```

000092 ;*****
000093 ;Comienzo del codigo del programa
000094
000080          00095          org      0x80 ;Inicio del sistema
000080 0EFF          00096          movlw  DEFPORTA
000082 6E92          00097          movwf  TRISA
000084 0EF1          00098          movlw  DEFPORTB
000086 6E93          00099          movwf  TRISB
000088 6883          00100          setf  PORTD
00008A 6A95          00101          clrf  TRISD
00008A          00102
00008C 0E00          00103          movlw  0x00
00008E CFE8 F00B     00104          movff  WREG,CUENTAINT
000092 CFE8 F003     00105          movff  WREG,TEMP2
000096 CFE8 F01F     00106          movff  WREG,CONTADOR2
00009A 0E09          00107          movlw  0x09
00009C CFE8 F020     00108          movff  WREG,TR
0000A0 6987          00109          setf  ENTRADA ;entrada suave si
0000A2 0E02          00110          movlw  0x02
0000A4 CFE8 F083     00111          movff  WREG,TRFINAL
0000A8 6A0A          00112          clrf  ACTUAR ;actuar=no
0000AA 0E16          00113          movlw  0x16
0000AC 6E09          00114          movwf  CONTADOR1
0000AE 9281          00115          bcf  PORTB,1
0000B0 6A23          00116          clrf  ACTUAR2
0000B0          00117
0000B2 0E16          00118          ;inicia variables TABLAN
0000B4 CFE8 F00C     00119          movlw  0x16
0000B8 CFE8 F080     00120          movff  WREG,LONGTABLA
0000BC 4780          00121          movff  WREG,TEMP
0000BE 0E10          00122          rlnof TEMP
0000C0 CFE8 F00E     00123          movlw  0x10
0000C4 CFE8 F010     00124          movff  WREG,DIRTABLA2H
0000C8 CFE8 F012     00125          movff  WREG,DIRTABLA3H
0000CC CFE8 F014     00126          movff  WREG,DIRTABLA4H
0000D0 CFE8 F016     00127          movff  WREG,DIRTABLA5H
0000D4 CFE8 F018     00128          movff  WREG,DIRTABLA6H
0000D8 0E11          00129          movff  WREG,DIRTABLA7H
0000DA CFE8 F01A     00130          movlw  0x11
0000DE CFE8 F01C     00131          movff  WREG,DIRTABLA8H
0000E2 0E00          00132          movff  WREG,DIRTABLA9H
0000E4 CFE8 F00D     00133          movlw  0x00
0000E8 2580          00134          movff  WREG,DIRTABLA2L
0000EA CFE8 F00F     00135          addwf  TEMP,WREG
0000EE 2580          00136          movff  WREG,DIRTABLA3L
0000F0 CFE8 F011     00137          addwf  TEMP,WREG
0000F4 2580          00138          movff  WREG,DIRTABLA4L
0000F6 CFE8 F013     00139          addwf  TEMP,WREG
0000FA 2580          00140          movff  WREG,DIRTABLA5L
0000FC CFE8 F015     00141          addwf  TEMP,WREG
0000FC          00142          movff  WREG,DIRTABLA6L
    
```

Listado A3.2b. Programa de inicio del sistema (continuación).

```

000100 2580          00143          addwf    TEMP,WREG
000102 CFE8 F017    00144          movff   WREG,DIRTABLA7L
000106 2580          00145          addwf    TEMP,WREG
000108 CFE8 F019    00146          movff   WREG,DIRTABLA8L
00010C 2580          00147          addwf    TEMP,WREG
00010E CFE8 F01B    00148          movff   WREG,DIRTABLA9L
00149
00150          ;inicia en TABLA9, potencia minima
000112 C01C F01E    00151          movff   DIRTABLA9H,DIRTABLAH
000116 C01B F01D    00152          movff   DIRTABLA9L,DIRTABLAL
00011A 0E00          00153          movlw   0x00
00011C 6EF8          00154          movwf   TBLPTRU
00011E C01E FFF7    00155          movff   DIRTABLAH,TBLPTRH
000122 C01D FFF6    00156          movff   DIRTABLAL,TBLPTL
00157
00158          ;inicia el temporizador T3
000126 0EC3          00159          movlw   0xC3
000128 6EB1          00160          movwf   T3CON
00012A 94A0          00161          bcf     PIE2,2 ;deshabilita int
00012C 84A2          00162          bsf     IPR2,2 ;prioridad baja
00163
00164          ;prepara el modulo compare 1
00012E 0E0B          00165          movlw   0x0B ;activa compare
000130 6EBD          00166          movwf   CCP1CON
000132 0E80          00167          movlw   0x80
000134 6EBE          00168          movwf   CCP1L ;LSB compare 1
000136 0E00          00169          movlw   0x00
000138 6EBF          00170          movwf   CCP1H ;MSB compare 1
00013A 849F          00171          bsf     IPR1,2 ;prioridad alta
00013C 849D          00172          bsf     PIE1,2 ;int compare
00173
00174          ;inicia el temporizador T1
00013E 8ECD          00175          bsf     T1CON,7 ;16 bits
000140 8ACD          00176          bsf     T1CON,5
000142 88CD          00177          bsf     T1CON,4 ;predivisor x8
000144 94CD          00178          bcf     T1CON,2 ;sincronizado
000146 92CD          00179          bcf     T1CON,1 ;reloj interno
000148 80CD          00180          bsf     T1CON,0 ;habilita T1
00014A 909F          00181          bcf     IPR1,0 ;prioridad baja
00014C 6ACE          00182          clrf   TMR1L
00014E 6ACF          00183          clrf   TMR1H
000150 809D          00184          bsf     PIE1,0 ;habilita int T1
00185
00186
00187          ;Inicia el ADC.
000152 0E84          00188          movlw   0x84 ;RA0,RA1,RA4 analogicas
000154 6EC1          00189          movwf   ADCON1
000156 0EC1          00190          movlw   0xC1 ;prepara convertidor
000158 6EC2          00191          movwf   ADCON0
00015A 9C9E          00192          bcf     PIR1,6 ;Borra int de ADC
00193
00194          ;Retardo de 15 instrucciones.
00015C 0E06          00195          movlw   0x06
00015E 6F80          00196          movwf   TEMP
00197
000160 2F80          00198          decfsz  TEMP
000162 EF80 F000    00199          goto   RET_1
00200
00201          ;habilita interrupciones
000166 8CF2          00202          bsf     INTCON,6 ;PEIE = 1
000168 8EF2          00203          bsf     INTCON,7 ;GIE = 1
00204

```

Listado A3.2c. Programa de inicio del sistema (continuación).

Los listados A3.2b) y c) contienen el programa que hace la iniciación de todos los elementos implicados en esta implementación.

En las líneas 96 a 116 se establece el sentido (entrada o salida) de cada una de las patillas de los puertos A, B y D del μC y se establecen los valores iniciales de todas las variables y registros que necesitan ser iniciados.

En las líneas 119 a 148 se cargan los valores de comienzo de cada tabla de tiempos y la longitud de estas (variables DIRTABLAn y LONGTABLA).

En las líneas 151 a 156 se preparan los registros para que la primera tabla a leer sea la de potencia mínima ($t_r = 9$ ms, tabla número 9, TABLA9 en el listado A3.6b). En las líneas 165 a 172 se configura el módulo CCP1. Las líneas 175 a 184 configuran el temporizador 1. En las líneas 195 a 199 se configura el convertidor analógico - digital. Por último, en las líneas 202 y 203 se habilitan las interrupciones. En este punto comienza a funcionar el modulador.

A3.4 Programa principal

El programa principal es un bucle infinito que supervisa los controles (de tiempo y de potencia) pero que no afecta a la modulación. El programa principal realiza tareas complementarias del sistema cuando es necesario y si no es así deja al procesador ocioso. El listado A3.3 contiene el programa principal (PPAL). Se trata de un bucle infinito en donde las primeras cuatro instrucciones (líneas 206 a 209) sirven para poder comprobar desde el exterior que el sistema está en funcionamiento (cuando está montado en una placa PICDEM2), de forma que cuando el pulsador S3 está pulsado, el LED D4 se apaga y cuando se suelta S3, se enciende D4.

En las líneas 210 y 211 se comprueba el valor de la variable ENTRADA y se decide si se realiza la entrada suave, haciendo un salto a SEC, o no. El valor de ENTRADA es 0xFF solamente durante inicio del funcionamiento. Una vez realizada la entrada suave, ENTRADA permanece con el valor 0x00.

En las líneas 213 y 214 se decide si hay que hacer algo o no según sea el valor de la variable ACTUAR. Si ACTUAR = 0x00, no hay que hacer nada y se salta a PPAL. Si ACTUAR = 0xFF se continúa con la línea 216. En esta línea se llama a la rutina que lee el dato de la entrada analógica (rutina ADC) que además de ser la

```

00016A A081      00205      ;programa principal
00016C 8481      00206 PPAL      btfss  PORTB,0
00016E B081      00207      bsf    PORTB,2
000170 9481      00208      btfsc  PORTB,0
000172 B187      00209      bcf    PORTB,2
000174 EF26 F001  00210      btfsc  ENTRADA,0
                                00211      goto   SEC          ;entrada suave
                                00212
000178 A00A      00213      btfss  ACTUAR,0
00017A EFB5 F000  00214      goto   ppal        ;nada por hacer
                                00215
00017E EC98 F001  00216      call   ADC
000182 A182      00217      btfss  CAMBIOTR,0
000184 EFB5 F000  00218      goto   ppal        ;no hay cambio de
TR
                                00219
000188 9EF2      00220      bcf    INTCON,7   ;desactiva GIE
                                00221
00018A C083 FFE8      00222      movff  TRFINAL,WREG
00018E 0802      00223      sublw  0x02
000190 E04F      00224      bz     PONTR2
000192 C083 FFE8      00225      movff  TRFINAL,WREG
000196 0803      00226      sublw  0x03
000198 E044      00227      bz     PONTR3
00019A C083 FFE8      00228      movff  TRFINAL,WREG
00019E 0804      00229      sublw  0x04
0001A0 E039      00230      bz     PONTR4
0001A2 C083 FFE8      00231      movff  TRFINAL,WREG
0001A6 0805      00232      sublw  0x05
0001A8 E02E      00233      bz     PONTR5
0001AA C083 FFE8      00234      movff  TRFINAL,WREG
0001AE 0806      00235      sublw  0x06
0001B0 E023      00236      bz     PONTR6
0001B2 C083 FFE8      00237      movff  TRFINAL,WREG
0001B6 0807      00238      sublw  0x07
0001B8 E018      00239      bz     PONTR7
0001BA C083 FFE8      00240      movff  TRFINAL,WREG
0001BE 0808      00241      sublw  0x08
0001C0 E00D      00242      bz     PONTR8
0001C2 C083 FFE8      00243      movff  TRFINAL,WREG
0001C6 0809      00244      sublw  0x09
0001C8 E002      00245      bz     PONTR9
0001CA EFB5 F000  00246      goto   PPAL
                                00247
0001CE C01C F01E      00248 PONTR9      movff  DIRTABLA9H,DIRTABLAH
0001D2 C01B F01D      00249      movff  DIRTABLA9L,DIRTABLAL
0001D6 0EFE      00250      movlw  b'11111110'
0001D8 EF1F F001  00251      goto   FINTR
                                00252
0001DC C01A F01E      00253 PONTR8      movff  DIRTABLA8H,DIRTABLAH
0001E0 C019 F01D      00254      movff  DIRTABLA8L,DIRTABLAL
0001E4 0EFC      00255      movlw  b'11111100'
0001E6 EF1F F001  00256      goto   FINTR
                                00257
0001EA C018 F01E      00258 PONTR7      movff  DIRTABLA7H,DIRTABLAH
0001EE C017 F01D      00259      movff  DIRTABLA7L,DIRTABLAL
0001F2 0EF8      00260      movlw  b'11111000'
0001F4 EF1F F001  00261      goto   FINTR
                                00262
0001F8 C016 F01E      00263 PONTR6      movff  DIRTABLA6H,DIRTABLAH
0001FC C015 F01D      00264      movff  DIRTABLA6L,DIRTABLAL
000200 0EFO      00265      movlw  b'11110000'
000202 EF1F F001  00266      goto   FINTR
                                00267
000206 C014 F01E      00268 PONTR5      movff  DIRTABLA5H,DIRTABLAH
00020A C013 F01D      00269      movff  DIRTABLA5L,DIRTABLAL
00020E 0EE0      00270      movlw  b'11100000'
000210 EF1F F001  00271      goto   FINTR

```

Listado A3.3a. Programa principal del sistema.

```

000214 C012 F01E      00272
000218 C011 F01D      00273 PONTR4      movff   DIRTABLA4H,DIRTABLAH
00021C 0E00            00274            movff   DIRTABLA4L,DIRTABLAL
00021E EF1F F001      00275            movlw   b'11000000'
                                00276            goto    FINTR
                                00277
000222 C010 F01E      00278 PONTR3      movff   DIRTABLA3H,DIRTABLAH
000226 C00F F01D      00279            movff   DIRTABLA3L,DIRTABLAL
00022A 0E80            00280            movlw   b'10000000'
00022C EF1F F001      00281            goto    FINTR
                                00282
000230 C00E F01E      00283 PONTR2      movff   DIRTABLA2H,DIRTABLAH
000234 C00D F01D      00284            movff   DIRTABLA2L,DIRTABLAL
000238 0E00            00285            movlw   b'00000000'
00023A EF1F F001      00286            goto    FINTR
                                00287
00023E 8EF2            00288 FINTR          bsf     INTCON,7      ;reactiva GIE
000240 C083 F020      00289            movff   TRFINAL,TR
000244 6E83            00290            movwf   PORTD
000246 6B82            00291            clrf   CAMBIOTR
                                00292
                                00293
000248 EFB5 F000      00294            goto    PPAL
                                00295

```

Listado A3.3b. Programa principal del sistema (continuación).

rutina de tratamiento del ADC, actualiza el contenido de la variable CAMBIOTR, indicando si hay que hacer cambio del tiempo de subida o no.

Desde la línea 220 a la 246 se hace el cambio de la modulación según el valor de tiempo de subida que devuelve la rutina del ADC en la variable TRFINAL.

A3.5 Rutina de arranque suave

Esta rutina, que se muestra en el listado A3.4, se encarga de realizar los cambios necesarios en las variable de modulación para que el sistema comience a funcionar siempre con la potencia menor ($t_r = 9$ ms) para ir subiendo hasta el valor de potencia programado por medio del mando rotatorio de control de potencia. El programa mantiene durante 1,25 segundos cada uno de los valores de t_r , de forma que si la potencia final es la indicada por $t_r = 2$ ms, el arranque suave hace que este valor de potencia se alcance al cabo de 10 s (8 pasos de 1,25 s cada uno). Este valor del paso de 1,25 segundos no responde a ninguna especificación concreta sino que es un

```

00298 ;Secuencia inicial de arranque suave
00299
00024C A00A 00300 SEC btfss ACTUAR,0 ;espera final-
00024E EF96 F001 00301 goto SEC_20 ;-ciclo PWM
000252 A023 00302 btfss ACTUAR2,0 ;espera tiempo
000254 EF96 F001 00303 goto SEC_20
00304
000258 6F84 00305 movwf W_TEMP2
00025A CFD8 F085 00306 movff STATUS,ST_TEMP2
00025E CFEO F086 00307 movff BSR,BSR_TEMP2
000262 9EF2 00308 bcf INTCON,7 ;desactiva GIE
000264 6A23 00309 clrf ACTUAR2
000266 C020 FFE8 00310 movff TR,WREG
00026A 0809 00311 sublw 0x09
00026C E108 00312 bnz SEC_3
00026E C01C F01E 00313 movff DIRTABLA9H,DIRTABLAH ;pot.
000272 C01B F01D 00314 movff DIRTABLA9L,DIRTABLAL ;min.
000276 0EFE 00315 movlw b'11111110'
000278 0620 00316 decf TR
00027A EF8E F001 00317 goto SEC_19
00318
00027E C020 FFE8 00319 SEC_3 movff TR,WREG
000282 0808 00320 sublw 0x08
000284 E108 00321 bnz SEC_4
000286 C01A F01E 00322 movff DIRTABLA8H,DIRTABLAH
00028A C019 F01D 00323 movff DIRTABLA8L,DIRTABLAL
00028E 0EFC 00324 movlw b'11111100'
000290 0620 00325 decf TR
000292 EF8E F001 00326 goto SEC_19
000296 C020 FFE8 00328 SEC_4 movff TR,WREG
00029A 0807 00329 sublw 0x07
00029C E108 00330 bnz SEC_5
00029E C018 F01E 00331 movff DIRTABLA7H,DIRTABLAH
0002A2 C017 F01D 00332 movff DIRTABLA7L,DIRTABLAL
0002A6 0EF8 00333 movlw b'11111000'
0002A8 0620 00334 decf TR
0002AA EF8E F001 00335 goto SEC_19
00336
0002AE C020 FFE8 00337 SEC_5 movff TR,WREG
0002B2 0806 00338 sublw 0x06
0002B4 E108 00339 bnz SEC_6
0002B6 C016 F01E 00340 movff DIRTABLA6H,DIRTABLAH
0002BA C015 F01D 00341 movff DIRTABLA6L,DIRTABLAL
0002BE 0EFO 00342 movlw b'11110000'
0002C0 0620 00343 decf TR
0002C2 EF8E F001 00344 goto SEC_19
00345
0002C6 C020 FFE8 00346 SEC_6 movff TR,WREG
0002CA 0805 00347 sublw 0x05
0002CC E108 00348 bnz SEC_7
0002CE C014 F01E 00349 movff DIRTABLA5H,DIRTABLAH
0002D2 C013 F01D 00350 movff DIRTABLA5L,DIRTABLAL
0002D6 0EE0 00351 movlw b'11100000'
0002D8 0620 00352 decf TR
0002DA EF8E F001 00353 goto SEC_19
0002DE C020 FFE8 00355 SEC_7 movff TR,WREG
0002E2 0804 00356 sublw 0x04
0002E4 E108 00357 bnz SEC_8
0002E6 C012 F01E 00358 movff DIRTABLA4H,DIRTABLAH
0002EA C011 F01D 00359 movff DIRTABLA4L,DIRTABLAL
0002EE 0EC0 00360 movlw b'11000000'
0002F0 0620 00361 decf TR
0002F2 EF8E F001 00362 goto SEC_19
00363

```

Listado A3.4a. Rutina de arranque suave.

parámetro para la experimentación. Cualquier otro valor de tiempo es posible modificando unas variables en el programa. Este tiempo lo proporciona el

```

0002F6 C020 FFE8      00364 SEC_8      movff   TR,WREG
0002FA 0803          00365          sublw   0x03
0002FC E108          00366          bnz    SEC_9
0002FE C010 F01E      00367          movff   DIRTABLA3H,DIRTABLAH
000302 C00F F01D      00368          movff   DIRTABLA3L,DIRTABLAL
000306 0E80          00369          movlw   b'10000000'
000308 0620          00370          decf   TR
00030A EF8E F001      00371          goto   SEC_19
                                00372
00030E C00E F01E      00373 SEC_9          movff   DIRTABLA2H,DIRTABLAH ;pot.
000312 C00D F01D      00374          movff   DIRTABLA2L,DIRTABLAL ;max.
000316 0E00          00375          movlw   b'00000000'
000318 90CD          00376          bcf    T1CON,0      ;deshabilita T1
00031A 6B87          00377          clrf   ENTRADA
                                00378
00031C 6E83          00379 SEC_19     movwf   PORTD
00031E C084 FFE8      00380          movff   W_TEMP2,WREG
000322 C085 FFD8      00381          movff   ST_TEMP2,STATUS
000326 C086 FFE0      00382          movff   BSR_TEMP2,BSR
00032A 8EF2          00383          bsf    INTCON,7     ;reactiva GIE
                                00384
00032C EFB5 F000      00385 SEC_20     goto   PPAL

```

Listado A3.4b. Rutina de arranque suave (continuación).

temporizador 1 junto con la rutina de interrupción correspondiente (INTTEMP1) ya descrita. En primer lugar se comprueba que las variables ACTUAR y ACTUAR2 se encuentran con el valor 0xFF (líneas 300 a 303). Cuando esto sucede es porque el sistema se encuentra al final de un ciclo de modulación y se ha cumplido el tiempo de espera de 1,25 segundos. En esta circunstancia es cuando esta rutina actúa modificando el contenido de las variables DIRTABLAH y DIRTABLAL a los valores correspondientes a la tabla siguiente a recorrer por la rutina de modulación.

A3.6 Rutina de tratamiento del ADC

En esta rutina (listado A3.5) se lee el valor de la tensión de entrada y, en función de ese valor, se decide cuál es el tiempo de subida que debe tener la señal de salida. En esta implementación los tiempos de subida posibles son ocho: 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, y 9 ms. La lectura digitalizada de la señal de entrada del mando de potencia se compara con los correspondientes ocho intervalos establecidos y de ello resulta el valor del tiempo de subida para la rutina de modulación.

```

00392 ;*****
00393 ;Rutina de tratamiento del ADC
00394
000330 B4C2      00395 ADC          btfsc   ADCON0,2 ;mira si final
000332 EFD7 F001 00396          goto    ADC_16  ;conversion
00397
000336 6F84      00398          movwf   W_TEMP2
000338 CFD8 F085 00399          movff  STATUS,ST_TEMP2
00033C CFE0 F086 00400          movff  BSR,BSR_TEMP2
00401
000340 36C3      00402          rlcfc  ADRESL
000342 50C4      00403          movf   ADRESH,WREG
000344 36E8      00404          rlcfc  WREG
000346 E010      00405          bz     ADC_1
000348 06E8      00406          decf   WREG
00034A E011      00407          bz     ADC_2
00034C 06E8      00408          decf   WREG
00034E E012      00409          bz     ADC_3
000350 06E8      00410          decf   WREG
000352 E013      00411          bz     ADC_4
000354 06E8      00412          decf   WREG
000356 E014      00413          bz     ADC_5
000358 06E8      00414          decf   WREG
00035A E015      00415          bz     ADC_6
00035C 06E8      00416          decf   WREG
00035E E016      00417          bz     ADC_7
000360 06E8      00418          decf   WREG
000362 E017      00419          bz     ADC_8
000364 EFD0 F001 00420          goto   ADC_15
00421
000368 0E09      00422 ADC_1      movlw  0x09
00036A EFCA F001 00423          goto  ADC_10
00424
00036E 0E08      00425 ADC_2      movlw  0x08
000370 EFCA F001 00426          goto  ADC_10
00427
000374 0E07      00428 ADC_3      movlw  0x07
000376 EFCA F001 00429          goto  ADC_10
00430
00037A 0E06      00431 ADC_4      movlw  0x06
00037C EFCA F001 00432          goto  ADC_10
00433
000380 0E05      00434 ADC_5      movlw  0x05
000382 EFCA F001 00435          goto  ADC_10
00436
000386 0E04      00437 ADC_6      movlw  0x04
000388 EFCA F001 00438          goto  ADC_10
00439
00038C 0E03      00440 ADC_7      movlw  0x03
00038E EFCA F001 00441          goto  ADC_10
00442
000392 0E02      00443 ADC_8      movlw  0x02
00444
000394 6F80      00445 ADC_10     movwf  TEMP
000396 5C20      00446          subwf  TR,0
000398 E003      00447          bz     ADC_15 ;TR no cambia
00039A C080 F083 00448          movff  TEMP,TRFINAL
00039E 6982      00449          setf  CAMBIOTR
00450
0003A0 84C2      00451 ADC_15     bsf    ADCON0,2 ;nueva conversion
00452
0003A2 C084 FFE8      00453          movff  W_TEMP2,WREG
0003A6 C085 FFD8      00454          movff  ST_TEMP2,STATUS
0003AA C086 FFE0      00455          movff  BSR_TEMP2,BSR
00456
0003AE 0012      00457 ADC_16     return

```

Listado A3.5. Rutina de tratamiento del ADC.

En la línea 451 se inicia una nueva conversión para que cuando se requiera esta información de la señal de control (al final del siguiente periodo de modulación), la información esté disponible y así no es necesario esperar. Esto significa que la señal de entrada del control de potencia se muestrea cada periodo de la señal de salida, es decir 50 veces por segundo, cuando la frecuencia de la señal de salida es de 50 Hz. Esta velocidad de muestreo es muy baja comparada con la velocidad máxima de muestreo posible del bloque ADC del μC , que es de hasta 78.000 muestras por segundo, según las especificaciones del fabricante.

A3.7 Tablas de modulación

Como se ha descrito antes, la modulación se realiza en base a las tablas de valores que contienen los tiempos necesarios para generar la señal modulada. Los valores de estas tablas son los que se obtienen con las ecuaciones de la tabla 3.10. Como se han previsto ocho valores de t_r , son necesarias ocho tablas con los

```

                                00461
;*****
                                00462 ;Tablas de modulación TPWM-DM
                                00463
001000                          00464 org 0x1000
                                00465
001000 0027 013F 0077 00466 TABLA2 da d'39',d'319',d'119',
                                00EF 00C7 009F d'239',d'199',d'159',
                                0117 004F 0167 d'279',d'79',d'359',
                                0013 1FF3 d'19',d'8179'
001016 0027 013F 0077 00467 da d'39',d'319',d'119',
                                00EF 00C7 009F d'239',d'199',d'159',
                                0117 004F 0167 d'279',d'79',d'359',
                                0013 1FF3 d'19',d'8179'
                                00468
00102C 003B 01DF 00B3 00469 TABLA3 da d'59',d'479',d'179',
                                0167 012B 00EF d'359',d'299',d'239',
                                01A3 0077 021B d'419',d'119',d'539',
                                001D 1C65 d'29',d'7269'
001042 003B 01DF 00B3 00470 da d'59',d'479',d'179',
                                0167 012B 00EF d'359',d'299',d'239',
                                01A3 0077 021B d'419',d'119',d'539',
                                001D 1C65 d'29',d'7269'
                                00471
001058 004F 027F 00EF 00472 TABLA4 da d'79',d'639',d'239',
                                01DF 018F 013F d'479',d'399',d'319',
                                022F 009F 02CF d'559',d'159',d'719',
                                0027 18D7 d'39',d'6359'
00106E 004F 027F 00EF 00473 da d'79',d'639',d'239',
                                01DF 018F 013F d'479',d'399',d'319',
                                022F 009F 02CF d'559',d'159',d'719',
                                0027 18D7 d'39',d'6359'
                                00474

```

Listado A3.6a. Tablas de modulación TPWM-DM.

001084	0063	031F	012B	00475	TABLA5	da	d'99',d'799',d'299', d'599',d'499',d'399', d'699',d'199',d'899', d'49',d'5449'
	0257	01F3	018F				
	02BB	00C7	0383				
	0031	1549					
00109A	0063	031F	012B	00476		da	d'99',d'799',d'299', d'599',d'499',d'399', d'699',d'199',d'899', d'49',d'5449'
	0257	01F3	018F				
	02BB	00C7	0383				
	0031	1549					
				00477			
0010B0	0077	03BF	0167	00478	TABLA6	da	d'119',d'959',d'359', d'719',d'599',d'479', d'839',d'239',d'1079', d'59',d'4539'
	02CF	0257	01DF				
	0347	00EF	0437				
	003B	11BB					
0010C6	0077	03BF	0167	00479		da	d'119',d'959',d'359', d'719',d'599',d'479', d'839',d'239',d'1079', d'59',d'4539'
	02CF	0257	01DF				
	0347	00EF	0437				
	003B	11BB					
				00480			
0010DC	008B	045F	01A3	00481	TABLA7	da	d'139',d'1119',d'419', d'839',d'699',d'559', d'979',d'279',d'1259', d'69',d'3629'
	0347	02BB	022F				
	03D3	0117	04EB				
	0045	0E2D					
0010F2	008B	045F	01A3	00482		da	d'139',d'1119',d'419', d'839',d'699',d'559', d'979',d'279',d'1259', d'69',d'3629'
	0347	02BB	022F				
	03D3	0117	04EB				
	0045	0E2D					
				00483			
001108	009F	04FF	01DF	00484	TABLA8	da	d'159',d'1279',d'479', d'959',d'799',d'639', d'1119',d'319',d'1439', d'79',d'2719'
	03BF	031F	027F				
	045F	013F	059F				
	004F	0A9F					
00111E	009F	04FF	01DF	00485		da	d'159',d'1279',d'479', d'959',d'799',d'639', d'1119',d'319',d'1439', d'79',d'2719'
	03BF	031F	027F				
	045F	013F	059F				
	004F	0A9F					
				00486			
001134	00B3	059F	021B	00487	TABLA9	da	d'179',d'1439',d'539', d'1079',d'899',d'719', d'1259',d'359',d'1619', d'89',d'1809'
	0437	0383	02CF				
	04EB	0167	0653				
	0059	0711					
00114A	00B3	059F	021B	00488		da	d'179',d'1439',d'539', d'1079',d'899',d'719', d'1259',d'359',d'1619', d'89',d'1809'
	0437	0383	02CF				
	04EB	0167	0653				
	0059	0711					
				00489			
				00490			
				00491		end	

Listado A3.6b. Tablas de modulación TPWM-DM (continuación).

correspondientes valores. Estas tablas son las que se muestran en el listado A3.6. En ella se puede ver que los valores están definidos en decimal, con lo que puede verse la correspondencia con los valores calculados en las tablas 3.8 y 3.9. Sin embargo, hay que observar que los valores en estas tablas difieren en una unidad de los calculados teóricamente (ver las tablas del capítulo 3). Esto es debido a que es necesario realizar una compensación de un microsegundo, ya que la respuesta del μC a la señal de salida se retrasa (se alarga en el tiempo) un microsegundo desde que se detecta el final de la cuenta hasta que se actúa cambiando el estado de la señal. Este retraso es fijo y debido a dos componentes; por un lado, el tiempo de latencia de la

interrupción y, por otro, las instrucciones que se ejecutan antes de realizar el cambio de nivel de la señal. Si no se realiza este ajuste, la señal de salida tendría características similares pero la frecuencia no sería la prevista sino más baja ya que su periodo estaría incrementado en un microsegundo por cada tiempo de la modulación. Por ejemplo, en una modulación con $M = 21$, el periodo de la señal de salida estaría incrementado en $42 \mu\text{s}$. Esto significa que la frecuencia de la señal de salida sería de $49,89 \text{ Hz}$ en lugar de 50 Hz .

A3.8 Tamaño del programa

El programa descrito en los apartados anteriores tiene un tamaño de 1.322 bytes, lo que significa que quedan sin utilizar 31.446 bytes. O, dicho de otra forma, se ha utilizado el 4% de la memoria de programa disponible en este μC . Esto indica que el procedimiento de modulación es realmente eficaz ya que deja libre muchos recursos del sistema para otras funciones, como el control dinámico de la potencia.

Hay que hacer notar que este tamaño tan reducido del programa es debido a que está realizado en lenguaje nemónico. Si se hubiera utilizado un lenguaje de más alto nivel, como lenguaje C, el tamaño del programa probablemente hubiera sido mayor.

Anexo A4

Medidas de armónicos en la señal modulada

Índice

Anexo A4. Medidas de armónicos en la señal modulada A4-1

Índice de figuras

Figura A4.1. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 6$, $t_r = 2$ ms y $V_o/V_i = 1$.
..... A4-2

Figura A4.2. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 7$, $t_r = 2,4$ ms y $V_o/V_i = 1$.
..... A4-3

Figura A4.3. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 8$, $t_r = 2,8$ ms y $V_o/V_i = 1$.
..... A4-4

Figura A4.4. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 9$, $t_r = 3,1$ ms y $V_o/V_i = 1$.
..... A4-5

Figura A4.5. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 10$, $t_r = 3,5$ ms y $V_o/V_i = 1$.
..... A4-6

Índice de tablas

Tabla A4.1. Medidas de armónicos para $f = 50$ Hz, $N = 6$, $t_r = 2$ ms y $V_o/V_i = 1$	A4-2
Tabla A4.2. Medidas de armónicos para $f = 50$ Hz, $N = 7$, $t_r = 2,4$ ms y $V_o/V_i = 1$	A4-3
Tabla A4.3. Medidas de armónicos para $f = 50$ Hz, $N = 8$, $t_r = 2,8$ ms y $V_o/V_i = 1$	A4-4
Tabla A4.4. Medidas de armónicos para $f = 50$ Hz, $N = 9$, $t_r = 3,1$ ms y $V_o/V_i = 1$	A4-5
Tabla A4.5. Medidas de armónicos para $f = 50$ Hz, $N = 10$, $t_r = 3,5$ ms y $V_o/V_i = 1$	A4-6

Anexo A4. Medidas de armónicos en la señal modulada

Este anexo contiene algunos de los resultados de las medidas realizadas sobre la señal modulada TPWM-DM. Junto a las medidas se han situado los valores obtenidos de la simulación, pudiéndose observar la correlación entre ellos. Cada conjunto de medidas está formada por una tabla con los valores numéricos y una gráfica realizada con estos valores. En cada tabla se han incluido los valores resultantes para *THD* y *WTHD*. El pie de cada tabla y figura resume las características de la señal medida.

Armónico	Amplitud (% V1)		Armónico	Amplitud (% V1)	
	Medido	Simulado		Medido	Simulado
1	100,00	100,00	27	0,00	0,00
3	0,02	0,00	29	0,05	0,00
5	12,60	12,44	31	0,05	0,00
7	5,06	5,07	33	0,00	0,00
9	0,01	0,00	35	0,11	0,00
11	0,70	0,46	37	0,14	0,00
13	1,23	1,38	39	0,00	0,00
15	0,01	0,00	41	0,56	0,46
17	0,63	0,46	43	0,56	0,46
19	0,26	0,46	45	0,01	0,00
21	0,01	0,00	47	0,81	0,92
23	0,20	0,00	49	2,38	2,30
25	0,15	0,00			

	Medido	Simulado
THD (%)	13,92	13,77
WTHD (%)	2,63	2,64

Tabla A4.1. Medidas de armónicos para $f = 50$ Hz, $N = 6$, $t_r = 2$ ms y $V_o/V_i = 1$.

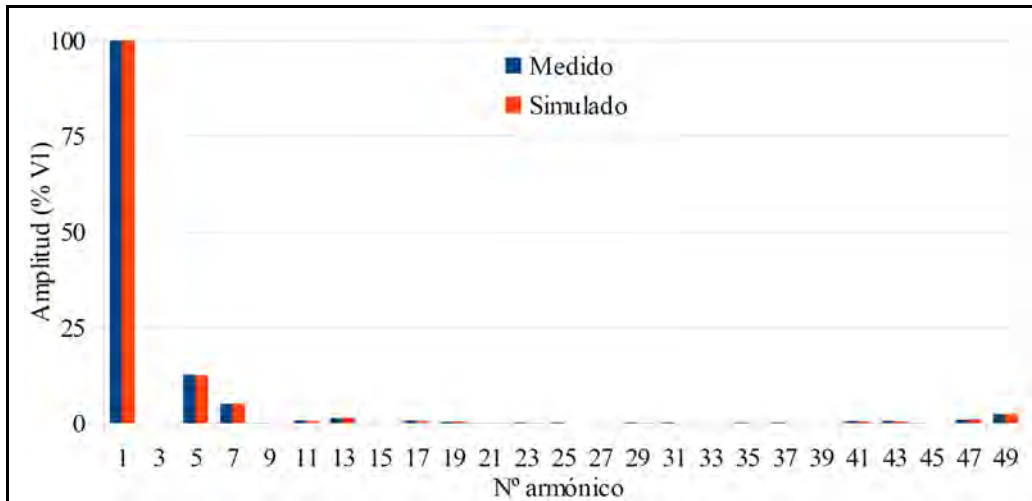
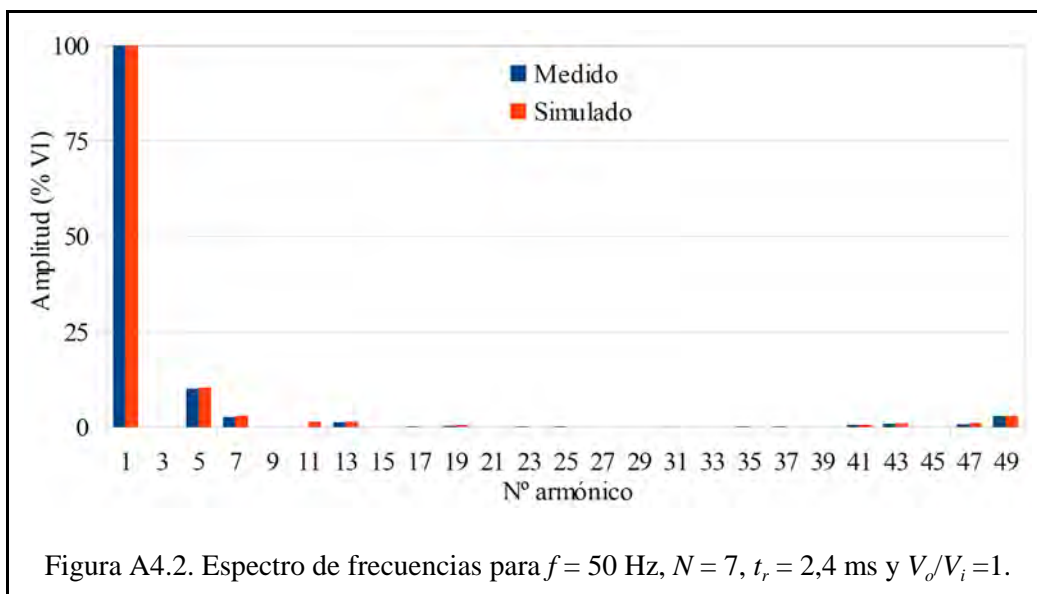


Figura A4.1. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 6$, $t_r = 2$ ms y $V_o/V_i = 1$.

Armónico	Amplitud (% V1)		Armónico	Amplitud (% V1)	
	Medido	Simulado		Medido	Simulado
1	100,00	100,00	27	0,00	0,00
3	0,02	0,00	29	0,00	0,00
5	10,03	10,23	31	0,03	0,00
7	2,57	2,79	33	0,01	0,00
9	0,01	0,00	35	0,17	0,00
11	0,01	1,40	37	0,14	0,00
13	1,25	1,40	39	0,01	0,00
15	0,01	0,00	41	0,55	0,47
17	0,16	0,00	43	0,78	0,93
19	0,31	0,47	45	0,01	0,00
21	0,01	0,00	47	0,64	0,93
23	0,18	0,00	49	2,81	2,79
25	0,09	0,00			

	Medido	Simulado
THD (%)	10,87	11,24
WTHD (%)	2,04	2,09

Tabla A4.2. Medidas de armónicos para $f = 50$ Hz, $N = 7$, $t_r = 2,4$ ms y $V_o/V_i = 1$.



Armónico	Amplitud (% V1)		Armónico	Amplitud (% V1)	
	Medido	Simulado		Medido	Simulado
1	100,00	100,00	27	0,01	0,00
3	0,02	0,00	29	0,03	0,00
5	7,38	7,51	31	0,06	0,00
7	0,38	0,47	33	0,00	0,00
9	0,02	0,00	35	0,15	0,00
11	1,62	1,41	37	0,26	0,47
13	0,63	0,47	39	0,00	0,00
15	0,00	0,00	41	0,39	0,47
17	0,48	0,47	43	0,91	0,94
19	0,33	0,47	45	0,01	0,00
21	0,01	0,00	47	0,37	0,47
23	0,09	0,00	49	3,17	3,29
25	0,07	0,00			

	Medido	Simulado
THD (%)	8,32	8,46
WTHD (%)	1,49	1,51

Tabla A4.3. Medidas de armónicos para $f = 50$ Hz, $N = 8$, $t_r = 2,8$ ms y $V_o/V_i = 1$.

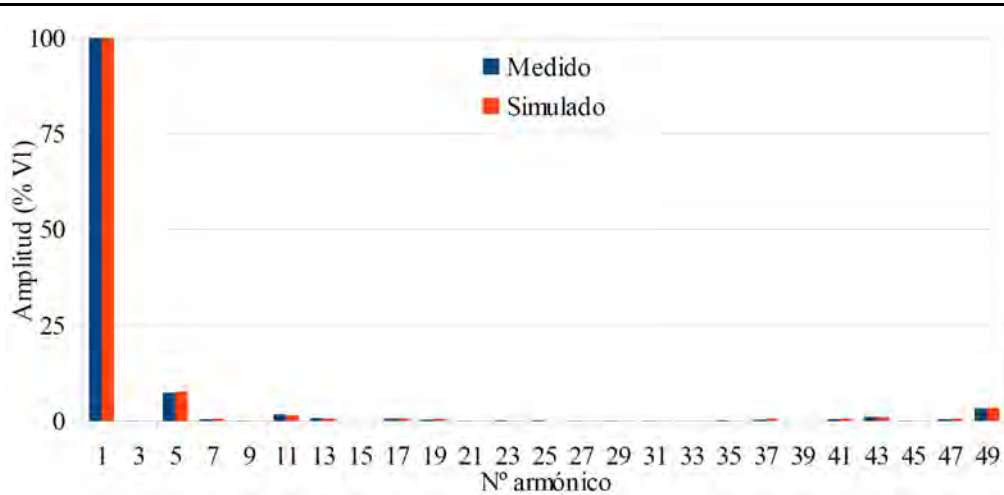
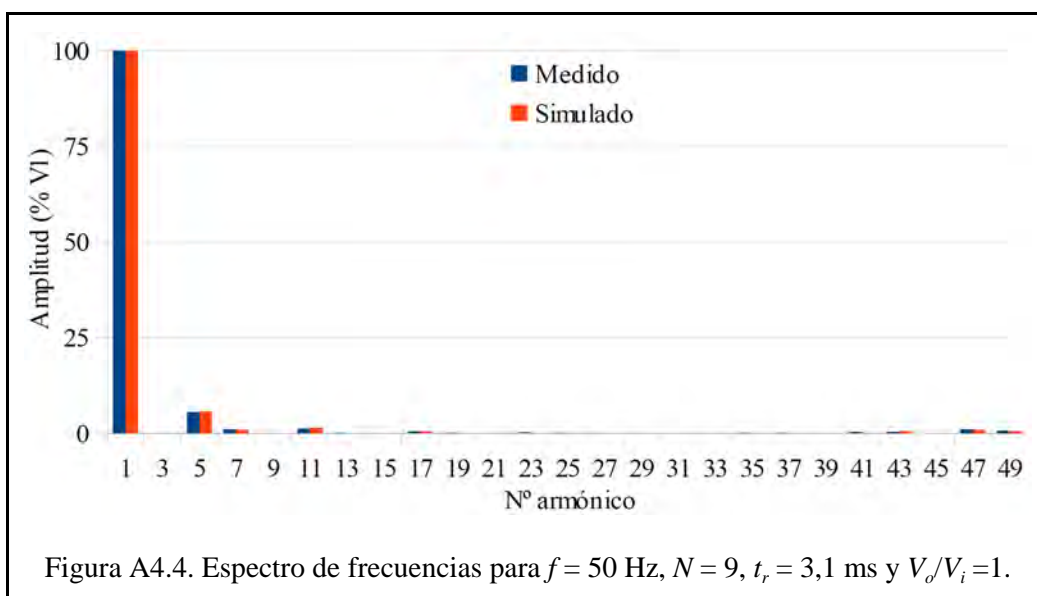


Figura A4.3. Espectro de frecuencias para $f = 50$ Hz, $N = 8$, $t_r = 2,8$ ms y $V_o/V_i = 1$.

Armónico	Amplitud (% V1)		Armónico	Amplitud (% V1)	
	Medido	Simulado		Medido	Simulado
1	100,00	100,00	27	0,01	0,00
3	0,02	0,00	29	0,02	0,00
5	5,43	5,66	31	0,03	0,00
7	1,03	0,94	33	0,01	0,00
9	0,01	0,00	35	0,10	0,00
11	1,21	1,42	37	0,14	0,00
13	0,13	0,00	39	0,01	0,00
15	0,01	0,00	41	0,28	0,00
17	0,47	0,47	43	0,32	0,47
19	0,14	0,00	45	0,00	0,00
21	0,01	0,00	47	1,08	0,94
23	0,16	0,00	49	0,55	0,47
25	0,08	0,00			

	Medido	Simulado
THD (%)	5,83	6,04
WTHD (%)	1,1	1,15

Tabla A4.4. Medidas de armónicos para $f = 50$ Hz, $N = 9$, $t_r = 3,1$ ms y $V_o/V_i = 1$.



Armónico	Amplitud (% V1)		Armónico	Amplitud (% V1)	
	Medido	Simulado		Medido	Simulado
1	100,00	100,00	27	0,00	0,00
3	0,04	0,00	29	0,04	0,00
5	2,89	2,87	31	0,10	0,00
7	2,32	2,39	33	0,02	0,00
9	0,01	0,00	35	0,12	0,00
11	0,32	0,48	37	0,15	0,00
13	0,62	0,48	39	0,02	0,00
15	0,01	0,00	41	0,43	0,48
17	0,16	0,00	43	0,14	0,00
19	0,23	0,00	45	0,02	0,00
21	0,01	0,00	47	1,34	1,44
23	0,11	0,00	49	0,44	0,48
25	0,04	0,00			

	Medido	Simulado
THD (%)	4,07	4,11
WTHD (%)	0,67	0,67

Tabla A4.5. Medidas de armónicos para $f = 50$ Hz, $N = 10$, $t_r = 3,5$ ms y $V_o/V_i = 1$.

