



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica de Jaén

Trabajo Fin de Grado

MODULACIÓN PWM: ANÁLISIS TEÓRICO, SIMULACIÓN Y MONTAJES EXPERIMENTALES

Alumno: Marcos Illana Alba

Tutor: Juan Domingo Aguilar Peña

Dpto: Ingeniería electrónica y automática



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Informática

Don Juan Domingo Aguilar Peña , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado:
Modulación PWM: Análisis teórico, simulación y montajes experimentales, que
presenta Marcos Illana Alba, autoriza su presentación para defensa y evaluación en
la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Septiembre de 2020

El alumno:

Marcos Illana Alba

Los tutores:

Juan Domingo Aguilar Peña

Resumen:

Este trabajo de fin de grado de carácter didáctico se centra en el desarrollo de un trabajo de carácter técnico que aborda los principios básicos de la modulación PWM, así como el análisis de las componentes armónicas generadas. En él, se presentan diversos análisis como análisis teóricos, simulaciones y montajes experimentales para la posterior comparación de valores obtenidos.

Estos documentos técnicos surgen de la necesidad de introducir al alumno en la parte de la electrónica correspondiente a la modulación PWM que tanta importancia está adquiriendo en la electrónica industrial y la multitud de posibilidades que ofrece. Asimismo, es necesario también incluir análisis de componentes armónicas para estudiar el comportamiento y la incidencia que estas tendrán en la señal final.

En el trabajo final, se recogerán multitud de simulaciones, montajes experimentales y como herramienta de apoyo a la docencia online, el uso de herramientas online de carácter pedagógico para la visualización y estudio del funcionamiento de los montajes que se propondrán como son Orcad psPice, Matlab Simulink y la plataforma online gratuita Tinkercad.

Se incluyen en el trabajo 4 prácticas orientadas, principalmente, a la asignatura Electrónica de potencia de 4º curso del grado en Ingeniería Electrónica Industrial siendo dos de las prácticas de carácter opcional u orientadas a un nivel más avanzado así como dos documentos técnicos de apoyo que recogen el procedimiento a seguir para la realización de análisis de Fourier en los osciloscopios que se disponen en los laboratorios.

Índice

Escuela Politécnica de Jaén	0
Escuela Politécnica Superior de Jaén	0
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial.....	0
1. Introducción	5
2. Objetivos	9
3. Antecedentes	10
4. Contexto dentro del grado.....	13
5. Metodología	15
6. Descripción detallada de prácticas.....	17
6.1. Guion de prácticas 1: Armónicos y función FFT. Análisis teórico, simulación y análisis experimental.	17
6.2. Guion de prácticas 2: Modulación PWM basada en un circuito integrado NE 555 configurado como astable. Análisis teórico, práctico y simulaciones.	21
6.3. Guion de prácticas 3: Modulación SPWM basada en un circuito integrado NE555 configurado como monoestable.	24
6.4. Guion de prácticas 4: Programación de una señal PWM a través de Arduino UNO R3.....	28
7. Resultados y conclusión	30
8. Anexos	31
8.1. Armónicos y función FFT. Análisis teórico, simulación y análisis experimental. Guion para el alumno.....	31
8.2. Armónicos y función FFT. Análisis teórico, simulación y análisis experimental. Guion para el profesor.	55
8.3. Modulación PWM basada en circuito integrado NE 555 configurado como astable. Análisis teórico, práctico y simulaciones. Guion del alumno.....	98
8.4. Modulación PWM basada en circuito integrado NE 555 configurado como astable. Análisis teórico, práctico y simulaciones. Guion del profesor.	111
8.5. Modulación SPWM basada en circuito integrado NE 555. Simulación de inversor monofase con Simulink. Guion del alumno.....	138
8.6. Modulación SPWM basada en circuito integrado NE 555. Simulación de inversor monofase con Simulink. Guion del alumno.....	152
8.7. Modulación PWM en Arduino. Implementación de código y análisis experimental. Guion del alumno.....	172

8.8. Modulación PWM en Arduino. Implementación de código y análisis experimental. Guion del profesor.	175
8.9. Anexo 1: Medida de armónicos en osciloscopio TEKTRONIK TPS 2000B	180
8.10. Anexo 1: Medida de armónicos en osciloscopio AGILENT SERIES 6000.	189
Bibliografía.....	196

1. Introducción

El trabajo fin de grado en cuestión se encuentra situado en el ámbito de la ingeniería electrónica, más específicamente en el de la electrónica de potencia. El mismo, se encuentra orientado a un carácter didáctico y pedagógico, para introducir al alumnado a la modulación PWM y el análisis de las componentes armónicas de las distintas formas de onda.

El trabajo estará claramente diferenciado en varios apartados:

- **Introducción:** En él, se ofrecerá una visión general sobre lo que se aporta en el trabajo final.
- **Objetivos:** Se exponen los objetivos generales y específicos que se pretenden alcanzar con la realización del trabajo
- **Antecedentes:** En él, se recogerá información tanto bibliográfica como audiovisual que ha sido empleada para la realización del trabajo fin de grado.
- **Metodología:** En este apartado, se explicará los pasos que se han seguido para la realización de los guiones prácticos, así como métodos, equipos y software usado para la realización de los mismo.
- **Descripción detallada de guiones de prácticas:** Se ofrecerá una visión detallada de cada uno de los guiones de prácticas propuestos tanto de modulación PWM como de análisis de componentes armónicas a través de la herramienta FFT.
- **Resultados y conclusión:** En esta parte, se establecen las características finales que se han obtenido de la realización y resolución de las prácticas que son objeto de este trabajo de fin de grado, así como las conclusiones que se esperan que se obtengan del alumnado una vez finalicen las prácticas en cuestión
- **Anexos:** En este apartado, se expondrán los guiones de prácticas tanto de análisis de componentes armónicas a través de la herramienta FFT y para la modulación por ancho de pulso PWM, así como los documentos de ayuda para el uso de la herramienta FFT en los diferentes osciloscopios que se disponen en los laboratorios.

El tema central del trabajo es, como indica el nombre del mismo, la modulación PWM, estableciendo análisis teórico, simulaciones y montajes experimentales así, como el análisis de las componentes armónicas que conforman las distintas señales, utilizando la herramienta matemática FFT.

La importancia de la realización de este trabajo de fin de grado reside en la necesidad de introducir al alumno, a través de prácticas de carácter didáctico y pedagógico, en un apartado tan importante en la electrónica industrial, y que tanta importancia ha adquirido en la actualidad, como es la modulación PWM así como la medida correspondiente de componentes armónicas de señal.

Es importante incidir, en primera instancia, en el apartado de la medición de armónicos ya que se ha de comprender la necesidad de establecer un estudio de manera correcta para evitar los efectos adversos que estos pueden generar. Para ello, se precisó la implementación de un guion de prácticas en los que, pueda apreciarse, a través de establecer comparaciones entre las componentes armónicas resultantes del análisis de Fourier, la importancia que adquieren estas y la necesidad de su estudio. A modo de apoyo, se desarrolló, también, una serie de guías para la realización de análisis de Fourier a través de la herramienta FFT de los osciloscopios que se disponen en los laboratorios.

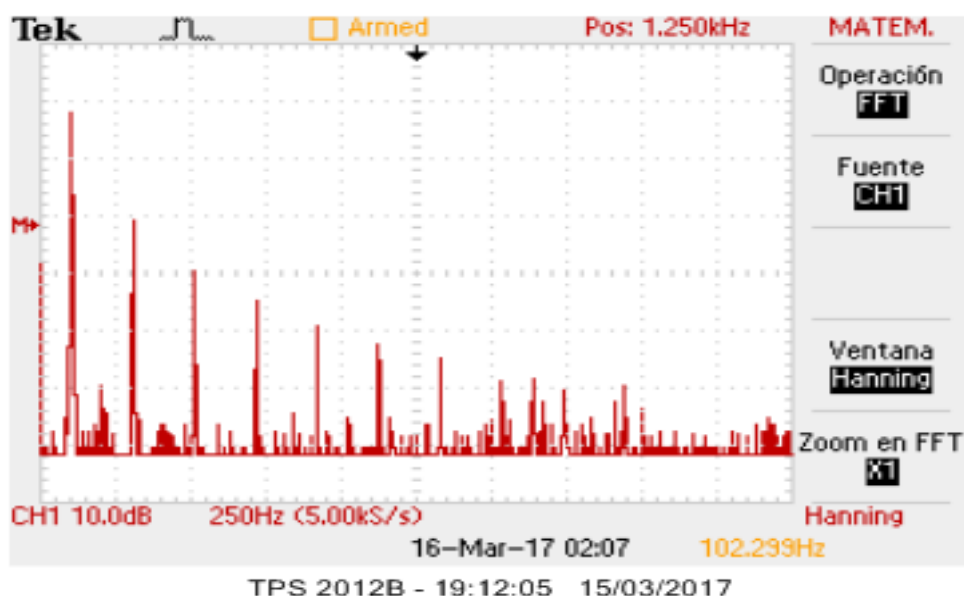


Figura 1. Análisis FFT osciloscopio Tektronik

La importancia de introducir la modulación PWM emana en la multitud de posibilidades que esta puede ofrecer a la hora de estudiar circuitos de electrónica industrial, así como en telecomunicaciones. En el caso de la electrónica, podemos encontrar multitud de aplicaciones siendo una de las más importantes, el uso de este tipo de modulación, para ser capaz de controlar la salida AC de convertidores de potencia en la que se pretende obtener el control a frecuencias muy altas con el objetivo de conseguir tensiones y corrientes de baja frecuencia a la salida de convertidores como pueden ser DC/AC. En el caso de telecomunicaciones, la modulación por ancho de pulso se emplea para enviar por canales de comunicación, información a través de valores discretos para su posterior demodulación y obtención de la información enviada.

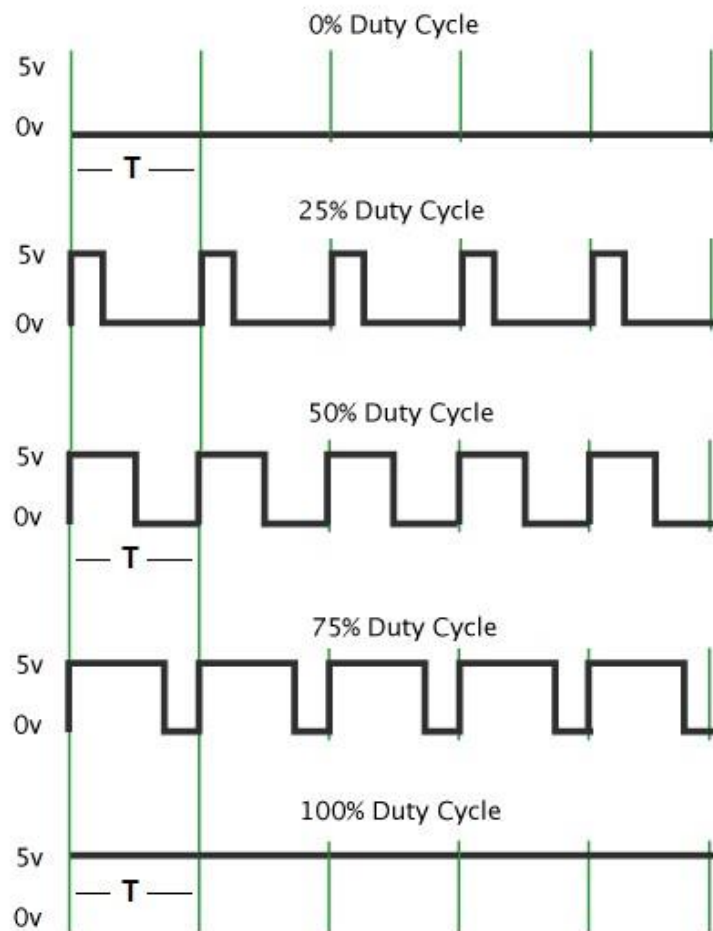


Figura 2. Señal PWM para ciclo de trabajos diferentes

En definitiva, con la realización de este trabajo, se pretende la introducción y profundización en la modulación PWM a través de montajes de carácter experimental

sencillos en los que se puede establecer el control de tensión y corriente entregada a diferentes cargas, así como estableciendo análisis de Fourier a señales obtenidas a través de la herramienta matemática FFT.

Como precedente a la realización del documento que recoge el estudio de los diferentes montajes propuestos de modulación PWM, es necesario introducirnos a la medida y cálculo de las componentes armónicas de las señales más comunes. Para, posteriormente, ser capaz de desenvolvernos de forma eficaz a la hora de analizarlos en las señales obtenidas en los análisis de modulación por ancho de pulso.

Como consecuencia de la pandemia COVID-19 en el curso 2019/2020, se tuvo que adaptar la docencia presencial a docencia online dificultando de esta manera la elaboración de prácticas de carácter experimental. Como posible solución, se buscaron posibles alternativas para la elaboración de montajes experimentales. Dicho esto, se seleccionó la opción de elaborar circuitos de la misma manera que se puede realizar en los laboratorios con la plataforma online Autodesk Tinkercad¹.

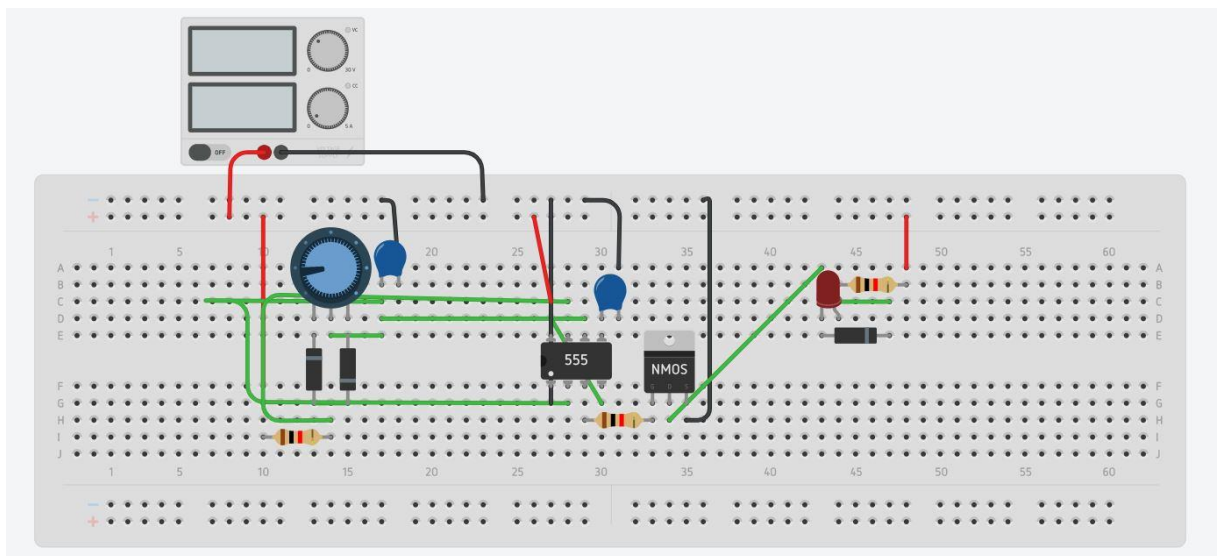


Figura 3. Ejemplo de circuito en Tinkercad

¹ Tinkercad es una herramienta online gratuita y fácil de usar para el diseño en 3D, electrónica y simulación de código en : <https://www.tinkercad.com/>

2. Objetivos

Para elaborar los objetivos, se ha tenido en cuenta la taxonomía Bloom, que facilitará las labores de evaluación.

Los objetivos que se pretenden alcanzar con la realización de este trabajo pueden clasificarse en generales y específicos.

- **Objetivos Generales:**

- ✓ Analizar la necesidad de la modulación PWM en la electrónica industrial
- ✓ Estudiar los conceptos sobre las técnicas de modulación PWM.
- ✓ Comprender la importancia de ejecutar análisis de componentes armónicas

- **Objetivos Específicos:**

- ✓ Identificar las componentes armónicas a través de análisis de Fourier
- ✓ Conocer la herramienta FFT y aplicar a través de programas de simulación como es Orcad PSpice²
- ✓ Obtener la capacidad de diseñar diversos circuitos a través del IC 555 que genere señales moduladas por ancho de pulso
- ✓ Comparación de resultados obtenidos en diferentes montajes de forma teórica, simulaciones y método experimental
- ✓ Adaptar montajes a situaciones de docencia no presencial a través de elementos de simulación online

Debido a la actual, y rara situación que nos hemos visto obligados a vivir como es la pandemia mundialmente conocida como COVID-19, no ha sido posible la realización de todo lo que en un principio estaba previsto teniendo que buscar alternativas para la realización de los análisis experimentales. Para el caso del guion de prácticas de análisis de componentes armónicas, no fue necesario, ya que cuando se podía acceder a los laboratorios, se realizaron todas las medidas y montajes oportunos.

² Orcad Pspice es una aplicación de simulación de circuitos online desarrollada por OrCAD Systems Corporation

También, estaba previsto que fuesen impartidas la práctica de análisis de armónicos y FFT pero al no ser posible asistir ni por mi parte, ni por parte del alumnado a los laboratorios debidos al confinamiento, no se pudo realizar.

A partir de este momento, ya no se pudo acceder a los laboratorios por lo que no se pudieron realizar ningún análisis experimental de la parte de modulación por ancho de pulso teniendo que adaptar los resultados a los datos arrojados por la plataforma online Tinkercad.

3. Antecedentes

Existen multitud de textos relacionados con el tema que tratamos, entre los que se encuentran aquellos que normalmente son utilizados para la docencia como los de los autores Ned Mohan, Daniel W. Hart, Rashid etc. De la misma manera, se puede encontrar referencias mucho más específicas enfocadas al análisis de las componentes armónicas como son el documento docente emitido por la Universidad de Vigo “Análisis de circuitos mediante transformada de Fourier” o el emitido por varios profesores de la Universidad de Malasia en el informe técnico “Design and simulation of single phase inverter using SPWM unipolar technique” y fundamentos y aplicaciones de la modulación PWM como el documento elaborado por Francisco M. Gonzalez-Longatt “Modulación de ancho de pulso -Una introducción-”.

Como se ha comentado, hay multitud de documentación a cerca de la modulación PWM y medición de armónicos. Parar multitud de ellos, cabe realizar una mención especial como el libro del autor Ned Mohan conocido como “Electrónica de Potencia. Convertidores, aplicaciones y diseño” [3]. En este documento, podremos encontrar multitud de información acerca de los convertidores. Denotando la importancia que adquiere la modulación PWM, reserva una sección en la que se aborda este tema con multitud de análisis matemáticos de los mismos, análisis teóricos etc. Todas las explicaciones que se incluyen, estarán enfocadas a la conmutación de inversores. No menos importante es el libro del autor Daniel W. Hart “Electrónica de potencia” [1]. En este libro, se podrá encontrar también multitud de documentación acerca de toda la parte de la electrónica que engloba la electrónica de

potencia. En nuestro caso, nos volvemos a centrar en la búsqueda de información acerca de la modulación por ancho de pulso y el desarrollo matemático de las series de Fourier de las señales a las que es preciso realizar análisis de componentes armónicas. En este libro, se profundiza de manera un tanto más superficial en la modulación por ancho de pulso, pero adquiere mayor importancia el análisis de Fourier de las señales PWM y señales en general. Por lo que fue de gran ayuda a la hora de introducir circuitos para la obtención de las componentes armónicas de señales.

Otro de los documentos, el cual ha servido de apoyo e inspiración para la realización de este trabajo de fin de grado, es el trabajo de Ramón Cereceda Guerrero conocido como “Aplicación didáctica de modulación PWM: Montajes experimentales, ayuda por ordenador a su análisis teórico y simulación con PSpice” desarrollado para la universidad de Jaén como trabajo de Fin de Grado [2]. En él, se desarrollan dos guiones de prácticas en los que se trata de introducir al alumno al cálculo de series de Fourier y mediciones a través de la herramienta matemática FFT así como otro guion de montaje de señal modulada por anchura de pulso en la que se controlará el voltaje que se entregue a un LED de potencia.

Para establecer medidas de carácter experimental, es necesario desarrollar cierta destreza a la hora de utilizar los dispositivos que se disponen en los laboratorios. Para los análisis experimentales que se proponen en este trabajo, adquiere mayor importancia la destreza a la hora de la utilización de los osciloscopios. El porqué de esto, reside en la necesidad de observar representaciones de señales, así como realizar medidas a las mismas etc. En este trabajo de fin de grado, cobra especial importancia la medida de componentes armónicas, así como su efecto a través de las series de Fourier con la herramienta que los osciloscopios que se encuentran en los laboratorios (Tektronik TPS 2000B Y Agilent series 6000). Para ello, se ha realizado dos documentos que servirán de guía, para que el alumno pueda conocer cómo realizar análisis FFT (Fast Fourier Transform). Para la realización de estos documentos, fue necesario acudir a los manuales del usuario de los diferentes osciloscopios los cuales son “Agilent 6000 Series Oscilloscope: User's Guide” [4] creado por la empresa Agilent y “Osciloscopio de almacenamiento digital de la serie TPS2000 071-1445-00 Manual de usuario” [6] desarrollado por la empresa Tektronik

Inc. En ambos documentos podemos encontrar multitud de información acerca de los osciloscopios desarrollados por cada empresa y que han sido de utilidad para la elaboración de las guías para la medida de armónicos a través de la FFT.

Para la elaboración de ambas guías, se utilizó dos documentos, que aunque realizados por la empresa Agilent orientada a sus osciloscopios, podían ser incluidos en la realización de la guía del osciloscopio Tektronik dado su carácter didáctico. Los documentos en cuestión son “Fourier Theory & Practice, Part 1: Theory” [11] y “Fourier Theory & Practice, Part 1: Practice” [10] en los que se aplican tanto cálculos teóricos para la obtención de series de Fourier de señales, así como la medición de estas series a través de la herramienta FFT.

En la página web de National Instruments, más específicamente en el apartado “Comprender FFTs y Funciones Ventana” [5] se ofrece una visión general y detallada del funcionamiento de las funciones ventana que se aplican a los análisis FFT en osciloscopios para evitar representaciones falseadas.

El autor Francisco M. Gonzalez-Longatt, con su artículo “Modulación de Ancho de pulso-Una Introducción-” [13] busca realizar una introducción de la manera más didáctica posible a la modulación PWM para la conmutación de inversores. En el, el autor clasifica las técnicas PWM y ofrece un análisis teórico de cada una de ellas incluyéndose menciones también, análisis de contenidos armónicos de manera general de las técnicas PWM.

Por último, se destaca el artículo de carácter técnico “Design and simulation of a single phase inverter using SPWM unipolar technique” [20]. En el artículo, el autor diseña una serie de montajes que generen a través de la plataforma Simulink, una señal SPWM que sirva de conmutación para un inversor de una fase.

Todos estos artículos, libros, y más que están incluidos en la bibliografía, han sido de gran utilidad para la elaboración de este trabajo fin de grado. En ellos, se recoge multitud de información acerca de los temas que son objeto del trabajo. En especial, el documento realizado por el compañero Ramón Cereceda Guerrero [2] que ha sido de apoyo a la hora de elaborar los distintos guiones de prácticas.

4. Contexto dentro del grado

Dentro del grado de ingeniería electrónica industrial, este trabajo tiene una aportación principalmente en las asignaturas de electrónica de cuarto año, así como en una asignatura del master de ingeniería industrial. Estas asignaturas son principalmente la asignatura “Electrónica de potencia” del cuarto curso, aunque también se podría aplicar en “Sistemas electrónicos de alimentación y potencia”, en “Control y regulación de máquinas eléctricas” de cuarto curso como optativa y en el primer año de máster de Ingeniería Industrial, en la asignatura de “Sistemas electrónicos e instrumentación industrial”.

Código	Asignatura	Tipo	ECTS
13112022	Proyectos	OB	6
13112024	Electrónica de potencia	OB	6
13112004	Control por computador	OB	6
	Optativa 1	OP	6
	Optativa 2	OP	6

Figura 4. Situación de la asignatura Electrónica de Potencia

Las competencias y los resultados del aprendizaje que ayudan a adquirir estas prácticas en la asignatura de “Electrónica de potencia” de cuarto que se han desarrollado se exponen a continuación:

- **CEX4:** Conocimiento aplicado de electrónica de potencia. Capacidad para diseñar sistemas electrónicos de potencia.
- **CT2:** Capacidad para la gestión de la información, manejo y aplicación de las especificaciones técnicas y la legislación necesaria para la práctica de la ingeniería.
- **CEX5:** Conocimiento aplicado de instrumentación electrónica.
- **Resultado 38:** Conocer la utilización y limitaciones de los dispositivos electrónicos de potencia.
- **Resultado 41:** Saber analizar circuitos convertidores conmutados básicos.

- **Resultado 43:** Conocer los principios básicos de la modulación PWM y su aplicación a los inversores.
- **Resultado 45:** Conocer y utilizar la herramienta de análisis y simulación de circuitos de potencia.

Los guiones que se proponen como objeto de este trabajo de fin de grado, se incluirán dentro del apartado correspondiente a las clases de pequeños grupos en la asignatura Electrónica de potencia.

Estas tendrán un carácter introductorio a las prácticas de convertidores DC-AC que constarán de una duración de 4 horas. En total se proponen 4 prácticas siendo dos de ellas de carácter obligatorio y otras dos de carácter opcional.

Las dos primeras prácticas de carácter obligatorio pretenden abordar la modulación por ancho de pulso, así como el análisis de componentes armónicas de señales. Ambas prácticas tendrán una duración de 2 horas y el alumno deberá realizar en casa cálculos previos.

A modo de ampliación a estos guiones, se proponen dos guiones más de carácter opcional siendo el primero de ellos de carácter más avanzado y orientado a alumnos repetidores.

A2 - Clases pequeño grupo(24 horas)

Las clases prácticas de laboratorio, se realizarán en bloques de dos horas para un aprovechamiento adecuado del tiempo empleado, en grupos de dos alumnos. Las clases prácticas de simulación y problemas se realizaran en el aula de informática.

PRÁCTICAS DE LABORATORIO (14 horas):

- 1.- Transistor en conmutación (4h)
- 2.- Disparo SCR. Rectificadores (4h)
- 3.- Convertidor DC-DC reductor(4 h)
- 4.- Convertidor DC-AC, inversor(4h) 

PRÁCTICAS ÁULA INFORMÁTICA (10horas)(Resultados Aprendizaje 45)

- 1.- SCR (2h)
- 2.- Armónicos (2h)
- 3.- DC-DC (2h)
- 4.- DC-AC (2h)
- 5.- AC-DC (2h)

Figura 5. Prácticas de Electrónica de Potencia

5. Metodología

Para la elaboración de la metodología, se ha seguido la taxonomía de Bloom.

Esta taxonomía, implica abarcar un orden a la hora del aprendizaje comenzando desde un nivel inferior e ir avanzando hasta llegar a un nivel superior de pensamientos más complejos.

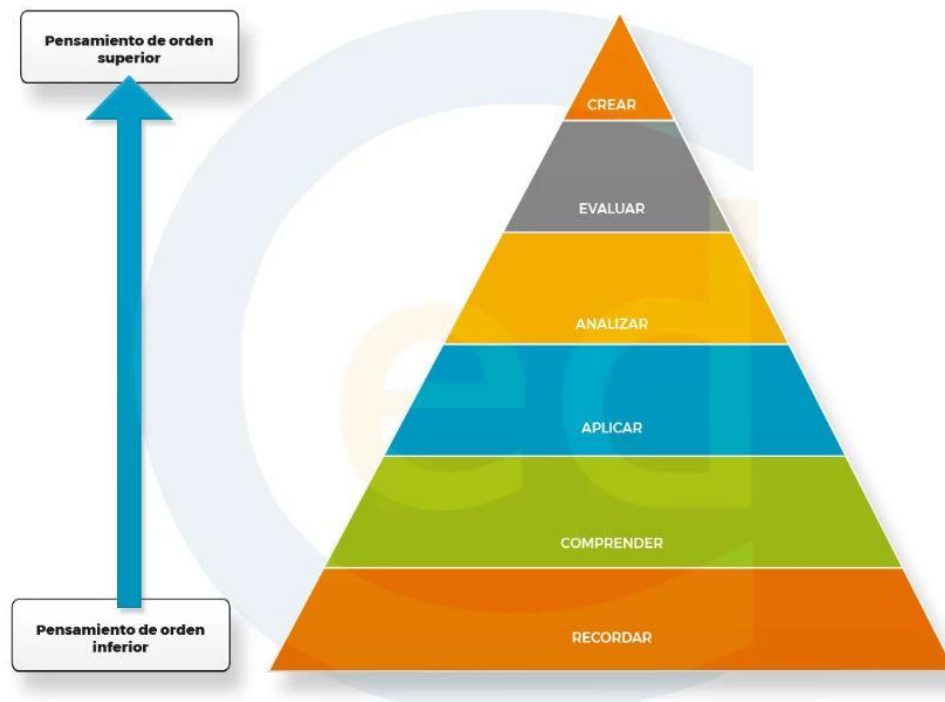


Figura 6. Gráfico de la Taxonomía de Bloom

Como podemos apreciar en la imagen, hasta llegar a la cúspide de la pirámide (pensamiento de orden superior) hemos de ir escalando puestos siendo los primeros pasos que se han de recopilar información y comprenderla hasta alcanzar, una vez se conocen todos los aspectos del tema a tratar, la capacidad de crear y analizar montajes y diseños de carácter complejo a partir de la información que fue recopilada en los primeros escalones.

La metodología que se ha seguido para la elaboración del trabajo es la siguiente.

1. Recopilación de bibliografía acerca de análisis de componentes armónicas de señales y modulación por ancho de pulso.
2. A partir de la bibliografía recopilada, estudio de los mismo para introducirse en los conceptos básicos de análisis de armónicos, así

como las técnicas para la obtención de los mismo centrándonos en el algoritmo matemático FFT. En el caso de modulación PWM, partiendo de la documentación elegida, se estudian las diferentes posibilidades que ofrece, así como las implementaciones que se pueden realizar a través del temporizador de precisión IC 555.

3. Diseño de diferentes montajes en los que se aplique todo lo estudiado. En ellos se recopilarán análisis teóricos de armónicos a través de transformadas de Fourier, diseño matemático de componentes para generar señales PWM etc.

Para la parte de análisis de componentes armónicas, se proponen la medición de componentes armónicas de señales comunes como son, triangular, cuadrada, senoidal etc.

En el caso de modulación por ancho de pulso, se proponen diversos montajes con el temporizador IC 555 configurando el mismo como astable y monoestable, así como buscando introducirnos a la programación de una señal PWM a través del microcontrolador ARDUINO UNO R3.

4. Simulación a través de la herramienta de simulación de circuitos Orcad PSpice de los montajes que han sido planteados para poder establecer comparaciones posteriores con los resultados obtenidos.
5. Montaje en laboratorio de los circuitos planteados estableciendo las medidas oportunas. Así mismo, también se estudió como medida preventiva a la docencia online, la implementación de diferentes montajes a través de la plataforma online Autodesk Tinkercad.
6. Comparación de resultados obtenidos en los diferentes guiones.
7. Análisis de resultados obtenidos con la realización de los guiones propuestos.

6. Descripción detallada de prácticas

6.1. Guion de prácticas 1: Armónicos y función FFT. Análisis teórico, simulación y análisis experimental.

La elaboración de esta práctica surge de la necesidad de introducirnos en la medida de armónicos. Es de suma importancia estudiar las componentes armónicas de señales debido a que al circular una señal por una carga no lineal, puede sufrir modificaciones en su forma de onda provocando efectos adversos no deseados. Para ello, se proponen multitud de cálculos teóricos, simulaciones y montajes experimentales en los que el alumno, desarrolle la capacidad de desenvolverse en el análisis de armónicos.

Con esta práctica se pretende guiar al alumno a través de la medición y uso de la herramienta FFT para ser capaz de, en posteriores prácticas, comprender y desarrollar análisis de componentes armónicas como lo serán las de las señales PWM.

Los objetivos que se pretenden conseguir con la realización de dicha práctica es que el alumno comprenda la importancia de la medición de armónicos de señales, así como la importancia de la herramienta FFT y su uso tanto para simulación en el programa Orcad Pspice como en los osciloscopios del laboratorio.

En el mismo guion, encontraremos una breve introducción en la que se menciona todos los aspectos importantes de la medida de armónicos, así como diversas explicaciones del porqué de la importancia que adquiere analizar las mismas. Para realizar mediciones como se mencionó con anterioridad usaremos la herramienta matemática FFT. Este consistirá en una forma rápida de realizar un análisis de Fourier discreto. Se debe tener en cuenta, que esta forma de calcular una señal no es más que un algoritmo para el cálculo de la transformada de Fourier. Este tipo de análisis presenta el problema de que puede generar discontinuidades y falsos armónicos.

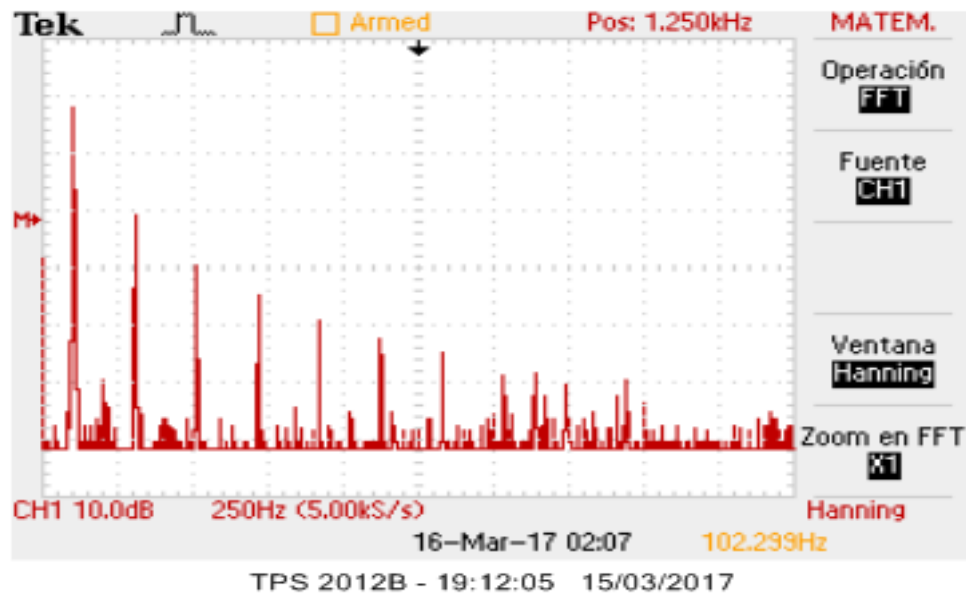


Figura 7. Análisis FFT

Para eliminar dichas representaciones erróneas, entran en juego las denominadas ventanas [10]. Estas ventanas son denominadas como funciones matemáticas periódicas que se aplican a los datos de la señal de manera que alisen las discontinuidades producidas en la adquisición. Cada ventana tendrá características diferentes.

Ventana	Medidas	Características
Hanning	Formas de onda periódicas	Mejor frecuencia y peor precisión en la amplitud que Flattop
Flattop	Formas de onda periódicas	Mejor amplitud y peor precisión en la frecuencia que Hanning
Rectangular	Pulsos o señales transitorias	Ventana específica para formas de onda que no presentan discontinuidades; en esencia es lo mismo que la falta de una ventana

Figura 8. Tipos de ventana y características

El guion tanto del alumno como del profesor se divide en tres partes.

La primera de ellas consiste en análisis teórico de componentes armónicas a través de las series de Fourier de señal senoidal, cuadrada y triangular.

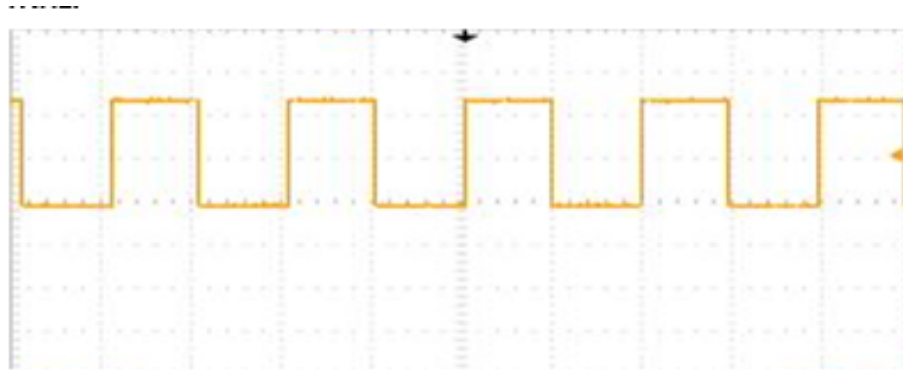


Figura 7. Onda cuadrada

La descomposición de Fourier de una onda cuadrada es la siguiente:

$$v_0(t) = \frac{V_{pp}}{2} + \sum_{n, \text{impar}} \left(\frac{4V_{pp}}{n\pi} \right) \text{sen}(n\omega_0 t) \quad [\text{Ec. 7}]$$

Tri. teórica	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia	0Hz	1KHz	3KHz	5 KHz
Amplitud(V)	2.5V	3.183V	1.061V	0.637 V

Figura 9. Ejemplo análisis teórico práctica análisis de armónicos

El segundo apartado consiste en la realización de diversas simulaciones a través de la plataforma de simulación Orcad PSpice en la que se exigirá al alumno la representación de las diferentes formas de onda que se pedían en los análisis teóricos y dos diseños más .CIR como son un rectificador monofásico de onda completa con filtro LC con carga no lineal y el análisis en el neutro de un sistema trifásico.

Por último, encontraremos una serie de montajes experimentales en los que se debe realizar la medición en los osciloscopios del laboratorio de las mismas señales que se han analizado con anterioridad. Se expone a continuación, a modo de ejemplo, la medición para la señal cuadrada.

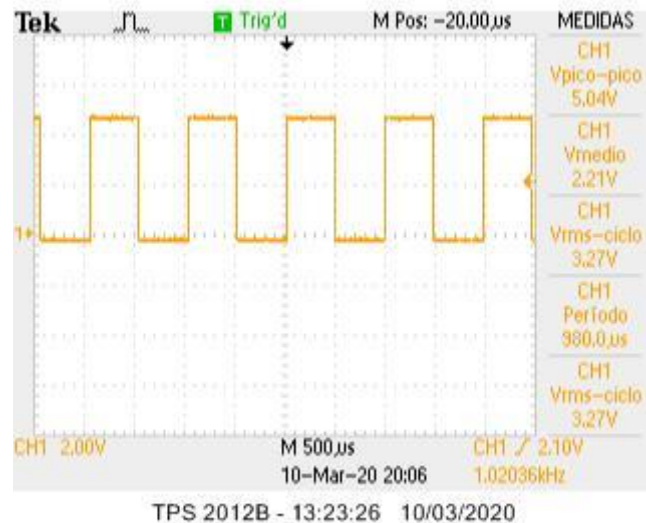


Figura 10. Señal Cuadrada en osciloscopio

Y su descomposición de Fourier,

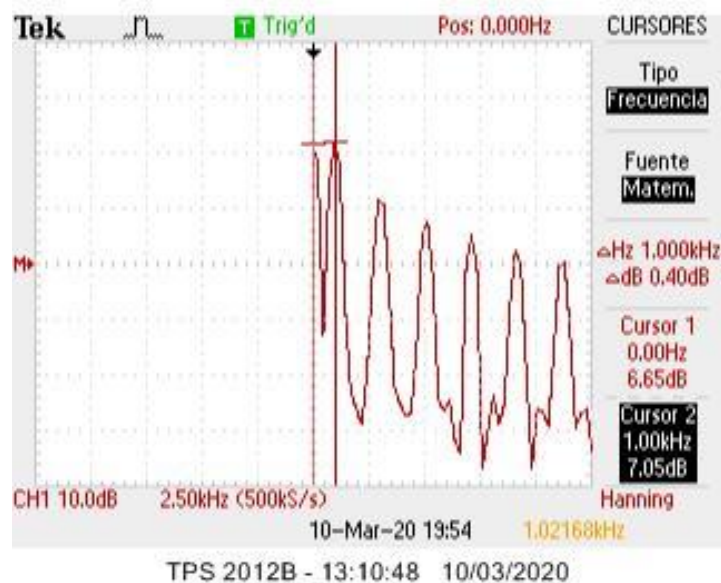


Figura 11. Descomposición armónica en osciloscopio de señal cuadrada

Una vez se hayan realizado los apartados anteriores, se debe establecer una comparación de los valores obtenidos. Con esto se pretende observar cómo varían las mediciones dependiendo del modo de obtención, aunque la variación no será de gran importancia y ofrecerán resultados similares.

6.2. Guion de prácticas 2: Modulación PWM basada en un circuito integrado NE 555 configurado como astable. Análisis teórico, práctico y simulaciones.

Este guion sirve como medida de introducción a la modulación por ancho de pulso. La necesidad de la realización de esta práctica reside en la importancia que adquiere la modulación PWM en la electrónica industrial debido a la multitud de utilidades que presenta.

En esta práctica se introducirá de manera didáctica a través de un montaje con un temporizador de precisión como es el IC 555 configurado como astable que genere una señal PWM variando el ancho de pulso modificando el valor de un potenciómetro.

El objetivo principal de la práctica, es introducirnos a la modulación PWM estableciendo diversos análisis tanto teóricos como simulaciones y montajes experimentales de carácter didáctico. Así como la implementación de circuitos con el temporizador de precisión NE 555 que sean capaces de generar una señal modulada en ancho de pulso para su posterior análisis de componentes armónicas.

Este guion, al igual que la anterior, se encuentra diferenciada en diferentes partes.

Primero encontramos una parte teórica en la que se debe diseñar, con las indicaciones y explicaciones que se presentan en el documento, la señal PWM que generará el temporizador 555 fijando los valores de resistencias, condensadores etc. Una vez ha sido diseñado, se ha de calcular a través de las series de Fourier las componentes armónicas de la señal PWM generada para diferentes ciclos de trabajo.

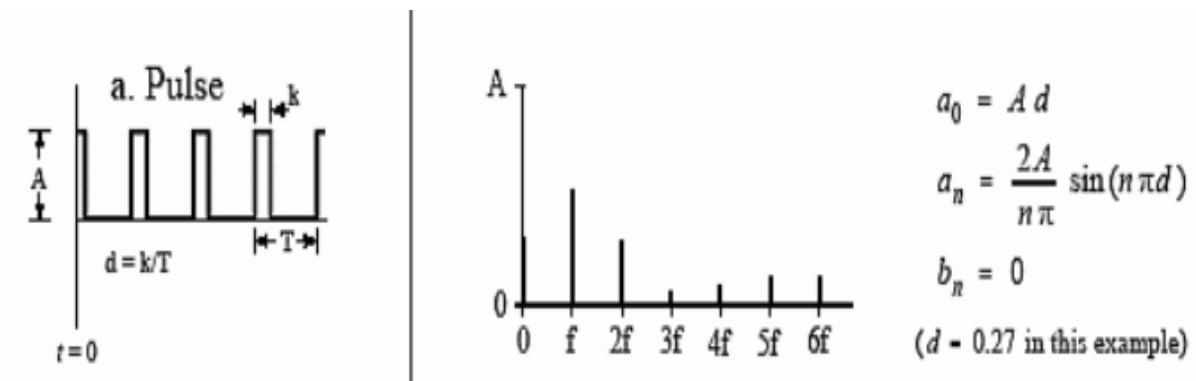


Figura 12. Análisis de Fourier de señal con ancho de pulso variable

En la segunda parte, se debe analizar a través de las simulaciones el circuito diseñado en la primera parte. En él, se debe representar, que, efectivamente, variando el valor del potenciómetro, se varía el ciclo de trabajo de la señal. Se pide de igual manera que se estudie el análisis de componentes armónicas representando el espectro de frecuencias de la señal y los valores a través del archivo .OUT así como varias mediciones más.

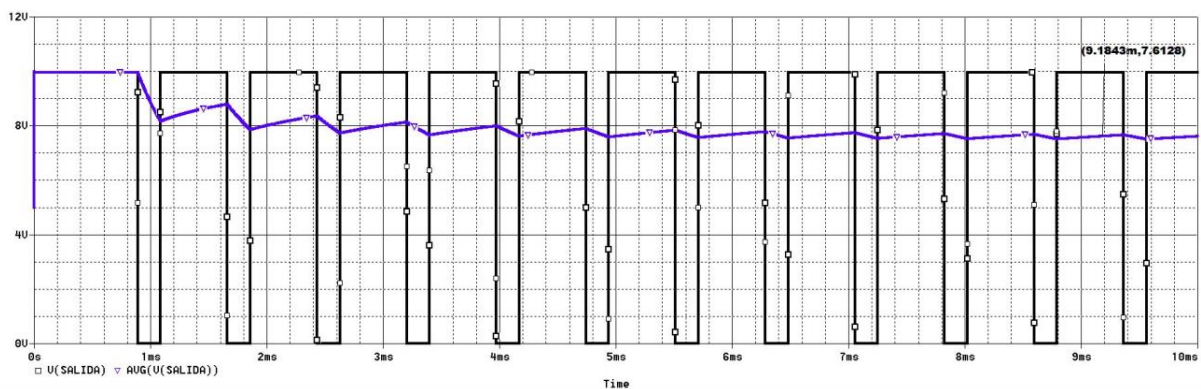


Figura 14. Señal PWM para ciclo de trabajo del 75%

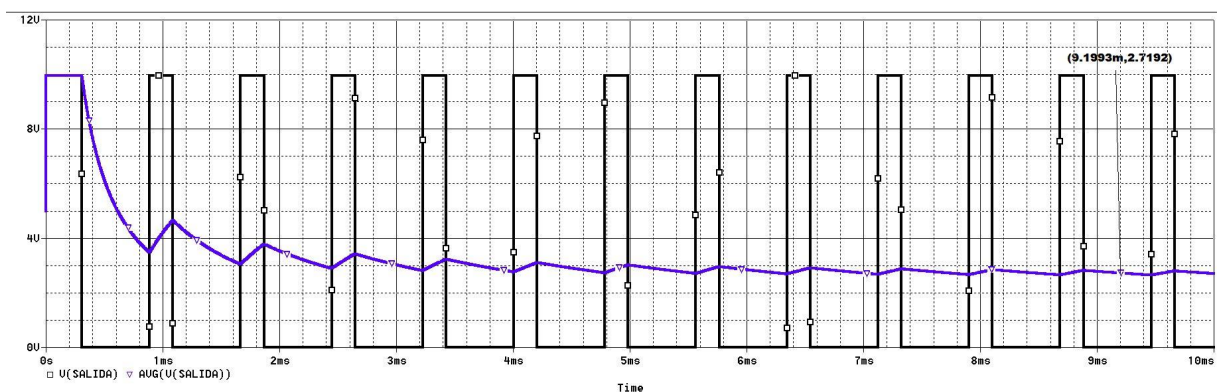


Figura 13. Señal PWM para ciclo de trabajo del 25%

Por último, se pide realizar un análisis experimental al diseño que se propuso en el primer apartado, pero con una experiencia más visual. En el, se controlará la luminosidad de un LED y la velocidad de un motor DC a través de la señal modulada variando el ciclo de trabajo de la señal y un mosfet IRF 540. Una vez haya sido realizado el montaje y se compruebe su correcto funcionamiento, se ha de variar el ciclo de trabajo a los que se pidan para su posterior representación de forma de onda, espectro de frecuencias y diversas mediciones más.

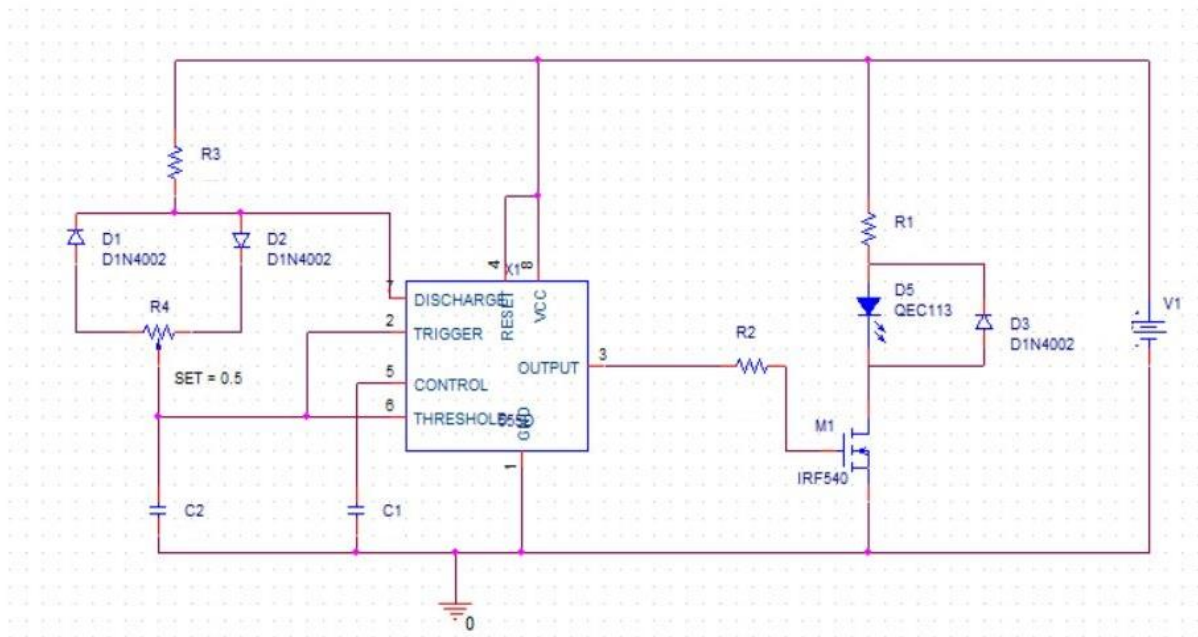


Figura 15. Circuito de señal PWM generada con IC 555 configurado como astable propuesto en la práctica

Como apoyo a este montaje, se propone también el uso de la herramienta online Tinkercad en la que el alumnado podrá simular los circuitos que se proponga montando de igual manera que harían en el laboratorio. Con esta herramienta podrían realizar el montaje sin ningún problema como medida preventiva a, en el caso, de que en el cuatrimestre que se imparte la docencia de la práctica, tuviésemos que volver a enfrentarnos a jornadas de clase y prácticas online.

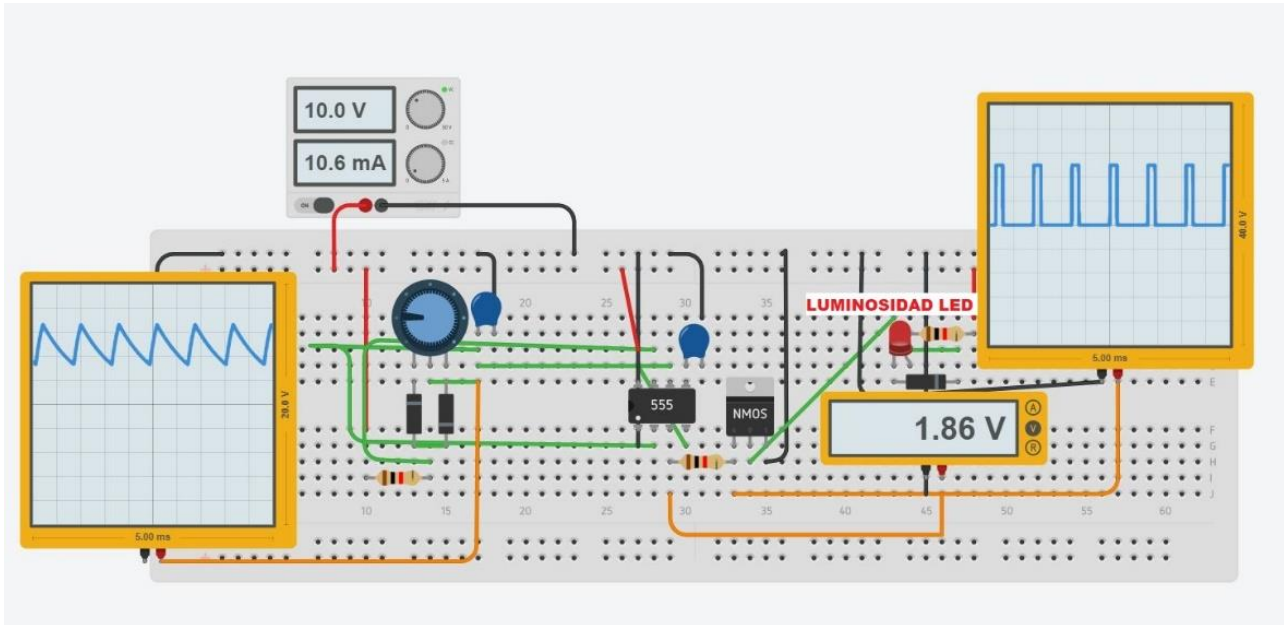


Figura 16. Montaje en Tinkercad del circuito de la figura 15

El enlace al montaje en cuestión es el siguiente:

<https://www.tinkercad.com/things/ec5HX4ZBtxC>

Para finalizar, se propone que se comparen todos los resultados obtenidos en los cálculos y mediciones obtenidos en la práctica.

6.3. Guión de prácticas 3: Modulación SPWM basada en un circuito integrado NE555 configurado como monoestable.

Este guion de prácticas, será considerado de carácter opcional y más avanzado que la práctica que le antecede. Su realización estará enfocada para alumnos repetidores de la asignatura Electrónica de Potencia que en años anteriores se hayan enfrentada a la práctica que se proponía anteriormente.

Con la realización de esta práctica, de carácter más avanzado, se pretende que el alumno sea capaz de analizar el funcionamiento de la modulación senoidal por

ancho de pulso así como diseñar un circuito capaz de generar este tipo de señal a través de la implementación de un oscilador de relajación con un amplificador operacional AO741 y un temporizador de precisión NE 555.

En el mismo, se propone el diseño de un circuito que sea capaz de generar una señal senoidal modulada en ancho de pulso. Para ello, es necesario la implementación de un circuito más avanzado que el anterior.

El circuito en cuestión, constará de un IC 555 configurado como monoestable en el que surgirá la necesidad de la introducción de dos entradas, una de ella será un tren de pulsos considerada como señal portadora y otra una señal senoidal considerada moduladora. Al enfrentarnos a este montaje, surgió la problemática de que en los laboratorios no se disponía de la cantidad de generadores de señales para la obtención de las dos señales en todos los puestos de laboratorio. Tras esto, se llegó a la conclusión de generar dicho tren de pulsos a través de el diseño de un oscilador de relajación.

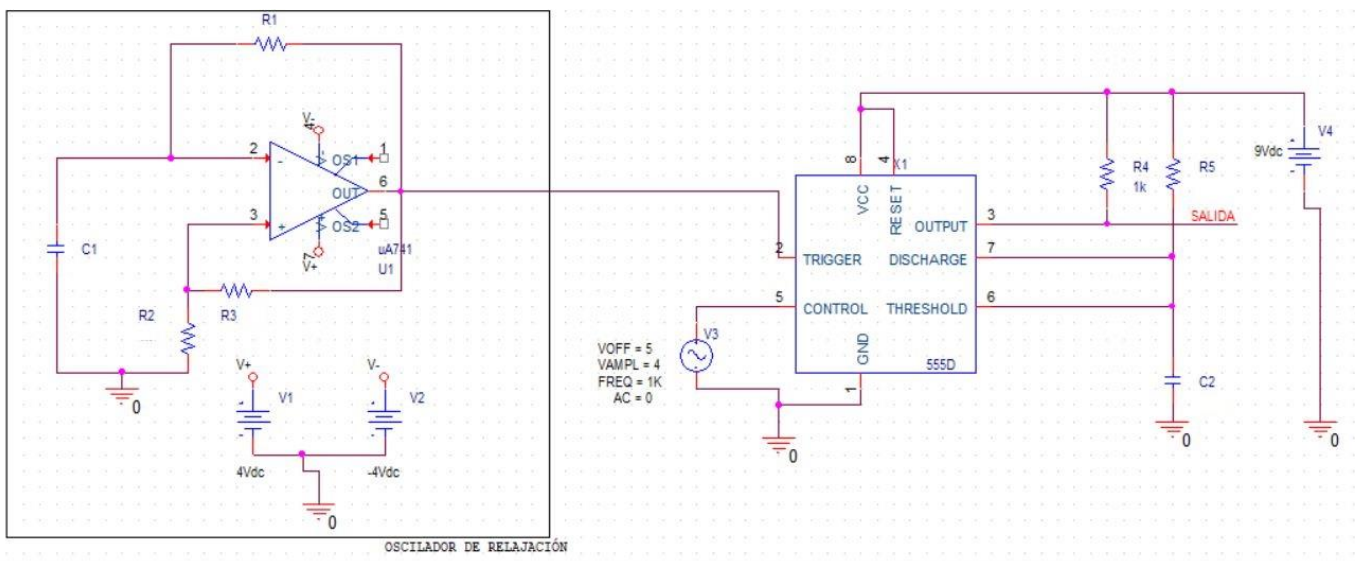


Figura 17. Circuito de señal SPWM con IC 555 como monoestable y oscilador de relajación con AO 741 propuesto en la práctica

Conocidos todos estos aspectos, se pide en el mismo diseñar tanto el oscilador de relajación como el generador de la señal SPWM con el IC 555. Una vez haya sido diseñado el circuito en su totalidad, se desea que se simule para comprobar el correcto funcionamiento del mismo.

Con la realización de la simulación, surgió el inconveniente de que, para la simulación, no funcionaba correctamente si aplicábamos como señal portadora el tren de pulsos generado con el oscilador de relajación. Esto se debe a cierta diferencia que existe entre el temporizador NE 555 que se usará en el laboratorio y el que se dispone en Orcad PSpice 555D. Se descubrió que el ciclo de trabajo mínimo que es capaz de alcanzar coincide con el valor inverso al ciclo de trabajo de la señal moduladora, de tal modo que, para valores muy bajos de la onda cuadrada generada por el oscilador de relajación, la señal a la salida se sincronizase con el estado opuesto al de la onda portadora provocando esto que solo fuera modulable la mitad de la señal moduladora [2].

Por lo que, para realizar las correctas mediciones, se procede a intercambiar el oscilador de relajación por una fuente Vpulse.

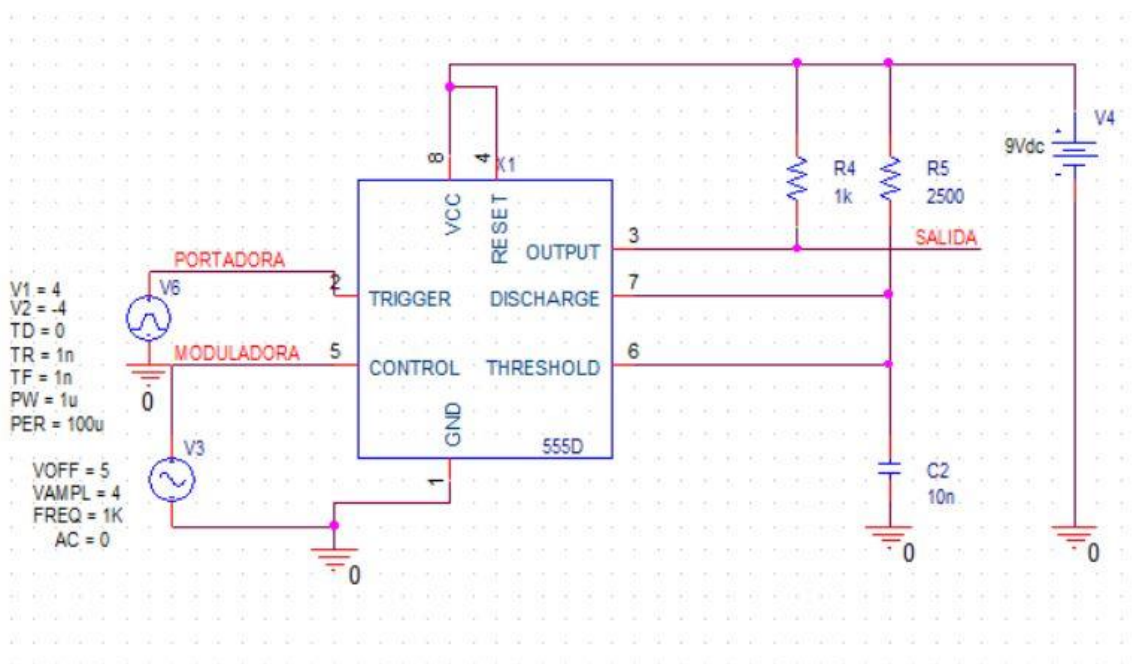


Figura 18. Circuito SPWM para la simulación

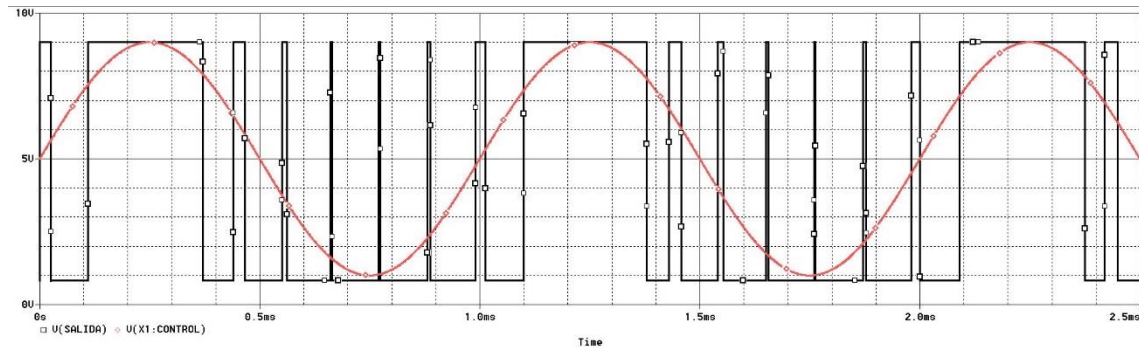


Figura 19. Señal PWM frente a moduladora en Orcad PSpice

Una vez se haya realizado el montaje, se procede a la simulación y representación de diferentes medidas para así proceder posteriormente a la comparación de valores con lo que se obtengan en el montaje experimental.

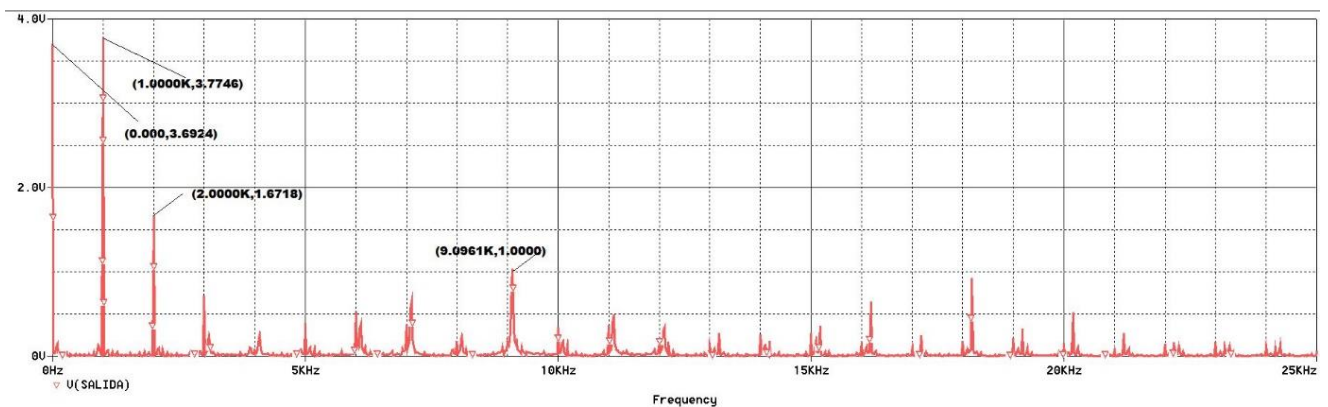


Figura 20. Análisis FFT de señal SPWM

Por último, en este guion podremos encontrar también el diseño de un modelado en simulink de un inversor monofásico disparado con señal SPWM unipolar. En él, se pide ejecutar el montaje de este inversor a partir de las indicaciones oportunas, así como una vez se haya realizado, proceder a la realización de diversas representaciones, así como un análisis de componentes armónicas a través de simulink.

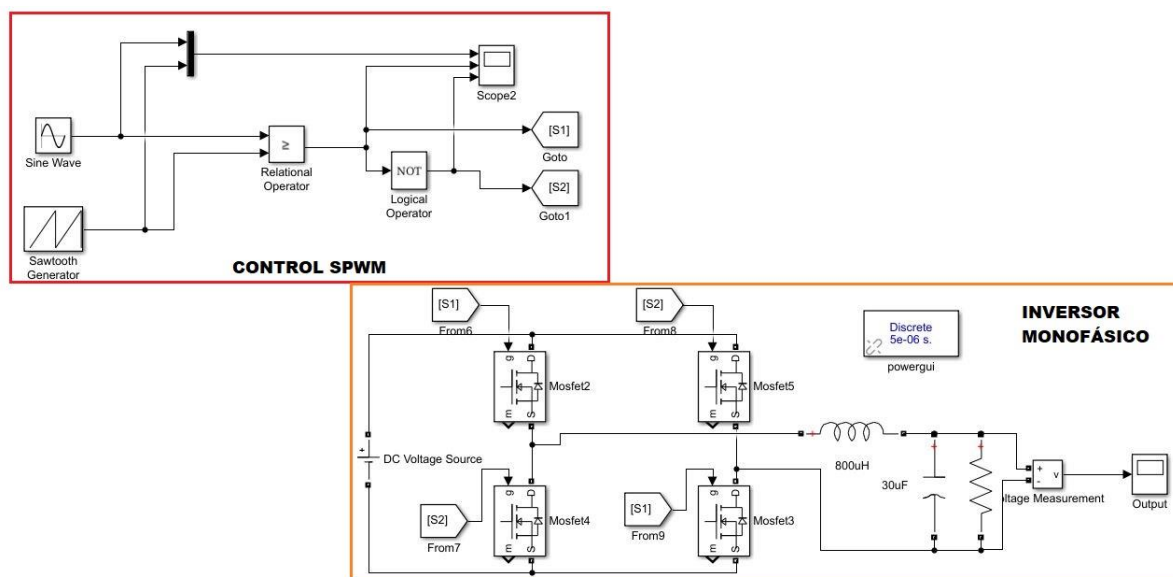


Figura 21. Diseño en Simulink de inversor monofásico

Para ello, se explicará brevemente como proceder, paso a paso, a la realización de dicho análisis en la plataforma.

6.4. Guion de prácticas 4: Programación de una señal PWM a través de Arduino UNO R3

Este guion de carácter opcional también, consiste en programar a través del microcontrolador Arduino UNO R3 una señal PWM pudiendo modificar el ciclo de

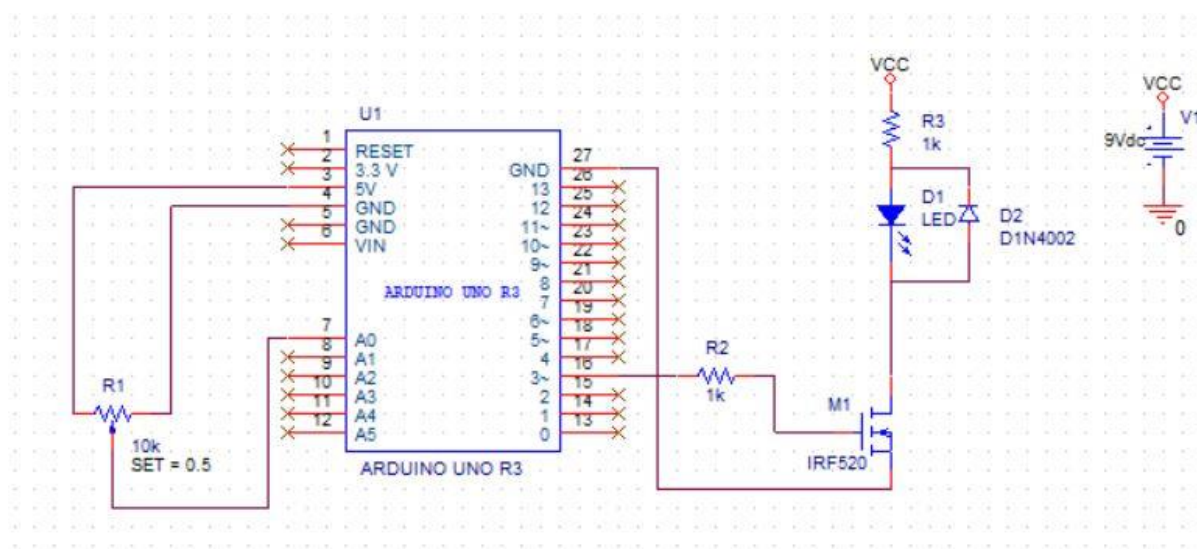


Figura 22. Diseño equivalente en Arduino UNO R3

trabajo de una señal variando el valor de un potenciómetro, pero de una manera un tanto más sencilla de la que se estudió en el guion del IC 555 configurado como astable.

El objetivo general que se pretende conseguir con la realización de dicha práctica es que el alumno sea capaz de a través de un código generado en la plataforma Arduino, generar una señal PWM y comprobar el funcionamiento del mismo.

La programación a realizar en el entorno de programación Arduino consta de un código sencillo en el que a través del valor que lea en unos de sus puertos analógicos al que esté conectado el potenciómetro, sea capaz de variar el ciclo de trabajo que presente a la salida la señal PWM.

En el mismo documento, se da a modo de información complementaria, información relevante para la obtención del código que genere la señal.

Se pide que una vez se realice el código, se compruebe el correcto funcionamiento, y se lleve a cabo, ya sea en los laboratorios o en la plataforma online Tinkercad, una especie de montaje como vimos en el diseño del IC 555 configurado como astable para la generación de una PWM, para que se visualice con un LED o un Motor DC el efecto que tendrá la variación del ciclo de trabajo en estos.

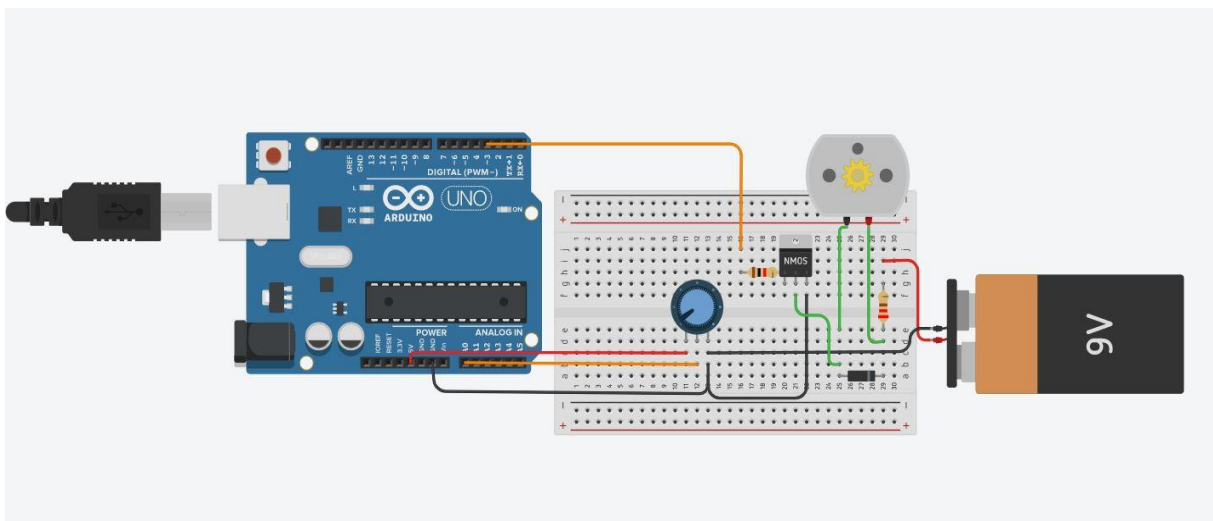


Figura 23. Montaje en Tinkercad del diseño de la figura 22

El link al diseño en cuestión en la plataforma Tinkercad es el siguiente:

<https://www.tinkercad.com/things/0RTzkAkTrLg-pwm-arduino/editel?sharecode=L2LMBgMNsftdEhdIreUxxBFFiTE7NTCP1pHpTR2fuY>

6.5. Guía de medición de armónicos a través de FFT para osciloscopios Tektronik TPS 2000B y Agilent Series 6000

Estos documentos sirven de guía para la medición de componentes armónicas a través de la herramienta matemática FFT para los osciloscopios que se disponen en los laboratorios.

En ambos documentos, se ofrece una descripción detallada de como se ha de proceder, paso a paso, desde la acomodación de señal hasta la medición con cursores en los espectros de frecuencia.

También se ofrece una descripción sobre las funciones ventana que se disponen explicando en que casos es más favorable usar un tipo de ventana u otra.

7. Resultados y conclusión

Como resultado de la elaboración de este trabajo de fin de grado, se obtienen una serie de guiones de prácticas que se centran en el estudio y diseño de las señales moduladas en ancho de pulso, así como la medición de armónicos a través de las series de Fourier. En ellos podremos encontrar diferentes cálculos teóricos, así como simulaciones con Orcad PSpice, Simulink y montajes experimentales adaptados, también, a la docencia telemática con Autodesk Tinkercad.

La disposición de las mismas irá desde la de medición de armónicos, a modo de introducción a las que se realizarán posteriormente, hasta las de modulación PWM en las que se busca introducir al alumno, desde un guion de carácter más sencillo, hasta otro más avanzado.

Con la realización de estos guiones, se ha llegado a la conclusión de la complejidad que adquiere la realización de material de carácter didáctico y pedagógico debido a la necesidad de establecer una estructuración adecuada para una correcta expresión de los conocimientos que, la persona a la que van dirigida los documentos desarrollados, pueda comprenderlos con de manera sencilla. Algo que también a lo

que se ha llegado a la conclusión es algo, qué, a primera vista, parece algo que no es tan complejo como es la recopilación de información. La cantidad de tiempo que se ha de emplear en la búsqueda de bibliografía y para el estudio de los mismo para ser capaz de desarrollar documentación de carácter técnico.

A medida que me iba documentando acerca del tema, objeto del trabajo de fin de grado, entendía la importancia que adquiriría la modulación PWM y cómo hay multitud de personas que se han dedicado íntegramente al estudio del mismo. Así como también, a medida que se indagando en varios documentos sobre el análisis de componentes armónicas, la necesidad de mitigar los efectos adversos que pueden provocar qué, en algunos casos, puedan provocar efectos fatales para los dispositivos.

Así también, surgió durante la realización del mismo, el imprevisto de que tuvimos que enfrentarnos a la docencia de forma telemática por lo que se tuvo que intentar adaptar los montajes que se proponían para el análisis experimental a la docencia telemática. Concluyendo la necesidad que ha surgido en esta pandemia, de adaptar los guiones de práctica a esta modalidad de docencia.

8. Anexos

8.1. Armónicos y función FFT. Análisis teórico, simulación y análisis experimental. Guion para el alumno.

8.1.1. Objeto de la práctica

Los objetivos de la práctica se pueden resumir en:

1. Entender la importancia de la presencia de armónicos en una señal y la necesidad de medirlos.
2. Comprender la función de FFT y su utilidad dentro del osciloscopio y como herramienta de análisis en las simulaciones.

Los resultados esperados del aprendizaje serán:

1. Analizar componentes armónicas de diferentes formas de onda usando el osciloscopio.

2. Generar diferentes formas de onda y obtener los resultados del análisis espectral de las mismas.
3. Usar la función de FFT en OrCad Pspice.

8.1.1.1. Introducción y Fundamentos teóricos

8.1.1.1.1. Armónicos

En esta práctica se van a utilizar conceptos sobre armónicos y su análisis en espectro mediante el método de FFT.

Joseph Fourier demostró que cualquier forma de onda periódica se puede expresar como la suma de diferentes ondas de forma senoidal, este hecho nos permite representar las formas de onda que estudiemos en un espectro en el cual podríamos expresar nuestra forma de onda estudiada como una serie de senoides oscilando a una frecuencia múltiplo de la conocida como **fundamental** y amplitud concreta, de manera que a más frecuencia tengan estas senoides menor será su amplitud avanzando en múltiplos de números enteros de manera que 1º armónico tiene una frecuencia y amplitud fundamental, 2º armónico el doble que el primero en frecuencia y la mitad en amplitud, 3º armónico el triple que el primero en frecuencia y tres veces menos de amplitud y sucesivamente.

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sin(n\omega_0 t) \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde los coeficientes a_0 , a_n y b_n se calculan de la siguiente manera:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad [\text{Ec. 2}]$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad [\text{Ec. 3}]$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(t) \text{sen}(n\omega_0 t) dt \quad [\text{Ec. 4}]$$

En la forma de onda que sea de naturaleza senoidal, tendrán una importancia mayor los primeros armónicos sin embargo en forma que no se parezcan nos encontraremos con armónicos de orden superior de valores significativos.

Al aplicar una señal de tensión senoidal a una carga no lineal, esta puede llegar a deformar la señal de alimentación al introducirle armónicos no deseados. Para medir esta distorsión existe el coeficiente de **Distorsión Armónica Total** o las siglas en ingles **THD** que indica precisamente la dependencia de una forma de onda estudiada de los armónicos de orden superior con respecto al fundamental.

8.1.1.1.2. Análisis y medición de armónicos por FFT

El análisis y medición de armónicos en laboratorio se lleva a cabo normalmente mediante un analizador de armónicos, pero al ser costosos y no disponer de suficientes para la realización de la práctica, se harán las mediciones mediante el uso de osciloscopios que tienen una función especial matemática para el análisis de formas de onda y su descomposición en armónicos, mediante un método llamado **Transformada Rápida de Fourier** o con sus siglas en inglés **FFT**.

El análisis FTT consiste en una forma más rápida de realizar un análisis de Fourier discreto. Esto se consigue reduciendo el número de computaciones que se han de realizar a la hora de conseguir los datos que arrojan una transformada de Fourier discreta. Una cosa que hemos de tener en cuenta es que esta forma de calcular las componentes armónicas de una señal no es más que un algoritmo para el cálculo de la transformada de Fourier [9].

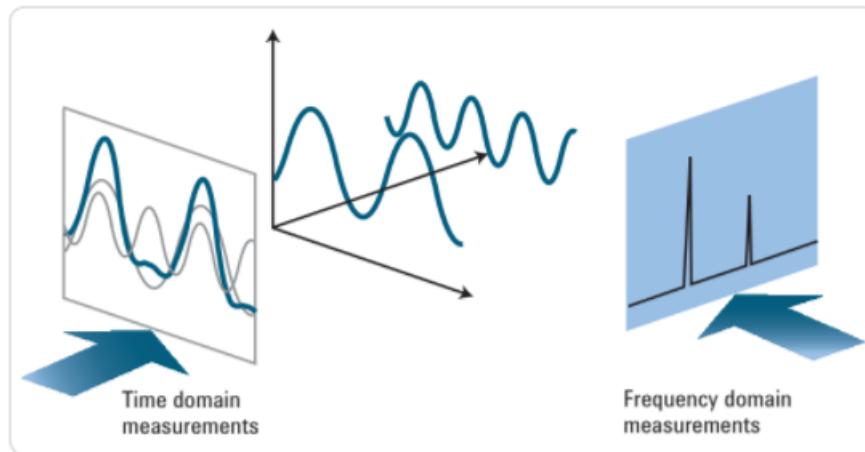


Figure 1-2. Relationship between time and frequency domain

Figura 24. Relación entre el dominio de la frecuencia y el tiempo [9]

FFT es un algoritmo matemático que realiza una transformada de Fourier de una señal usando 2^N valores para representar de forma eficaz, utilizando pocas instrucciones y ciclos de máquina, una aproximación razonable de la transformada. El mayor problema que presenta este algoritmo es que, al igual que la transformada de Fourier completa, supone que la señal a la que se aplica es completamente periódica, provocando problemas de discontinuidad y haciendo necesario el uso de ventanas para evitar problemas de falsos armónicos en la señal. Además, el uso de un rango para detectar estos armónicos hace al método susceptible a perder resolución a costa de representar márgenes de frecuencia grandes o a presentar armónicos inexistentes debido a no cumplir el criterio de Nyquist [4].

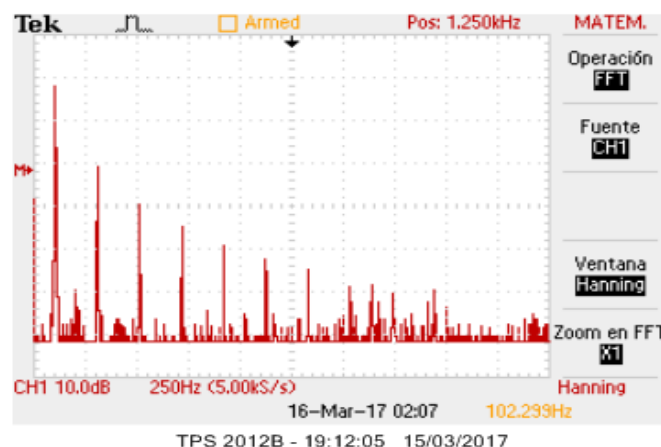


Figura 25. Ejemplo de visualización de FFT en el osciloscopio

El problema que provocan las FFT es que pueden generar discontinuidades al suponer que la onda a estudiar es completamente periódica, lo que puede generar discontinuidades y falsos armónicos.

Las ventanas son funciones matemáticas periódicas que se aplican a los datos de la señal de manera que alisen las discontinuidades producidas en la adquisición, cada ventana tiene unas características que afectaran a la resolución en amplitud o en frecuencia haciendo que cada ventana tenga una utilidad específica. En la figura 3 se puede observar un ejemplo de lo que sería la aplicación de FFT con ventana en los datos adquiridos por el osciloscopio [2].

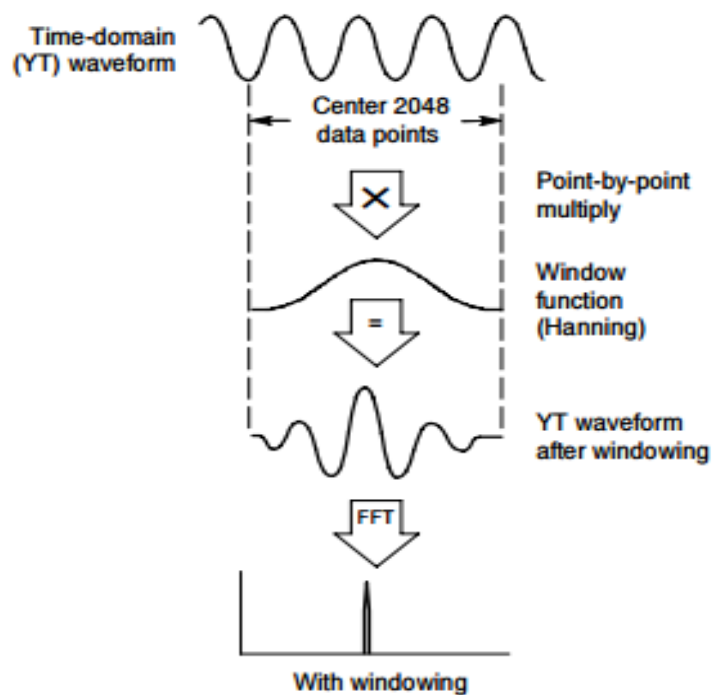


Figura 26. Proceso de aplicación de ventana [9]

Los osciloscopios **Tektronix TPS 2012B** que tenemos en el laboratorio tienen 3 tipos distintos de ventanas aplicables al canal elegido: Hanning, Flat-top y rectangular. En la figura 4 se puede apreciar cómo funcionan cada una de las ventanas.

Ventana	Medidas	Características
Hanning	Formas de onda periódicas	Mejor frecuencia y peor precisión en la amplitud que Flattop
Flattop	Formas de onda periódicas	Mejor amplitud y peor precisión en la frecuencia que Hanning
Rectangular	Pulsos o señales transitorias	Ventana específica para formas de onda que no presentan discontinuidades; en esencia es lo mismo que la falta de una ventana

Figura 27. Diferentes tipos de ventana en TEKTRONIK TPS 2012B [9]

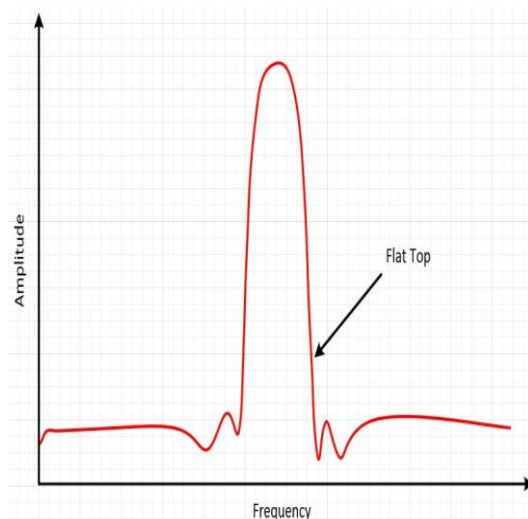


Figura 29. Ventana Flattop [3]

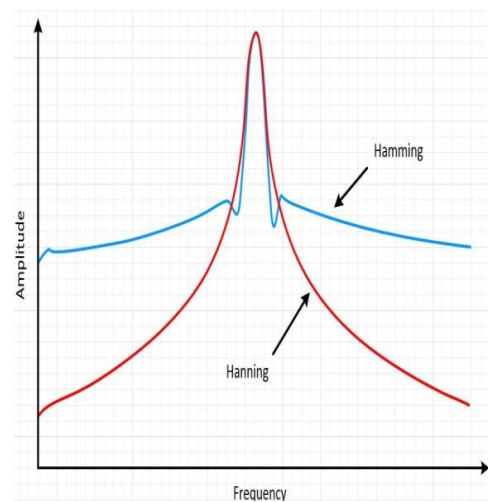


Figura 28. Ventana Hanning y Hamming [3]

En resumen, las ventanas son funciones matemáticas con el objetivo de minimizar la fuga espectral producida por discontinuidades en el número no entero original de periodos en una señal reduciendo la amplitud de las discontinuidades en los límites de cada secuencia finita adquirida por el digitalizador del osciloscopio. En general la ventana Hanning es satisfactoria para el 95% de los casos ya que tiene buena resolución de frecuencia y una baja fuga espectral [5].

Una vez aplicada la ventana y corregido el problema de discontinuidad, a la forma de onda se le aplica el algoritmo FFT y el resultado es una aproximación

bastante veraz en frecuencia y amplitud del espectro armónico de la señal en el dominio de la frecuencia.

Esta representación del espectro armónico consta de 2048 puntos de los cuales solo se representan 1024 en la pantalla sin hacer zoom. Para la observación del espectro en frecuencias puntuales o en armónicos de gran importancia podemos hacer hasta un zoom de x10. El osciloscopio Tektronix TPS 2012B representa la amplitud en el modo FFT en decibelios siendo **0 dBs igual a 1V eficaz** [2].

Para la conversión de medidas absolutas a dBs se usa la siguiente formula:

$$dB = 20 \log \left(\frac{V_{RMS}}{1V_{RMS}} \right) \quad [\text{Ec. 5}]$$

8.1.2. Análisis Teórico

Para los cálculos teóricos de esta práctica se requiere de la ecuación de Fourier de una onda triangular y la de una onda cuadrada.

La descomposición de Fourier de una onda triangular es la siguiente:

$$v_0(t) = \frac{V_p}{2} + \sum_{n, \text{impar}} \left(\frac{-4V_H}{(n\pi)^2} \right) \cos(n\omega_0 t) \quad [\text{Ec.6}]$$

Donde V_p es el valor de pico de nuestra forma de onda generada.

1. **Calcular el valor de amplitud y frecuencia del primer, tercer y quinto armónico, además de la componente en continua de una onda cuadrada de 5 Vpp, una tensión de offset de 2.5V y que tiene una frecuencia de 1KHz.**

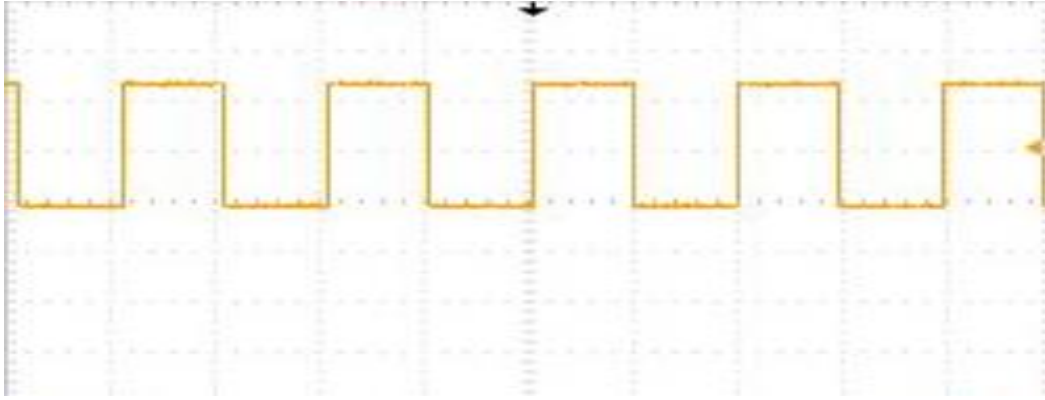


Figura 30. Onda cuadrada

La descomposición de Fourier de una onda cuadrada es la siguiente:

$$v_0(t) = \frac{V_{pp}}{2} + \sum_{n, \text{impar}} \left(\frac{4V_{pp}}{n\pi} \right) \text{sen}(n\omega_0 t) \quad [\text{Ec. 7}]$$

Tri. teórica	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia				
Amplitud(V)				

2. Calcular el valor de amplitud y frecuencia del primer, tercer y quinto armónico, además de la componente en continua de una onda triangular de 5 Vpp, una tensión de offset de 2.5V y que tiene una frecuencia de 1KHz.

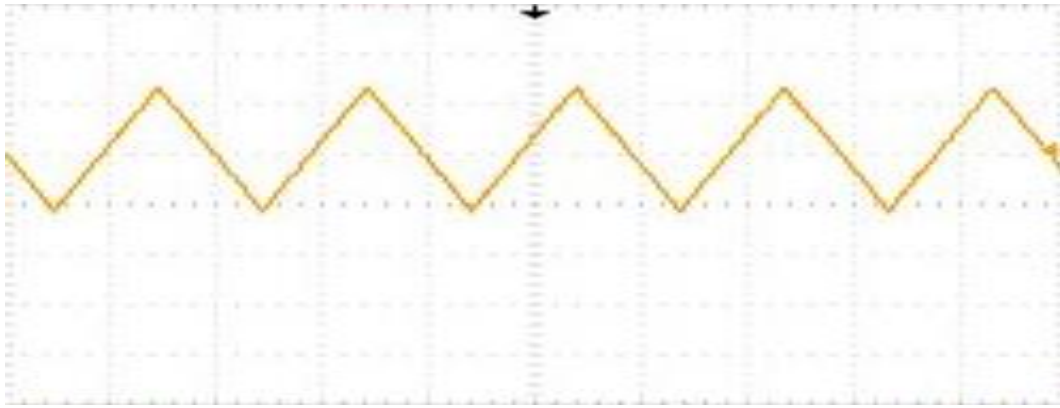


Figura 31. Onda triangular

Tri. teórica	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia				
Amplitud(V)				

8.1.3. Simulaciones

Las simulaciones se realizan en OrCad Pspice donde se tendrán que usar diferentes fuentes de alimentación para obtener las formas de onda cuadrada y triangular.

8.1.3.1. Onda senoidal pura

Simule una onda senoidal de 10 V de pico a pico y 1 KHz y analice sus componentes armónicas con la representación del análisis FFT y generando el documento .out. ¿Qué sucede? Explíquelo brevemente.

Notas:

Para generar el archivo .out se ha de proceder de la siguiente manera.

Nos desplazamos hacia el menú de la simulación y hacemos click en Output File Options. Se abrirá una ventana y seleccionamos la opción Perform Fourier Analysis. Rellenamos los apartados que nos piden como se pueden observar en la figura 9.

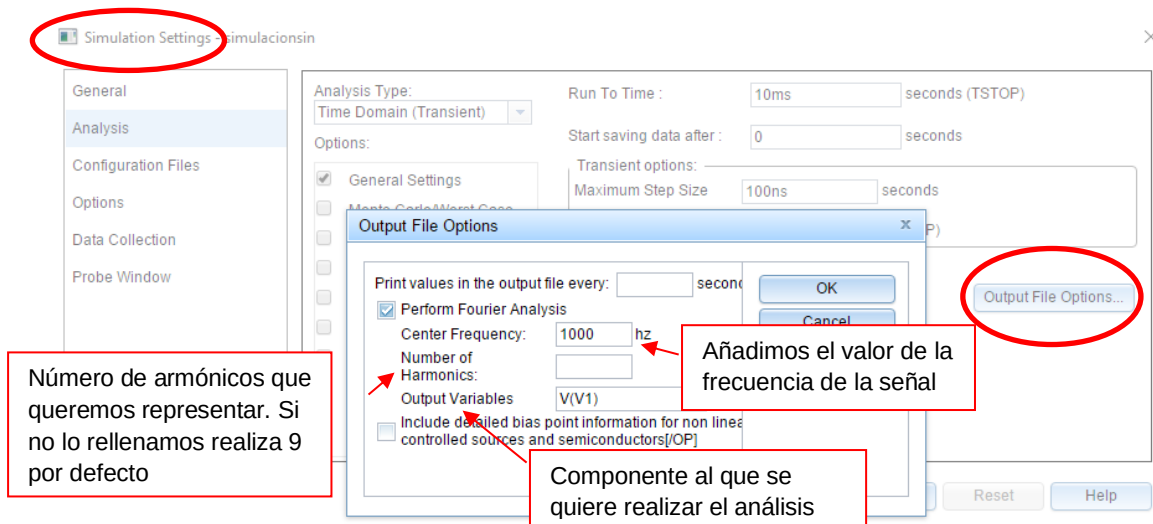


Figura 32. Generación del archivo .out

Una vez realizados todos los ajustes de la simulación, iniciamos la simulación y nos desplazamos a la pestaña **PSpice** y seleccionamos la opción **View Output File**. Nos aparecerá una ventana nueva y nos desplazamos hasta que veamos lo siguiente.

```
FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(V1)

DC COMPONENT = 2.4802E+00

HARMONIC    FREQUENCY    FOURIER    NORMALIZED    PHASE    NORMALIZED
  NO          (HZ)      COMPONENT COMPONENT    (DEG)     PHASE (DEG)
  1    1.0000E+03    3.1831E+00    1.0000E+00   -7.1287E-01    0.0000E+00
  2    2.0000E+03    3.9635E-02    1.2452E-02   -9.2227E+01   -9.0801E+01
  3    3.0000E+03    1.0610E+00    3.3332E-01   -2.1391E+00   -5.0833E-04
  4    4.0000E+03    3.9724E-02    1.2480E-02   -9.4451E+01   -9.1600E+01
  5    5.0000E+03    6.3657E-01    1.9998E-01   -3.5669E+00   -2.5314E-03
  6    6.0000E+03    3.9874E-02    1.2527E-02   -9.6671E+01   -9.2394E+01
  7    7.0000E+03    4.5466E-01    1.4284E-01   -4.9972E+00   -7.0553E-03
  8    8.0000E+03    4.0085E-02    1.2593E-02   -9.8885E+01   -9.3182E+01
  9    9.0000E+03    3.5359E-01    1.1108E-01   -6.4309E+00   -1.5055E-02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 4.2950E+01 PERCENT
```

Figura 33. Descomposición armónica en Output File

Solución:**8.1.3.2. Onda triangular con componente continua**

Simule una onda triangular de 5 V de pico a pico, componente DC de 2.5 V y 1 KHz, analice sus componentes armónicas con la representación de Fourier gráficamente a través del análisis FFT mediante PROBE y obtenga los valores del archivo .OUT. Compare el análisis con el de la señal senoidal y explique brevemente que sucede.

Notas:

Para generar una forma de onda triangular, se realiza con la fuente **VPULSE**. Podemos modificar los parámetros de esta fuente de dos formas diferentes:

- La primera consiste en, en la misma fuente ir modificando los parámetros **V1** y **V2** que serán los valores de tensión alto y bajo respectivamente, **TD** es el retraso desde que se empieza el pulso, **TR** y **TF** son los tiempos de subida y bajada respectivamente, **PW** es el ancho del pulso y **PER** es el periodo del pulso.

. ▪ La segunda consiste en seleccionar la fuente una vez añadida al schematic y nos desplazamos hacia la ventana superior **edit** y seleccionamos **Edit Source Component**. Esta forma es mucho más intuitiva de rellenar los campos de la fuente.

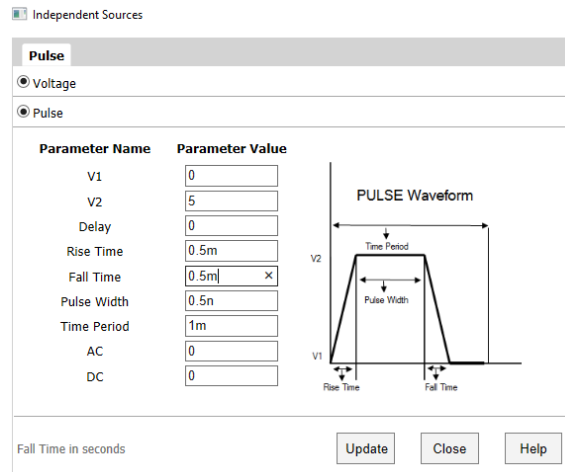


Figura 34. Utilidad Edit source component para la modificación de parámetros de una onda

Solución:

8.1.3.3. Onda cuadrada con componente continua

Simule una onda cuadrada de 5 V de pico a pico, componente DC de 2.5 V y 1 KHz, analice sus componentes armónicas con la representación de Fourier gráficamente a través del análisis FFT mediante PROBE y obtenga los valores del archivo .OUT. Compare el análisis con el de las anteriores y explique brevemente que sucede.

Solución:**8.1.3.4. Onda cuadrada a través de las componentes armónicas**

Sabiendo que una onda periódica cualquiera que no tenga carácter senoidal, se traduce como la suma de diferentes ondas senoidales. Conocido esto:

1. Muestre el circuito equivalente para que genere una onda cuadrada de 5 V de pico, componente DC 2.5 V y frecuencia 1KHz.
2. Represente la señal cuadrada como suma de las componentes armónicas 1, 3 y 5.

Solución:**8.1.3.5. Sobre los archivos .CIR**

Antes de continuar, vamos a explicar brevemente algunos datos de interés a la hora de ejecutar archivos de simulación .CIR que nos serán de utilidad para las simulaciones que vamos a continuar realizando.

La estructura que sigue este tipo de ficheros es la siguiente:

```

Título
  Descripción del circuito
    Fuentes de tensión/corriente
    Componentes
    Modelos } Usualmente almacenados en
              } librerías de extensión .lib

  Análisis requerido
  Resultados requeridos

.END

```

Figura 35. Estructura archivo .CIR [9]

Antes de continuar, vamos a explicar en que consiste la declaración **.PARAM** . Esta declaración consiste en asignar un valor a una variable como en el ejemplo que se va a mostrar a continuación:

.PARAM FREQ = 60.0 Hz

Entonces si, por ejemplo, en el apartado que contenga la frecuencia de una señal senoidal, introducimos la variable FREQ, automáticamente cogerá el valor correspondiente a esa variable.

En fuentes de tensión/corriente, se añaden las fuentes de excitación que se vayan a usar en el circuito. Por ejemplo, si añadimos una señal PULSE será así:

PULSE (I1, I2, td, tr, tf, pw, per)

- **I1, I2** : Corresponden al valor inicial de tensión o intensidad (dependiendo del tipo de fuente que tengamos) y al valor final (I2).
- **td**: retardo de la función
- **tr**: tiempo de subida
- **tf**: tiempo de bajada
- **pw**: ancho de pulso
- **per**: periodo

Siempre que vayamos a incluir un componente o una fuente de excitación en un circuito .CIR, hemos de tener en cuenta los nodos entre los que se vayan a situar, por lo tanto, la sintaxis será la siguiente:

R1 1 2 1k siendo 1 2 los nudos entre los que se situarán.

A continuación, vamos a explicar brevemente los análisis requeridos para esta práctica y que han de conocer. Se tratan de los análisis .TRAN .FOUR :

.TRAN:

Este comando es usado para realizar en el circuito un análisis transitorio especificando el tiempo que queremos que se ejecute el mismo. Este análisis calcula el comportamiento de un circuito a través del tiempo [6]. La sintaxis es la siguiente:

.TRAN [Valor máximo de paso] [tiempo de simulación] [Valor a partir del cual se empiezan a guardar datos] [paso de tiempo mínimo para cálculos de simulación]

.FOUR:

Este comando transformara los datos obtenidos en el análisis transitorio a componentes de Fourier. En este caso, el tiempo de simulación (al transformar los datos del análisis transitorio) será el mismo que el tiempo de simulación del análisis anteriormente mencionado [6]. La sintaxis será la siguiente:

.FOUR [valor de frecuencia] [magnitud a representar]

Para finalizar, vamos a explicar en qué consiste el comando .PROBE que no es más que un comando que hará que se muestren valores de tensión, intensidad etc para poder representarse una vez se simule el documento. Vamos a mostrar unos ejemplos:

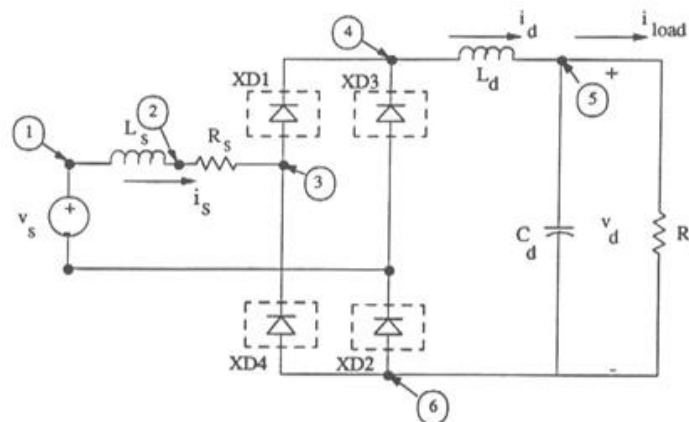
.PROBE V(3) V(3,2)

Cuando solo tengamos un valor (para este caso) se mostrará el valor de la tensión en ese nodo. En el caso de que tengamos dos valores, será el valor entre esos dos nodos.

8.1.3.6. Carga no lineal, rectificador monofásico de onda completa con filtro LC

Ejecute el archivo DBRECT1.CIR y obtenga lo que se pide a continuación:

1. Represente la tensión e intensidad que suministra el generador (VS)
2. Represente la tensión que entrega a la carga (5-6)
3. Obtenga el análisis de Fourier a partir del archivo .OUT de el archivo de las bobinas y el diodo D1.
4. Una vez se han obtenido los resultados del fichero DBRECT1.OUT, calcule el factor de potencia de entrada y el factor de desplazamiento. Una vez obtenido los resultados anteriores, exprese la intensidad que suministra la fuente en función de la descomposición armónica. ¿Cómo es el factor de potencia? ¿Qué nos indica?
5. Por último, Una vez ha realizado y obtenido el análisis de Fourier, ejecute el archivo DBRECT1A.CIR y obtenga la intensidad del generador como la suma del fundamental y de los dos primeros armónicos (3 y 5). Represente la suma y cada una de las componentes.



The initial voltage across C_d equals 160 V.

Figura 36. Rectificador monofásico de onda completa con filtro LC [4]

```

* Single-Phase, Diode-Bridge Rectifier
* Power Electronics: Simulation, Analysis & Education.....by N. Mohan.
.LIB PWR_ELEC.LIB
.PARAM FREQ = 60.0Hz
*
LS 1 2 1mH
RS 2 3 1m
*
LD 4 5 1uH
RLOAD 5 6 20.0
CD 5 6 1000uF IC=160V
*
XD1 3 4 DIODE_WITH_SNUB
XD3 0 4 DIODE_WITH_SNUB
XD2 6 0 DIODE_WITH_SNUB
XD4 6 3 DIODE_WITH_SNUB
*
VS 1 0 SIN(0 170V {FREQ} 0 0 0)
*
.TRAN 50us 50ms 0s 50us UIC
.PROBE v(VS) i(VS) v(5,6)
.FOUR 60.0 i(LS) i(LD) i(XD1.DX)
.END

```

Solución:**8.1.3.7. Análisis de armónicos en la línea neutro de un sistema trifásico**

Ejecute el análisis de un sistema trifásico *NEUTCURR.CIR*, y obtenga lo que se pide a continuación:

1. Represente las corrientes de línea, así como la corriente que circula en el neutro.
2. Represente también las tensiones de fase indicando la frecuencia de operación de las mismas. ¿Se encuentran equilibradas las fases?

¿Cómo ha de ser la corriente por el neutro? ¿Debe de ser nula? ¿Qué es lo que ocurre? Compare el valor de la corriente con su valor teórico. Comente los resultados obtenidos.

PSpice Circuit:

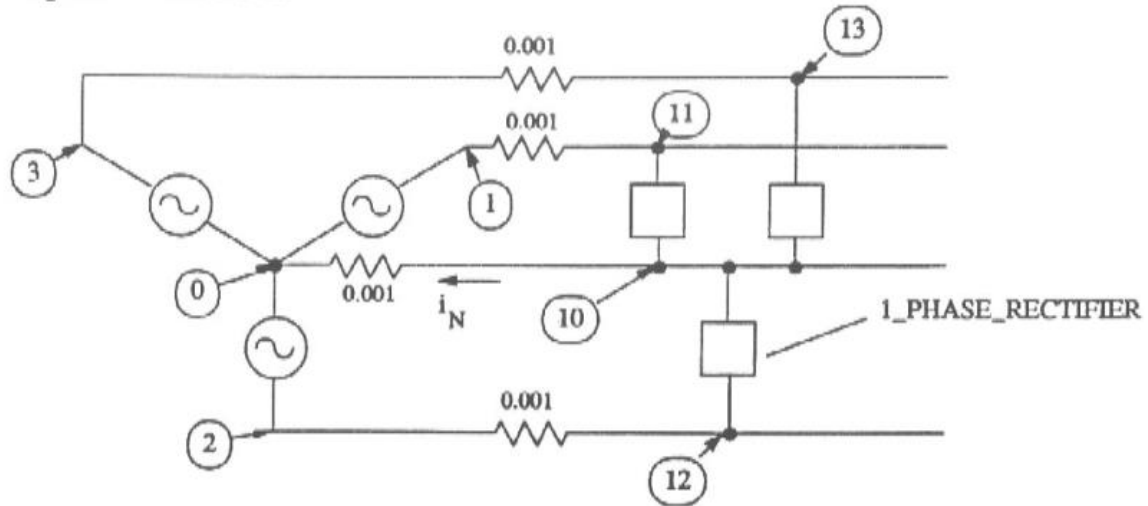


Figura 37.Circuito equivalente NEUTCURR.CIR [4]

NEUTCURR.CIR

* Neutral Current in a 3-Phase, 4-Wire Distribution System

* Power Electronics: Simulation, Analysis & Education.....by N. Mohan.

.PARAM FREQ = 60.0

*

RNEUT 10 0 1m

*

RMEASA 1 11 1m

RMEASB 2 12 1m

RMEASC 3 13 1m

*

XRECTA 11 10 1_PHASE_RECTIFIER PARAMS: IC_CAP = 160V
LOAD_RES = 20

XRECTB 12 10 1_PHASE_RECTIFIER PARAMS: IC_CAP = 140V
LOAD_RES = 20

XRECTC 13 10 1_PHASE_RECTIFIER PARAMS: IC_CAP = 180V
LOAD_RES = 20

*

VSA 1 0 SIN(0 170 {FREQ} 0 0 0)

VSB 2 0 SIN(0 170 {FREQ} 0 0 -120)

VSC 3 0 SIN(0 170 {FREQ} 0 0 -240)

*

.TRAN 50us 30ms 0s 50us UIC

.PROBE i(RNEUT) i(RMEASA) i(RMEASB) i(RMEASC) v(1) v(2) v(3)

*

*

```

.SUBCKT 1_PHASE_RECTIFIER 101 100 PARAMS: IC_CAP = 150V
LOAD_RES = 20
*
LS 101 102 1mH
RS 102 103 10m
LD 104 105 1uH
RLOAD 105 106 {LOAD_RES}
CD 105 106 1000u IC={IC_CAP}
RSNUB1 104 115 1k
RSNUB3 104 125 1k
RSNUB2 100 126 1k
RSNUB4 103 116 1k
CSNUB1 115 103 0.1uF
CSNUB3 125 100 0.1uF
CSNUB2 126 106 0.1uF
CSNUB4 116 106 0.1uF
D1 103 104 POWER_DIODE
D3 100 104 POWER_DIODE
D2 106 100 POWER_DIODE
D4 106 103 POWER_DIODE
.MODEL POWER_DIODE D(RS=0.01, CJO=100pF)
.ENDS
*
.END

```

Solución:**8.1.4. Método operativo**

Para generar las formas de ondas, solo será necesario conectar las sondas del osciloscopio a las del generador de funciones, seleccionando en este último el tipo de onda con las características que se pedirán a continuación. Es necesario tener cuidado con la polaridad de las sondas ya que se podría invertir la forma de onda.

A continuación, se va a proceder a realizar una breve explicación de cómo se ha de proceder para el correcto uso de la función FFT en el osciloscopio.

Representación del espectro (FFT) usando el osciloscopio digital TPS2012B

Usando la transformación FFT se puede convertir la señal del dominio del tiempo (YT), a sus componentes en el dominio de la frecuencia (componentes espectrales).

Para utilizar la FFT es necesario llevar a cabo las siguientes tareas:

- Configurar la forma de onda de la señal en el dominio del tiempo.
- Pulsar el botón **MATH** para acceder a FFT.
- Seleccionar el canal al que se quiere aplicar.
- Seleccionar el tipo de ventana (Hanning, Flattop o Rectangular) eligiendo cual se adapta mejor al tipo de onda que estamos representando.
- Ajustar la velocidad de muestreo (Como mínimo frecuencia máxima de la señal = velocidad de muestreo dividido entre dos para evitar “aliasing”). Se elige con el mando de SEC/DIV.
- Se puede usar FFT zoom para magnificar el espectro en la zona central y así tener una visión mucho más definida.
- Se pueden usar los cursores para medir el espectro

Configurar la forma de onda en el dominio del tiempo YT.

- Pulsar **AUTOCONFIGURAR(AUTOSET)** para mostrar la forma de onda YT.
- Girar el mando POSICIÓN VERTICAL para centrarla verticalmente (cero divisiones).
- Girar el mando POSICIÓN HORIZONTAL hasta situar la parte de la onda que desea analizar en las 8 divisiones centrales de la pantalla.
- Girar el mando VOLTS/DIV para garantizar que toda la forma de onda queda en pantalla.
- Girar el mando SEC/DIV para proporcionar la resolución que desee al espectro.
- (Tener en cuenta que a frecuencias de muestreo más rápidas se reduce las posibilidades de representaciones falsas de la señal pero a costa de perder resolución)

Mostrar la FFT

- Pulsar el botón de **MATH**.
- Establecer la opción fuente en FFT.
- Seleccionar el canal fuente de la FFT (CH1 o CH2).

8.1.4.1. Onda senoidal pura

Configurar el generador de funciones en modo senoidal y representar con él una onda de 1 V de valor eficaz y 50Hz.

- 1. Represente la señal medida**
- 2. A través de la herramienta matemática FFT, represente el espectro de frecuencias resultante**
- 3. Con ayuda de los cursores, mida los armónicos 1, 3 y 5.**

Solución:

8.1.4.2. Onda triangular con componente continua

Configurar el generador de funciones en modo triangular y representar con él una onda de 5V de pico a pico, 1KHz y 2.5 V de componente continua.

- 1. Represente la señal medida**
- 2. A través de la herramienta matemática FFT, represente el espectro de frecuencias resultante**
- 3. Con ayuda de los cursores, mida los armónicos 1, 3 y 5 así como su componente continua.**

Solución:

8.1.4.3. Onda cuadrada con componente continua

Configurar el generador de funciones en modo de onda cuadrada y representar con él una onda de 5V pico a pico, una frecuencia de 1KHz y una componente continua de 2.5 V.

1. Represente la señal medida
2. A través de la herramienta matemática FFT, represente el espectro de frecuencias resultante
3. Con ayuda de los cursores, mida los armónicos 1, 3 y 5 así como su componente continua.

Solución:**8.1.4.4. Análisis espectral y criterio de Nyquist**

Ahora que ya conocemos FFT debemos saber que al ser una aproximación matemática debemos tener cuidado con la frecuencia de muestreo del osciloscopio ya que nos podría llevar a la visualización de armónicos “alias” si la frecuencia de muestreo se encuentra por debajo de la mitad de la frecuencia de Nyquist.

El análisis espectral por el método FFT se realiza en el osciloscopio a partir de los 2048 puntos centrales que se representan en el display de manera que al representar puntos situados muy cercanos entre si disminuye la frecuencia de muestreo del osciloscopio de manera notable produciendo la aparición de armónicos en el modo FFT que, realmente, no están en la frecuencia donde se presentan. Esos “ecos” de armónicos de otras frecuencias, representados cerca de armónicos que sí son reales, son llamados “alias”.

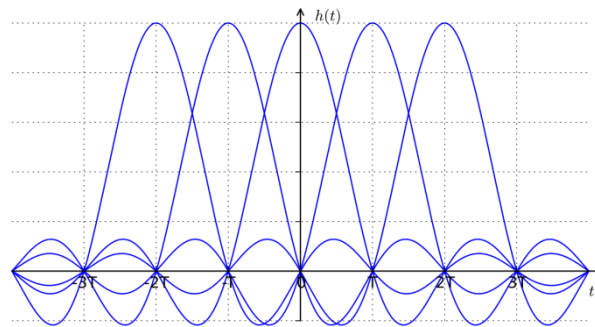


Figura 38

Para visualizar esto en el osciloscopio usamos la misma onda cuadrada de antes pero con una frecuencia de 50kHz y ponemos el osciloscopio con el mando de tiempo antes de efectuar el método FFT en un valor 5kHz de frecuencia de muestreo. Una vez hecho representar el 5º armónico en 250kHz para ver los “alias”. Representarlo en oscilograma de manera **aproximada**.

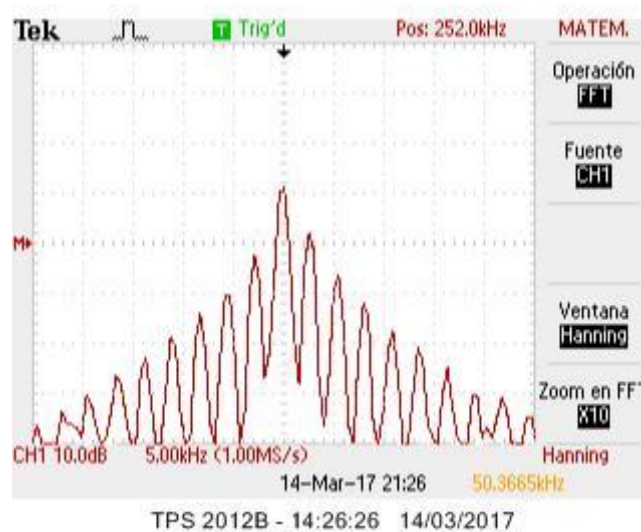


Figura 39. Representación de los alias por no cumplir el criterio de Nyquist [11]

Como se puede ver en la figura 20 hay muchos picos que podrían confundirse como armónicos cerca de 150kHz pero solo son ecos de otros armónicos situados en otras frecuencias, para evitar esta distorsión es importante mantener el valor de la frecuencia de muestreo en valores altos siempre que se pueda

8.1.5. Resultados finales

Comparar los datos teóricos, simulados y experimentales. Incluir las comparativas con las imágenes de la simulación en el informe de prácticas.

8.1.5.1. Comparativa de valores obtenidos de la onda triangular

Tri. teórica	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia				
Amplitud(V)				

Tri. simulada	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia				
Amplitud				

Tri. empírica	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia				
Amplitud				

8.1.5.2. Comparativa de valores obtenidos de la onda cuadrada

Cuad. teórica	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia				
Amplitud(V)				

Cuad. simu	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia				
Amplitud				

Cuad. empírica	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia				
Amplitud				

8.2. Armónicos y función FFT. Análisis teórico, simulación y análisis experimental. Guion para el profesor.

8.2.1. Objeto de la práctica

Los objetivos de la práctica se pueden resumir en:

3. Entender la importancia de la presencia de armónicos en una señal y la necesidad de medirlos.
4. Comprender la función de FFT y su utilidad dentro del osciloscopio y como herramienta de análisis en las simulaciones.

Los resultados esperados del aprendizaje serán:

4. Analizar componentes armónicas de diferentes formas de onda usando el osciloscopio.
5. Generar diferentes formas de onda y obtener los resultados del análisis espectral de las mismas.
6. Usar la función de FFT en OrCad Pspice.

8.2.1.1. Introducción y Fundamentos teóricos

8.2.1.1.1. Armónicos

En esta práctica se van a utilizar conceptos sobre armónicos y su análisis en espectro mediante el método de FFT.

Joseph Fourier demostró que cualquier forma de onda periódica se puede expresar como la suma de diferentes ondas de forma senoidal, este hecho nos permite representar las formas de onda que estudiemos en un espectro en el cual podríamos expresar nuestra forma de onda estudiada como una serie de senoides oscilando a una frecuencia múltiplo de la conocida como **fundamental** y amplitud concreta, de manera que a más frecuencia tengan estas senoides menor será su amplitud avanzando en múltiplos de números enteros de manera que 1º armónico tiene una frecuencia y amplitud fundamental, 2º armónico el doble que el primero en frecuencia y la mitad en amplitud, 3º armónico el triple que el primero en frecuencia y tres veces menos de amplitud y sucesivamente.

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + b_n \sen(n\omega_0 t) \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde los coeficientes a_0 , a_n y b_n se calculan de la siguiente manera:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad [\text{Ec. 2}]$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega_0 t) dt \quad [\text{Ec. 3}]$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sen(n\omega_0 t) dt \quad [\text{Ec. 4}]$$

En la forma de onda que sea de naturaleza senoidal, tendrán una importancia mayor los primeros armónicos sin embargo en forma que no se parezcan nos encontraremos con armónicos de orden superior de valores significativos.

Al aplicar una señal de tensión senoidal a una carga no lineal, esta puede llegar a deformar la señal de alimentación al introducirle armónicos no deseados. Para medir esta distorsión existe el coeficiente de **Distorsión Armónica Total** o las siglas en ingles **THD** que indica precisamente la dependencia de una forma de onda estudiada de los armónicos de orden superior con respecto al fundamental.

8.2.1.1.2. Análisis y medición de armónicos por FFT

El análisis y medición de armónicos en laboratorio se lleva a cabo normalmente mediante un analizador de armónicos, pero al ser costosos y no disponer de suficientes para la realización de la práctica, se harán las mediciones mediante el uso de osciloscopios que tienen una función especial matemática para el análisis de

formas de onda y su descomposición en armónicos, mediante un método llamado **Transformada Rápida de Fourier** o con sus siglas en inglés **FFT**.

El análisis FTT consiste en una forma más rápida de realizar un análisis de Fourier discreto. Esto se consigue reduciendo el número de computaciones que se han de realizar a la hora de conseguir los datos que arrojan una transformada de Fourier discreta. Una cosa que hemos de tener en cuenta es que esta forma de calcular las componentes armónicas de una señal no es más que un algoritmo para el cálculo de la transformada de Fourier [9].

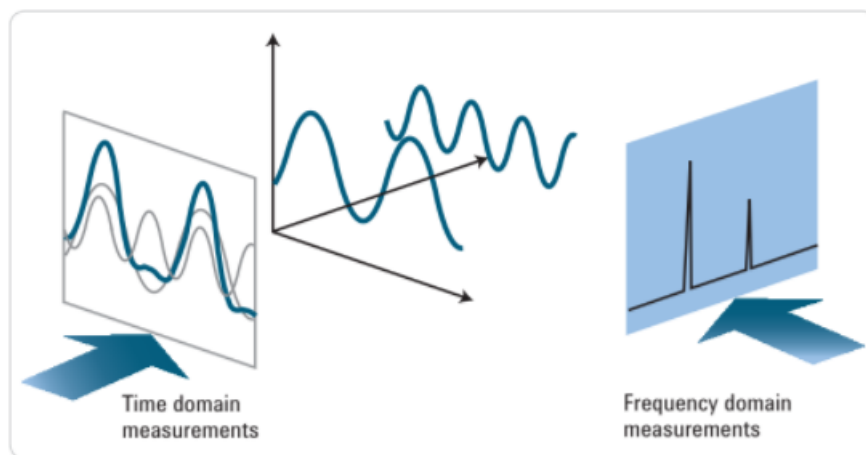


Figure 1-2. Relationship between time and frequency domain

Figura 40. Relación entre el dominio de la frecuencia y el tiempo []

FFT es un algoritmo matemático que realiza una transformada de Fourier de una señal usando 2^N valores para representar de forma eficaz, utilizando pocas instrucciones y ciclos de máquina, una aproximación razonable de la transformada. El mayor problema que presenta este algoritmo es que, al igual que la transformada de Fourier completa, supone que la señal a la que se aplica es completamente periódica, provocando problemas de discontinuidad y haciendo necesario el uso de ventanas para evitar problemas de falsos armónicos en la señal. Además, el uso de un rango para detectar estos armónicos hace al método susceptible a perder resolución a costa de representar márgenes de frecuencia grandes o a presentar armónicos inexistentes debido a no cumplir el criterio de Nyquist [4].

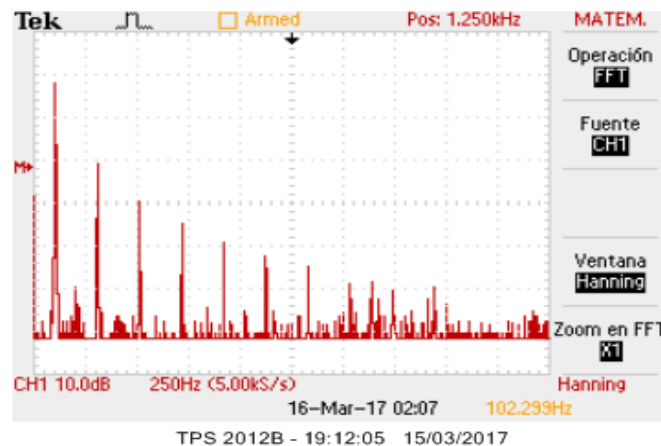


Figura 41. Ejemplo de visualización de FFT en el osciloscopio

El problema que provocan las FFT es que pueden generar discontinuidades al suponer que la onda a estudiar es completamente periódica, lo que puede generar discontinuidades y falsos armónicos.

Las ventanas son funciones matemáticas periódicas que se aplican a los datos de la señal de manera que alisen las discontinuidades producidas en la adquisición, cada ventana tiene unas características que afectaran a la resolución en amplitud o en frecuencia haciendo que cada ventana tenga una utilidad específica. En la figura 3 se puede observar un ejemplo de lo que sería la aplicación de FFT con ventana en los datos adquiridos por el osciloscopio [2].

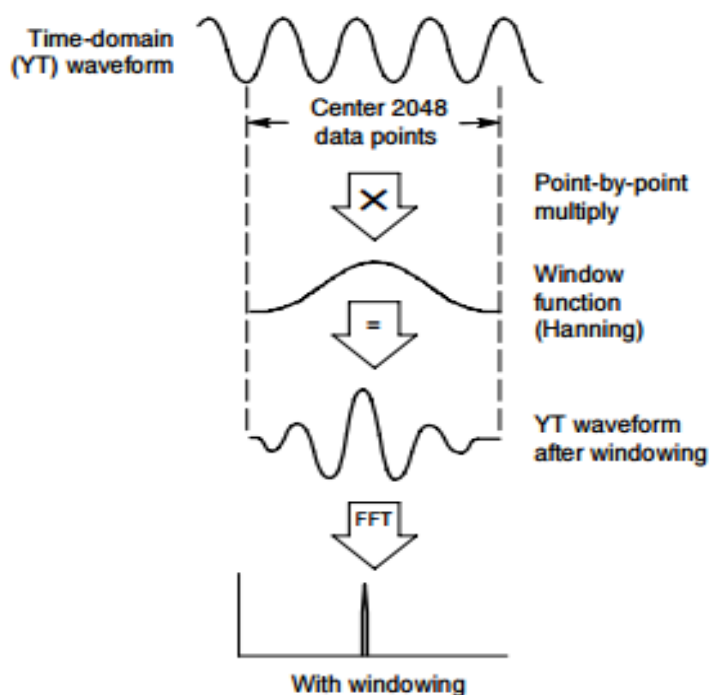


Figura 42. Proceso de aplicación de ventana [9]

Los osciloscopios **Tektronix TPS 2012B** que tenemos en el laboratorio tienen 3 tipos distintos de ventanas aplicables al canal elegido: Hanning, Flat-top y rectangular. En la figura 4 se puede apreciar cómo funcionan cada una de las ventanas.

Ventana	Medidas	Características
Hanning	Formas de onda periódicas	Mejor frecuencia y peor precisión en la amplitud que Flattop
Flattop	Formas de onda periódicas	Mejor amplitud y peor precisión en la frecuencia que Hanning
Rectangular	Pulsos o señales transitorias	Ventana específica para formas de onda que no presentan discontinuidades; en esencia es lo mismo que la falta de una ventana

Figura 43. Diferentes tipos de ventana en TEKTRONIK TPS 2012B [9]

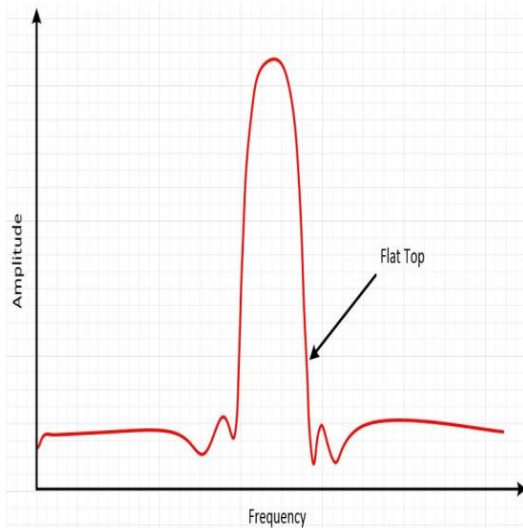


Figura 45. Ventana Flattop

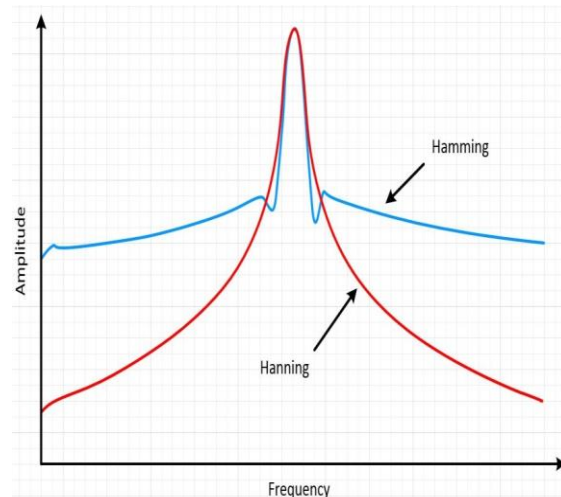


Figura 44. Ventana Hanning y Hamming

En resumen, las ventanas son funciones matemáticas con el objetivo de minimizar la fuga espectral producida por discontinuidades en el número no entero original de periodos en una señal reduciendo la amplitud de las discontinuidades en los límites de cada secuencia finita adquirida por el digitalizador del osciloscopio. En general la ventana Hanning es satisfactoria para el 95% de los casos ya que tiene buena resolución de frecuencia y una baja fuga espectral [5].

Una vez aplicada la ventana y corregido el problema de discontinuidad, a la forma de onda se le aplica el algoritmo FFT y el resultado es una aproximación bastante veraz en frecuencia y amplitud del espectro armónico de la señal en el dominio de la frecuencia.

Esta representación del espectro armónico consta de 2048 puntos de los cuales solo se representan 1024 en la pantalla sin hacer zoom. Para la observación del espectro en frecuencias puntuales o en armónicos de gran importancia podemos hacer hasta un zoom de x10. El osciloscopio Tektronix TPS 2012B representa la amplitud en el modo FFT en decibelios siendo **0 dBs igual a 1V eficaz** [2].

Para la conversión de medidas absolutas a dBs se usa la siguiente formula:

$$dB = 20 \log \left(\frac{V_{RMS}}{1V_{RMS}} \right) \quad [Ec. 5]$$

8.2.2. Análisis teórico

Para los cálculos teóricos de esta práctica se requiere de la ecuación de Fourier de una onda triangular y la de una onda cuadrada.

La descomposición de Fourier de una onda triangular es la siguiente:

$$v_0(t) = \frac{V_p}{2} + \sum_{n, \text{impar}} \left(\frac{-4V_H}{(n\pi)^2} \right) \cos(n\omega_0 t) \quad [\text{Ec.6}]$$

Donde V_p es el valor de pico de nuestra forma de onda generada.

3. Calcular el valor de amplitud y frecuencia del primer, tercer y quinto armónico, además de la componente en continua de una onda cuadrada de 5 Vpp, una tensión de offset de 2.5V y que tiene una frecuencia de 1KHz.

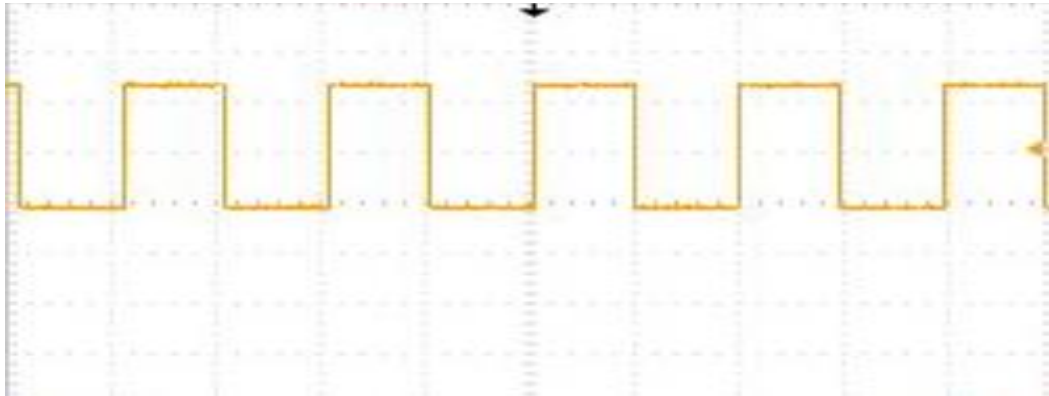


Figura 46. Onda cuadrada

La descomposición de Fourier de una onda cuadrada es la siguiente:

$$v_0(t) = \frac{V_{pp}}{2} + \sum_{n, \text{impar}} \left(\frac{4V_{pp}}{n\pi} \right) \sin(n\omega_0 t) \quad [\text{Ec. 7}]$$

Tri. teórica	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia	0Hz	1KHz	3KHz	5 KHz
Amplitud(V)	2.5V	3.183V	1.061V	0.637 V

1. Calcular el valor de amplitud y frecuencia del primer, tercer y quinto armónico, además de la componente en continua de una onda triangular de 5 Vpp, una tensión de offset de 2.5V y que tiene una frecuencia de 1KHz.

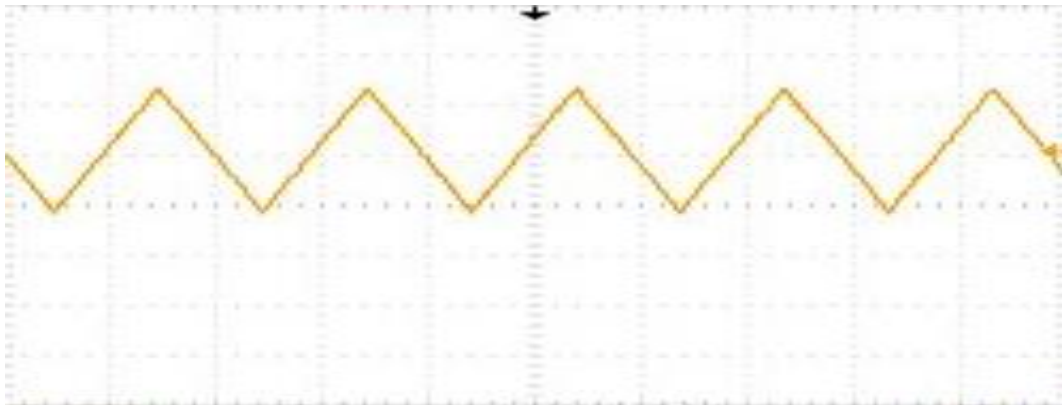


Figura 47. Onda triangular

Tri. teórica	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia	0Hz	1KHz	3KHz	5 KHz
Amplitud(V)	2.5V	2.026V	0.225V	0.081 V

8.2.3. Simulaciones

Las simulaciones se realizan en OrCad Pspice donde se tendrán que usar diferentes fuentes de alimentación para obtener las formas de onda cuadrada y triangular.

8.2.3.1. Onda senoidal pura

Simule una onda senoidal de 10 V de pico a pico y 1 KHz y analice sus componentes armónicas con la representación del análisis FFT y generando el documento .out. ¿Qué sucede? Explíquelo brevemente.

Notas:

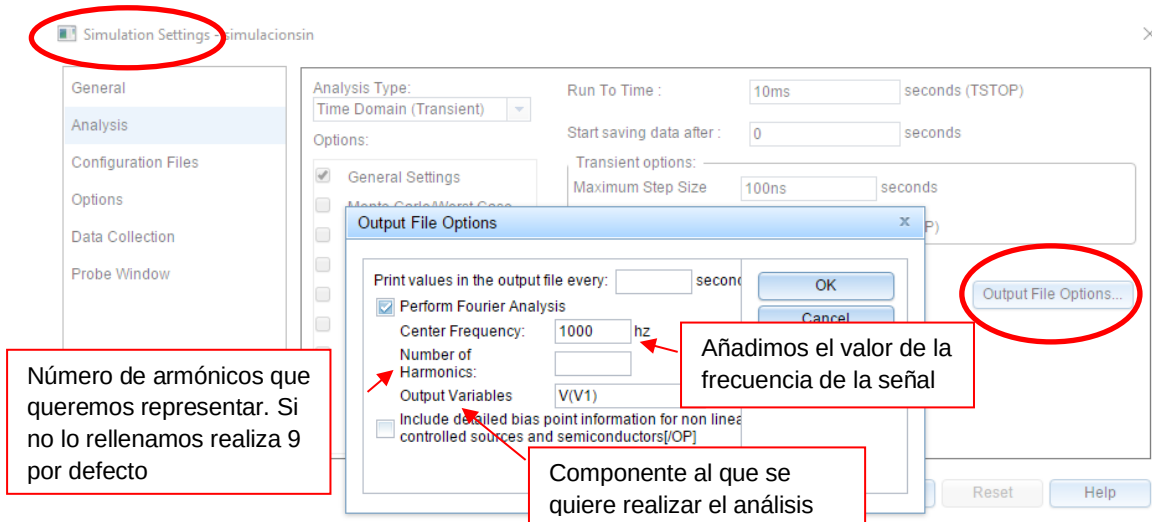


Figura 48. Generación de armónicos con Output File

Una vez realizados todos los ajustes de la simulación, iniciamos la simulación y nos desplazamos a la pestaña **PSpice** y seleccionamos la opción **View Output File**. Nos aparecerá una ventana nueva y nos desplazamos hasta que veamos lo siguiente.

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(V1)

DC COMPONENT = 2.4802E+00

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	1.0000E+03	3.1831E+00	1.0000E+00	-7.1287E-01	0.0000E+00
2	2.0000E+03	3.9635E-02	1.2452E-02	-9.2227E+01	-9.0801E+01
3	3.0000E+03	1.0610E+00	3.3332E-01	-2.1391E+00	-5.0833E-04
4	4.0000E+03	3.9724E-02	1.2480E-02	-9.4451E+01	-9.1600E+01
5	5.0000E+03	6.3657E-01	1.9998E-01	-3.5669E+00	-2.5314E-03
6	6.0000E+03	3.9874E-02	1.2527E-02	-9.6671E+01	-9.2394E+01
7	7.0000E+03	4.5466E-01	1.4284E-01	-4.9972E+00	-7.0553E-03
8	8.0000E+03	4.0085E-02	1.2593E-02	-9.8885E+01	-9.3182E+01
9	9.0000E+03	3.5359E-01	1.1108E-01	-6.4309E+00	-1.5055E-02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 4.2950E+01 PERCENT

Figura 49. Descomposición armónica en Output File

Solución:

La senoidal pura es fácil de representar en Orcad Capture dado que existe la fuente Vsin de la que se obtiene una senoidal pura directamente. Se debe conectar una resistencia y medir su tensión como se puede observar en la figura 1.

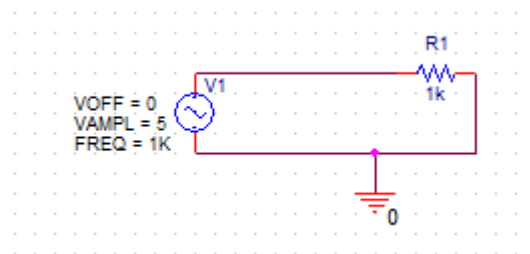


Figura 9. Circuito en Capture de una fuente de alimentación senoidal

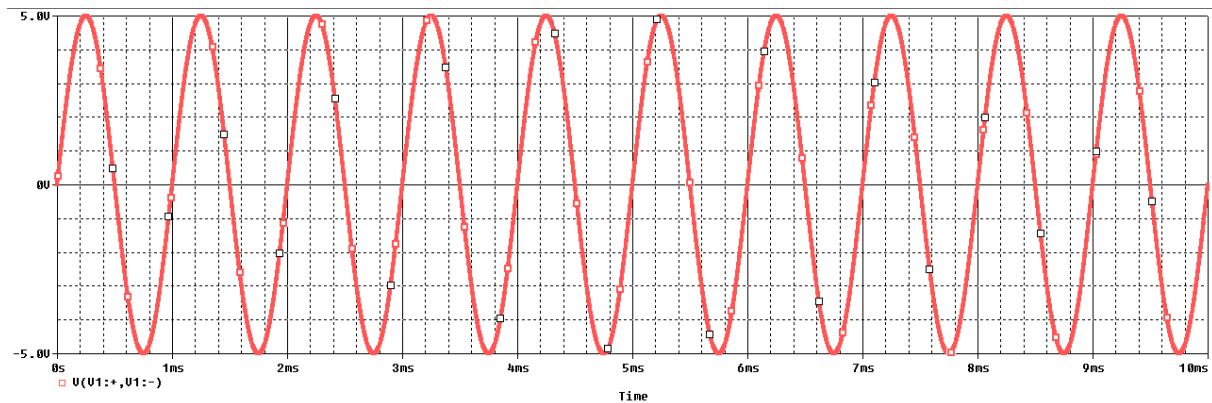


Figura 50. Onda senoidal generada en PSpice

Una vez se ha realizado la simulación de la onda senoidal, procedemos a hacer el análisis FFT y a analizar tanto la frecuencia como amplitud de los armónicos.

A continuación, se puede apreciar la descomposición armónica de la señal.

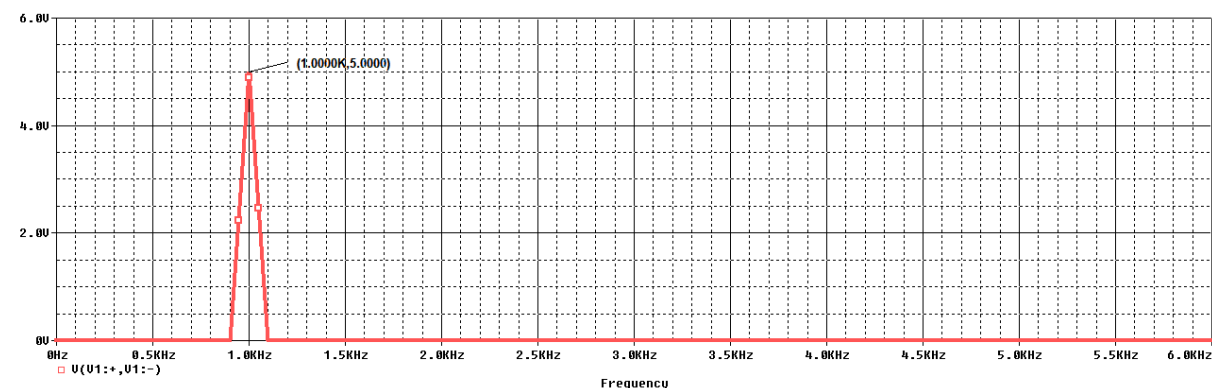


Figura 51. Analisis FFT aplicado a una senoide pura

Como podemos observar, solo se aprecia contenido armónico en la frecuencia fundamental (1KHz) y con una amplitud igual a la onda generada. Esto es debido a que la descomposición armónica de una señal consiste en descomponer una forma de onda en sus componentes senoidales. En este caso al tener una forma de onda senoidal, no habrá descomposición posible así que solo tendremos armónico en la fundamental de igual amplitud que la onda generada.

También se puede obtener la descomposición armónica de una señal generando el Output file de la siguiente manera:

Nos desplazamos hacia el menú de la simulación y hacemos click en Output File Options. Se abrirá una ventana y seleccionamos la opción Perform Fourier Analysis. Rellenamos los apartados que nos piden como se pueden observar en la figura 11.

8.2.3.2. Onda triangular con componente continua

Simule una onda triangular de 5 V de pico a pico, componente DC de 2.5 V y 1 KHz, analice sus componentes armónicas con la representación de Fourier gráficamente a través del análisis FFT mediante PROBE y obtenga los valores del archivo .OUT. Compare el análisis con el de la señal senoidal y explique brevemente que sucede.

Notas:

*Para generar una forma de onda triangular, se realiza con la fuente **VPULSE**. Podemos modificar los parámetros de esta fuente de dos formas diferentes:*

*• La primera consiste en, en la misma fuente ir modificando los parámetros **V1** y **V2** que serán los valores de tensión alto y bajo respectivamente, **TD** es el retraso desde que se empieza el pulso, **TR** y **TF** son los tiempos de subida y bajada respectivamente, **PW** es el ancho del pulso y **PER** es el periodo del pulso.*

*. • La segunda consiste en seleccionar la fuente una vez añadida al schematic y nos desplazamos hacia la ventana superior **edit** y seleccionamos **Edit Source Component**. Esta forma es mucho más intuitiva de rellenar los campos de la fuente.*

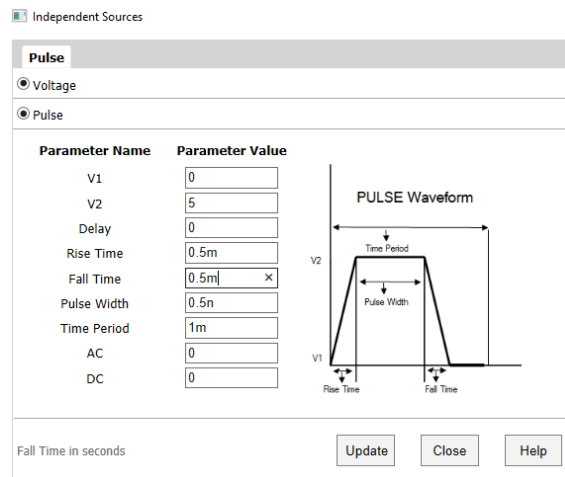


Figura 52. Utilidad Edit source component para la modificación de parámetros de una onda

Solución:

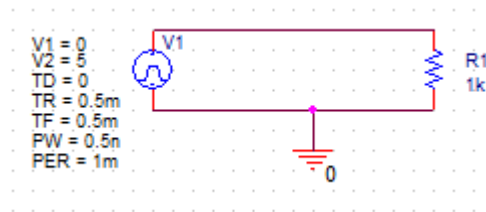


Figura 53. Circuito en Capture de una forma de onda triangular

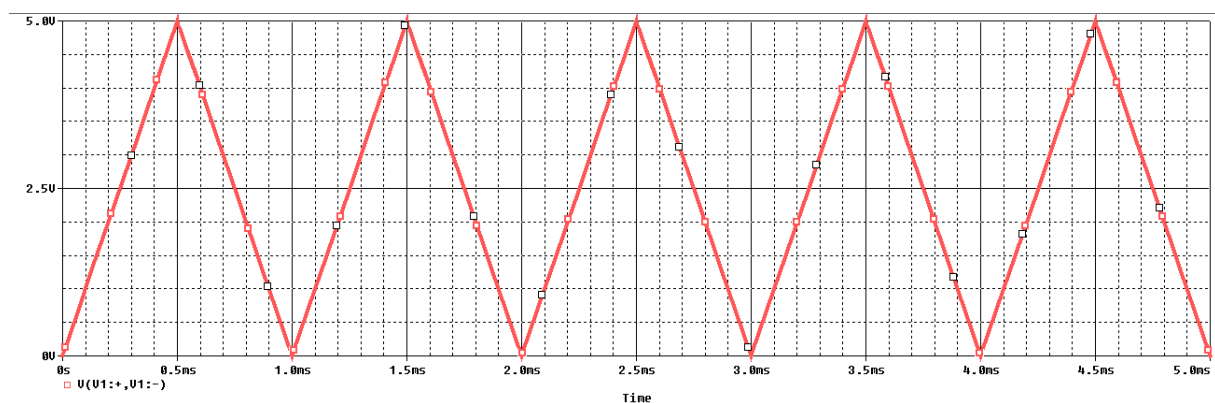


Figura 54. Onda triangular generada en PSpice

Obtener el valor de amplitud y frecuencia del primer, tercer armónico y quinto armónico, además de la componente en continua de la onda triangular.

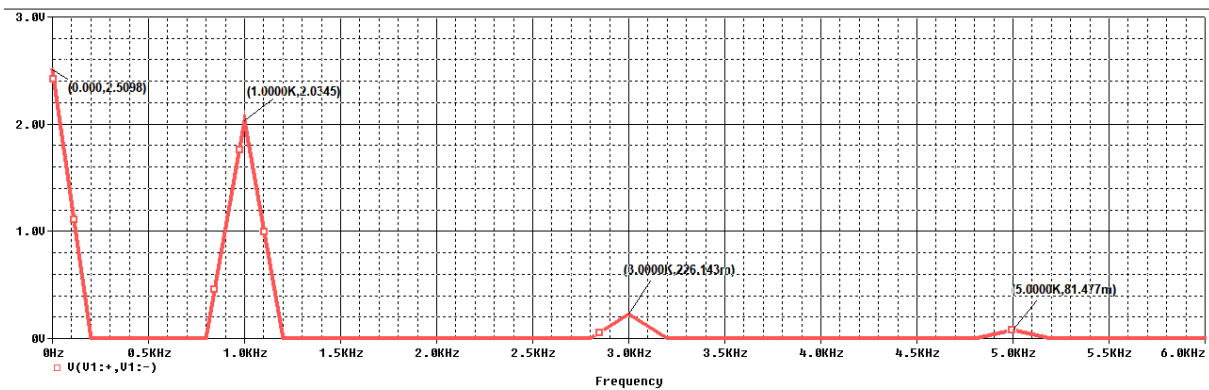


Figura 55. Análisis FFT de una onda triangular

Tri. simulada	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia	0Hz	1KHz	3KHz	5KHz
Amplitud	2.5098 V	2.0345V	226.143mV	81.477mV

A diferencia de la onda senoidal, la onda triangular ya no solo tendrá componente armónica en frecuencia fundamental, si no que para múltiplos impares también encontraremos componentes armónicas que irán decreciendo a medida que aumente la frecuencia. Esto se debe a que, como bien sabemos, una onda que no es de carácter senoidal, va a estar formada por multitud de ondas senoidales de distinta tensión y frecuencia, y la suma de todas estas componentes forma la onda requerida.

8.2.3.3. Onda cuadrada con componente continua

Simule una onda cuadrada de 5 V de pico a pico, componente DC de 2.5 V y 1 KHz, analice sus componentes armónicas con la representación de Fourier gráficamente a través del análisis FFT mediante PROBE y obtenga los valores del archivo .OUT. Compare el análisis con el de las anteriores y explique brevemente que sucede.

Solución:

La onda cuadrada se realiza con una fuente Vpulse como la descrita. Ajustar los parámetros para obtener la señal descrita en los cálculos teóricos correspondiente a la onda cuadrada y realizar las mismas mediciones en el simulador tal como se representa en la figura 18.

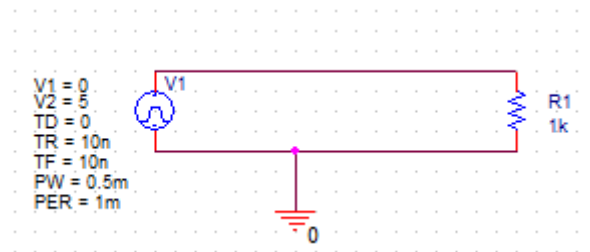


Figura 56. Circuito en Capture de una forma de onda cuadrada

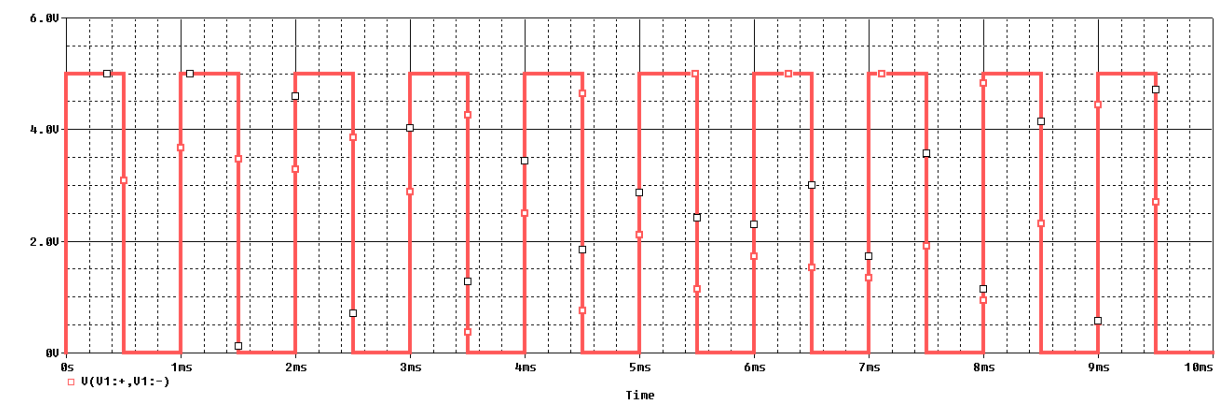


Figura 57. Onda cuadrada generada en PSpice

Obtener el valor de amplitud y frecuencia del primer, tercer y quinto armónico de la onda cuadrada generada.

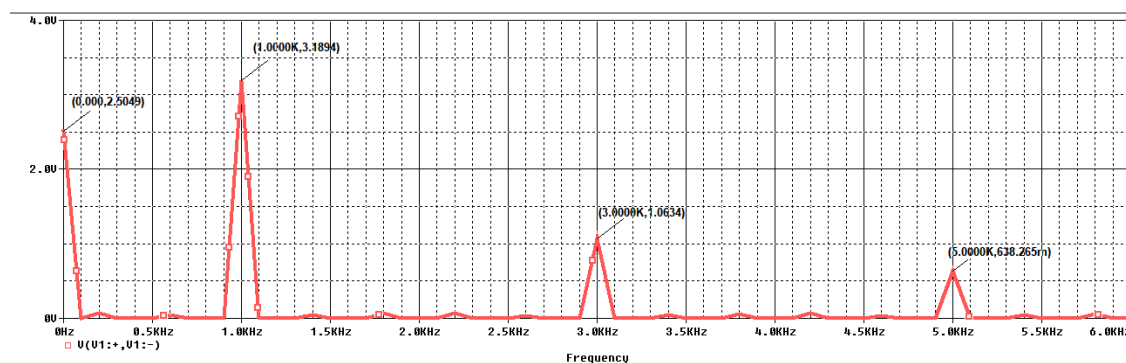


Figura 58. Análisis FFT de una onda cuadrada

Cuad.simu	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia	0 Hz	1KHz	3KHz	5KHz
Amplitud	2.5049 V	3.1894V	1.0634V	638.265 mV

En este caso sucederá igual que con la onda triangular, además de la componente fundamental, encontraremos qué para múltiplos impares de frecuencia, hallaremos componentes armónicas que irán decreciendo a medida que aumenta la frecuencia.

8.2.3.4. Onda cuadrada a través de las componentes armónicas

Sabiendo que una onda periódica cualquiera que no tenga carácter senoidal, se traduce como la suma de diferentes ondas senoidales. Conocido esto:

3. Muestre el circuito equivalente para que genere una onda cuadrada de 5 V de pico, componente DC 2.5 V y frecuencia 1KHz.
4. Represente la señal cuadrada como suma de las componentes armónicas 1, 3 y 5.

Solución:

A continuación, vamos a proceder a generar una onda cuadrada de 5 V con una componente continua de 2.5 V y una frecuencia de 1KHz a través de las componentes armónicas de una señal usando hasta el armónico número 5.

Lo primero que se ha de hacer es calcular las componentes armónicas de la onda cuadrada que se nos pide. En este caso, como coincide en valores con los de la

simulación anterior (Figura 20), escogemos los valores correspondientes a los armónicos 1,3,5 y componente continua.

Una vez se han recogido todos los datos necesarios, se procede con el montaje del siguiente circuito:

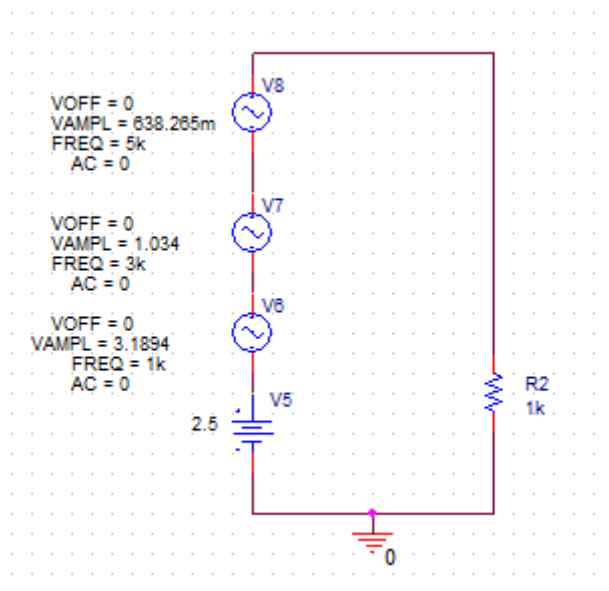


Figura 59. Circuito para generar onda cuadrada a partir de componentes armónicas

Seguidamente, se procede a realizar la simulación:

Analysis Type: Time Domain (Transient)

Options:

- ☒ General Settings
- ☐ Monte Carlo/Worst Case
- ☐ Parametric Sweep
- ☐ Temperature (Sweep)
- ☐ Save Bias Point
- ☐ Load Bias Point
- ☐ Save Check Point
- ☐ Restart Simulation

Run To Time : 5ms seconds (TSTOP)

Start saving data after : 0 seconds

Transient options:

Maximum Step Size 10ns seconds

☐ Skip initial transient bias point calculation (SKIPBP)

☐ Run in resume mode

Output File Options...

Figura 60. Datos para realizar la simulación

Ejecutamos y representamos cada una de las fuentes, para ver cómo irá evolucionando la forma de onda con cada armónico sumado al anterior.

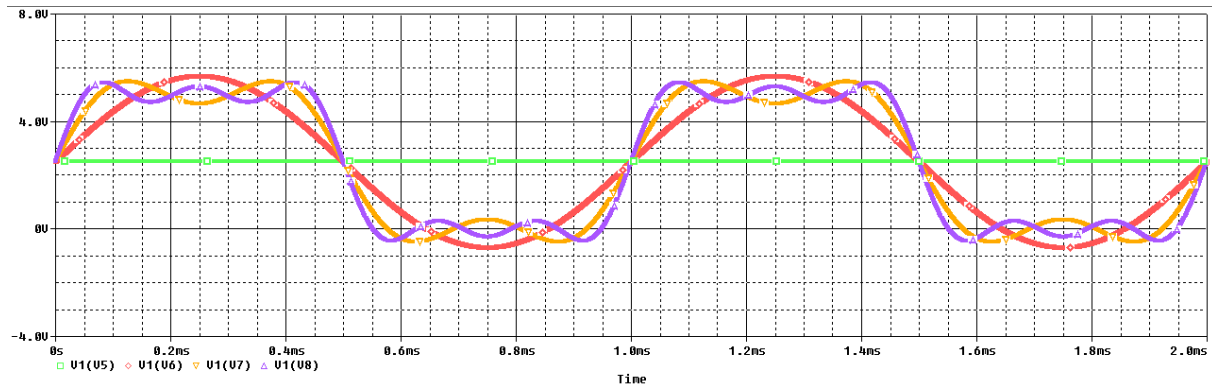


Figura 61. Aproximación de onda cuadrada generada a partir de 1,3 y 5 armónico

Se aprecia cómo a medida que se va añadiendo más el número de armónicos, la señal irá evolucionando hasta quedar aproximadamente como la señal que nos pide el enunciado.

8.2.3.5. Sobre los archivos .CIR

Antes de continuar, vamos a explicar brevemente algunos datos de interés a la hora de ejecutar archivos de simulación .CIR que nos serán de utilidad para las simulaciones que vamos a continuar realizando.

La estructura que sigue este tipo de ficheros es la siguiente:

```
Título
  Descripción del circuito
  Fuentes de tensión/corriente
  Componentes
  Modelos } Usualmente almacenados en
           } librerías de extensión .lib
  Análisis requerido
  Resultados requeridos

.END
```

Figura 62. Estructura archivo .CIR [9]

Antes de continuar, vamos a explicar en que consiste la declaración **.PARAM** . Esta declaración consiste en asignar un valor a una variable como en el ejemplo que se va a mostrar a continuación:

.PARAM FREQ = 60.0 Hz

Entonces si, por ejemplo, en el apartado que contenga la frecuencia de una señal senoidal, introducimos la variable FREQ, automáticamente cogerá el valor correspondiente a esa variable.

En fuentes de tensión/corriente, se añaden las fuentes de excitación que se vayan a usar en el circuito. Por ejemplo, si añadimos una señal PULSE será así:

PULSE (I1, I2, td, tr, tf, pw, per)

- **I1, I2:** Corresponden al valor inicial de tensión o intensidad (dependiendo del tipo de fuente que tengamos) y al valor final (I2).
- **td:** retardo de la función
- **tr:** tiempo de subida
- **tf:** tiempo de bajada
- **pw:** ancho de pulso
- **per:** periodo

Siempre que vayamos a incluir un componente o una fuente de excitación en un circuito .CIR, hemos de tener en cuenta los nodos entre los que se vayan a situar, por lo tanto, la sintaxis será la siguiente:

R1 1 2 1k siendo 1 2 los nudos entre los que se situarán.

A continuación, vamos a explicar brevemente los análisis requeridos para esta práctica y que han de conocer. Se tratan de los análisis .TRAN .FOUR :

.TRAN:

Este comando es usado para realizar en el circuito un análisis transitorio especificando el tiempo que queremos que se ejecute el mismo. Este análisis calcula el comportamiento de un circuito a través del tiempo [6]. La sintaxis es la siguiente:

`.TRAN [Valor máximo de paso] [tiempo de simulación] [Valor a partir del cual se empiezan a guardar datos] [paso de tiempo mínimo para cálculos de simulación]`

.FOUR:

Este comando transformara los datos obtenidos en el análisis transitorio a componentes de Fourier. En este caso, el tiempo de simulación (al transformar los datos del análisis transitorio) será el mismo que el tiempo de simulación del análisis anteriormente mencionado [6]. La sintaxis será la siguiente:

`.FOUR [valor de frecuencia] [magnitud a representar]`

Para finalizar, vamos a explicar en qué consiste el comando `.PROBE` que no es más que un comando que hará que se muestren valores de tensión, intensidad etc para poder representarse una vez se simule el documento. Vamos a mostrar unos ejemplos:

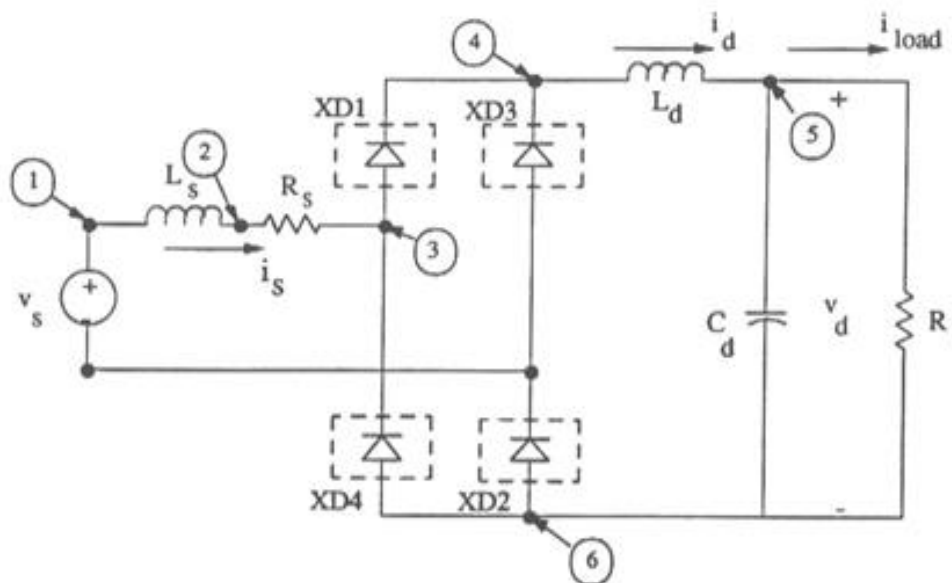
.PROBE V(3) V(3,2)

Cuando solo tengamos un valor (para este caso) se mostrará el valor de la tensión en ese nodo. En el caso de que tengamos dos valores, será el valor entre esos dos nodos.

8.2.3.6. Carga no lineal, rectificador monofásico de onda completa con filtro LC

Ejecute el archivo DBRECT1.CIR y obtenga lo que se pide a continuación:

6. Represente la tensión e intensidad que suministra el generador (VS)
7. Represente la tensión que entrega a la carga (5-6)
8. Obtenga el análisis de Fourier a partir del archivo .OUT de el archivo de las bobinas y el diodo D1.
9. Una vez se han obtenido los resultados del fichero DBRECT1.OUT, calcule el factor de potencia de entrada y el factor de desplazamiento. Una vez obtenido los resultados anteriores, exprese la intensidad que suministra la fuente en función de la descomposición armónica. ¿Cómo es el factor de potencia? ¿Qué nos indica?
10. Por último, Una vez ha realizado y obtenido el análisis de Fourier, ejecute el archivo DBRECT1A.CIR y obtenga la intensidad del generador como la suma del fundamental y de los dos primeros armónicos (3 y 5). Represente la suma y cada una de las componentes.



The initial voltage across C_d equals 160 V.

Figura 63. Rectificador monofásico de onda completa con filtro LC [4]

```

* Single-Phase, Diode-Bridge Rectifier
* Power Electronics: Simulation, Analysis & Education.....by N. Mohan.
.LIB PWR_ELEC.LIB
.PARAM FREQ = 60.0Hz
*
LS    1 2 1mH
RS    2 3 1m
*
LD    4 5 1uH
RLOAD 5 6 20.0
CD    5 6 1000uF IC=160V
*
XD1   3 4 DIODE_WITH_SNUB
XD3   0 4 DIODE_WITH_SNUB
XD2   6 0 DIODE_WITH_SNUB
XD4   6 3 DIODE_WITH_SNUB
*
VS    1 0 SIN(0 170V {FREQ} 0 0 0)
*
.TRAN 50us 50ms 0s 50us UIC
.PROBE v(VS) i(VS) v(5,6)
.FOUR 60.0 i(LS) i(LD) i(XD1.DX)
.END

```

Solución:

En este caso, se nos pide ejecutar el circuito **DBRECT1.CIR** en Pspice A/D y representar la tensión e intensidad que suministra el generador (VS) y la tensión en la carga (5,6).

Para que una vez simulado el circuito, este nos permita simular los valores que buscamos, hemos de añadir en el apartado .PROBE lo marcado en la figura (Figura 16). También se puede apreciar, qué de manera predeterminada, aparecerá el análisis de Fourier para las corrientes que circulan por la bobina LS, LD y por el diodo XD1. Este análisis de Fourier aparecerá en el archivo **output file**.

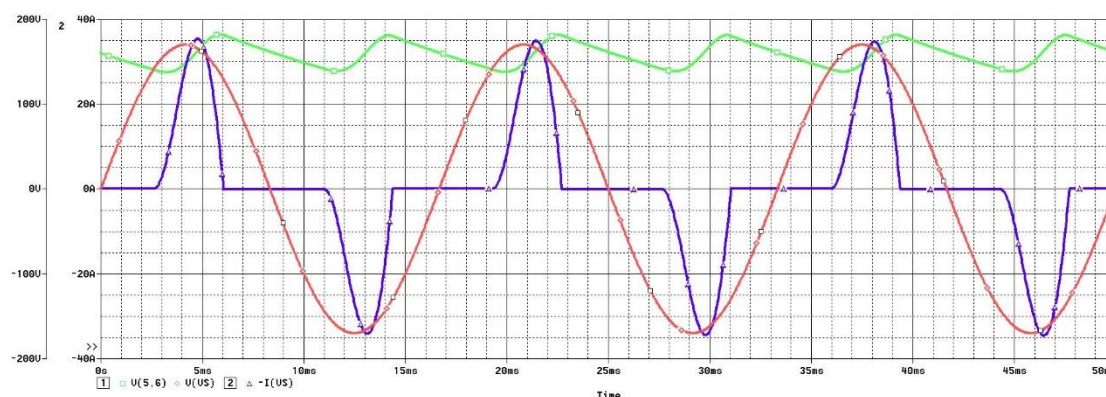


Figura 64. Representación de V(VS), I(VS) y V(RL)

Análisis de Fourier:

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE I(LS)

DC COMPONENT = 3.6278E-02

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	6.0000E+01	1.5351E+01	1.0000E+00	-1.0043E+01	0.0000E+00
2	1.2000E+02	6.3768E-02	4.1540E-03	-8.9170E+01	-6.9083E+01
3	1.8000E+02	1.1739E+01	7.6470E-01	1.4885E+02	1.7898E+02
4	2.4000E+02	4.1779E-02	2.7216E-03	9.1402E+01	1.3158E+02
5	3.0000E+02	6.4831E+00	4.2232E-01	-5.6388E+01	-6.1709E+00
6	3.6000E+02	1.7024E-02	1.1090E-03	-8.8598E+01	-2.8337E+01
7	4.2000E+02	2.2053E+00	1.4366E-01	8.0380E+01	1.5068E+02
8	4.8000E+02	2.8391E-04	1.8494E-05	-8.6002E+01	-5.6553E+00
9	5.4000E+02	1.0341E+00	6.7362E-02	1.5334E+02	2.4373E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 8.8788E+01 PERCENT

Figura 65. Análisis de Fourier de I(LS)

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE I(LD)

DC COMPONENT = 7.9290E+00

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	6.0000E+01	7.0307E-02	1.0000E+00	4.0905E-01	0.0000E+00
2	1.2000E+02	1.3907E+01	1.9780E+02	-1.1036E+02	-1.1117E+02
3	1.8000E+02	5.3816E-02	7.6545E-01	-1.7887E+02	-1.8010E+02
4	2.4000E+02	9.1455E+00	1.3008E+02	4.7115E+01	4.5479E+01
5	3.0000E+02	2.8972E-02	4.1208E-01	1.5292E+00	-5.1610E-01
6	3.6000E+02	4.0710E+00	5.7903E+01	-1.6353E+02	-1.6598E+02
7	4.2000E+02	6.9909E-03	9.9435E-02	-1.7863E+02	-1.8150E+02
8	4.8000E+02	1.1679E+00	1.6612E+01	-5.8025E+01	-6.1297E+01
9	5.4000E+02	4.4551E-03	6.3366E-02	1.7976E+02	1.7608E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 2.4428E+04 PERCENT

Figura 66. Análisis de Fourier de I(LD)

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE I(XD1.DX)

DC COMPONENT = 3.9828E+00

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	6.0000E+01	7.7106E+00	1.0000E+00	-1.0020E+01	0.0000E+00
2	1.2000E+02	6.9839E+00	9.0574E-01	-1.1026E+02	-9.0224E+01
3	1.8000E+02	5.8916E+00	7.6408E-01	1.4899E+02	1.7905E+02
4	2.4000E+02	4.5882E+00	5.9504E-01	4.7295E+01	8.7374E+01
5	3.0000E+02	3.2481E+00	4.2125E-01	-5.6169E+01	-6.0713E+00
6	3.6000E+02	2.0377E+00	2.6428E-01	-1.6330E+02	-1.0318E+02
7	4.2000E+02	1.1012E+00	1.4281E-01	8.0560E+01	1.5070E+02
8	4.8000E+02	5.8408E-01	7.5750E-02	-5.8049E+01	2.2107E+01
9	5.4000E+02	5.1856E-01	6.7253E-02	1.5346E+02	2.4363E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 1.4270E+02 PERCENT

Figura 67. Análisis de Fourier de I(XD1.DX)

Una vez se han obtenido los resultados del fichero DBRECT1.OUT, calcule el factor de potencia de entrada y el factor de desplazamiento. Una vez obtenido los resultados anteriores, exprese la intensidad que suministra la fuente en función de la descomposición armónica. ¿Cómo es el factor de potencia? ¿Qué nos indica?

Para hallar el factor de potencia y el factor de desplazamiento, se han de seguir los siguientes pasos:

$$I_{rms1} = \frac{15.351}{\sqrt{2}} = 10.8548 \text{ A} \quad [\text{Ec. 8}]$$

$$THD = 88.788 \%$$

$$I_{hrms} = I_{rms1} * THD = 10.8548 * 0.88788 = 9.6376 \text{ A} \quad [\text{Ec. 9}]$$

$$I_S = \sqrt{I_{hrms}^2 * I_{rms1}^2} = 14.516 \text{ A} \quad [\text{Ec. 10}]$$

$$FD = \cos(-10.043) = 0.98 \quad [\text{Ec. 11}]$$

$$FP = \frac{I_{rms1}}{I_s} * FD = \frac{10.8548}{14.516} * 0.98 = 0.733 \text{ [Ec. 12]}$$

El factor de potencia calculado, indica que no toda la corriente generada por la fuente será aprovechada, si no que al pasar por una carga no lineal se producirán pérdidas.

Una vez ha realizado y obtenido el análisis de Fourier, ejecute el archivo DBRECT1A.CIR y obtenga la intensidad del generador como la suma del fundamental y de los dos primeros armónicos (3 y 5). Represente la suma y cada una de las componentes.

Ejecutamos el archivo DBRECT1A.CIR y obtenemos el gráfico que muestre la suma de las intensidades del fundamental, armónico tercero y quinto.

A continuación, se muestran las modificaciones que se han de introducir en el archivo .CIR :

Una vez se han realizado todas las modificaciones necesarias, se procede a realizar la simulación y representar las formas de onda que se piden.

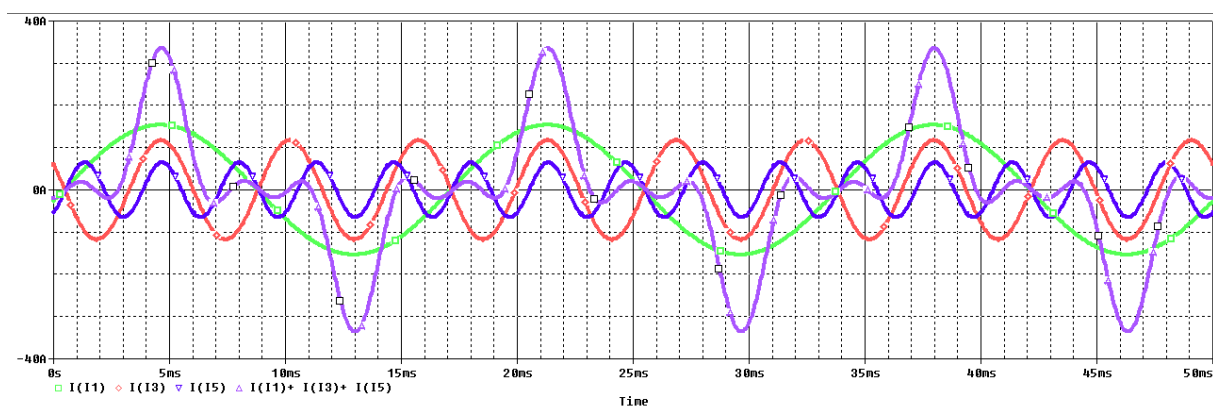


Figura 68. Representación de la intensidad del generador a través de los 5 primeros armónicos

8.2.3.7. Análisis de armónicos en la línea neutro de un sistema trifásico

Ejecute el análisis de un sistema trifásico *NEUTCURR.CIR*, y obtenga lo que se pide a continuación:

3. Represente las corrientes de línea, así como la corriente que circula en el neutro.
4. Represente también las tensiones de fase indicando la frecuencia de operación de las mismas. ¿Se encuentran equilibradas las fases? ¿Cómo ha de ser la corriente por el neutro? ¿Debe de ser nula? ¿Qué es lo que ocurre? Compare el valor de la corriente con su valor teórico. Comente los resultados obtenidos.

PSpice Circuit:

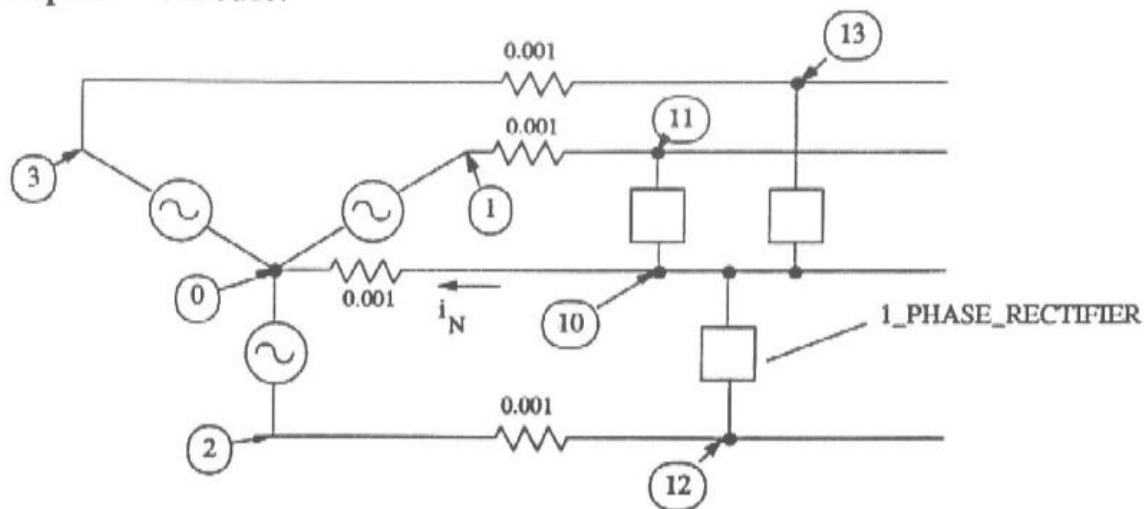


Figura 69.Circuito equivalente NEUTCURR.CIR [4]

NEUTCURR.CIR

* Neutral Current in a 3-Phase, 4-Wire Distribution System

* Power Electronics: Simulation, Analysis & Education.....by N. Mohan.

.PARAM FREQ = 60.0

*

RNEUT 10 0 1m

*

RMEASA 1 11 1m

RMEASB 2 12 1m

RMEASC 3 13 1m

*

XRECTA 11 10 1_PHASE_RECTIFIER PARAMS: IC_CAP = 160V

LOAD_RES = 20

```

XRECTB 12 10 1_PHASE_RECTIFIER PARAMS: IC_CAP = 140V
LOAD_RES = 20
XRECTC 13 10 1_PHASE_RECTIFIER PARAMS: IC_CAP = 180V
LOAD_RES = 20
*
VSA 1 0 SIN(0 170 {FREQ} 0 0 0)
VSB 2 0 SIN(0 170 {FREQ} 0 0 -120)
VSC 3 0 SIN(0 170 {FREQ} 0 0 -240)
*
.TRAN 50us 30ms 0s 50us UIC
.PROBE i(RNEUT) i(RMEASA) i(RMEASB) i(RMEASC) v(1) v(2) v(3)
*
*
.SUBCKT 1_PHASE_RECTIFIER 101 100 PARAMS: IC_CAP = 150V
LOAD_RES = 20
*
LS 101 102 1mH
RS 102 103 10m
LD 104 105 1uH
RLOAD 105 106 {LOAD_RES}
CD 105 106 1000u IC={IC_CAP}
RSNUB1 104 115 1k
RSNUB3 104 125 1k
RSNUB2 100 126 1k
RSNUB4 103 116 1k
CSNUB1 115 103 0.1uF
CSNUB3 125 100 0.1uF
CSNUB2 126 106 0.1uF
CSNUB4 116 106 0.1uF
D1 103 104 POWER_DIODE
D3 100 104 POWER_DIODE
D2 106 100 POWER_DIODE
D4 106 103 POWER_DIODE
.MODEL POWER_DIODE D(RS=0.01, CJO=100pF)
.ENDS
*
.END

```

Solución:

En este apartado vamos a estudiar cómo afectan las componentes armónicas de una señal a la corriente en el neutro de un sistema trifásico. Para ello, usaremos el circuito **NEUTCURR.CIR**. El circuito el cual vamos a comprobar es el siguiente:

Lo primero que vamos a representar son las tensiones del generador trifásico, así como obtendremos la frecuencia a la que operan cada una de las fases.

Para ello, será necesario modificar el archivo.cir y añadir en el apartado .PROBE que es lo que deseamos representar, en este caso como son las tensiones de fase, observando el circuito de la Figura 24, podemos observar que los valores de las tensiones corresponderán con los de los nodos 1,2 y 3 por lo tanto, modificamos el archivo de la siguiente manera:

Una vez ha sido modificado el circuito, podemos proceder a la simulación y representación de las tensiones.

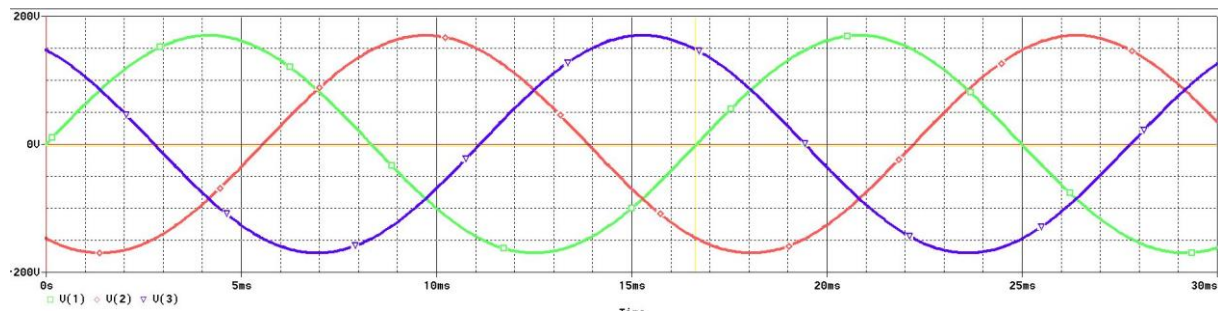


Figura 70. Representación de tensiones de las 3 fases

Podemos apreciar tres señales senoidales desfasadas entre sí 120° con un valor de pico cercano a los 200 V, para ser más exactos 170 V. También, fijándonos en el periodo de cualesquiera de las fases, y con ayuda de los cursores de Pspice, vemos que la señal se repite cada 16.673 ms es decir que la frecuencia de operación de las fases es la siguiente:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{16.673 \text{ ms}} = 60 \text{ Hz} \quad [\text{Ec. 13}]$$

A continuación, vamos a mostrar la representación tanto de los valores instantáneos como eficaces de la corriente de línea.

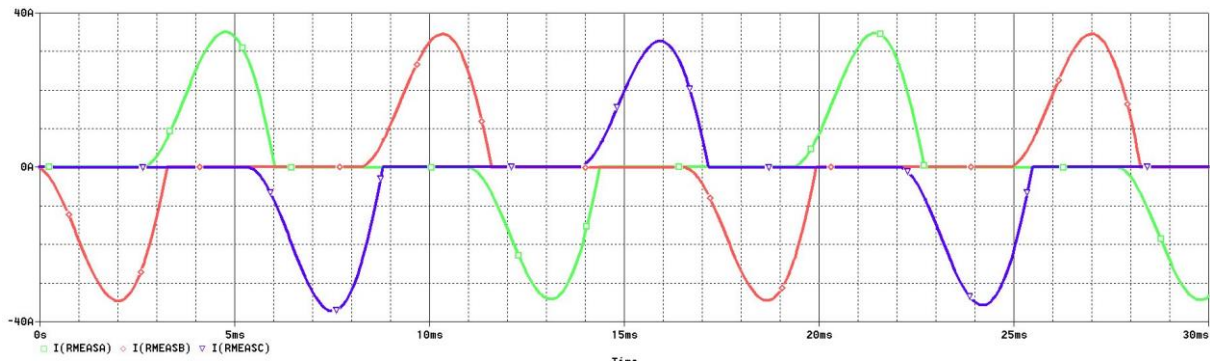


Figura 71. Representación de intensidad instantanea

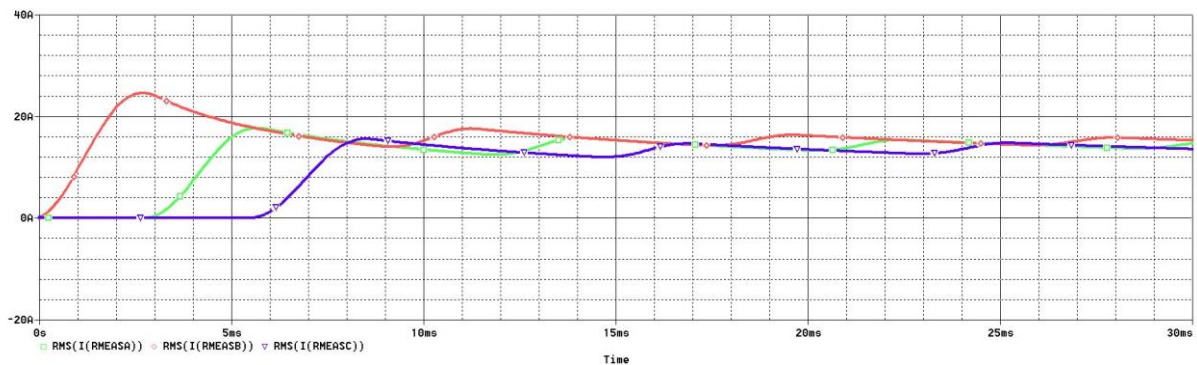


Figura 72. Representación de intensidad eficaz

Como podemos observar, disponemos de un sistema trifásico equilibrado, y ¿cómo sabemos que es equilibrado? Pues como hemos mencionado anteriormente, observamos que todas las señales de las diferentes fases, están desfasadas 120° entre sí, lo que es indicativo de que tenemos un sistema equilibrado.

Una de las características principales de este tipo de sistemas es que la corriente que circula por el neutro es nula, pero entonces, ¿Por qué en este caso sí que circula como podremos ver a continuación?

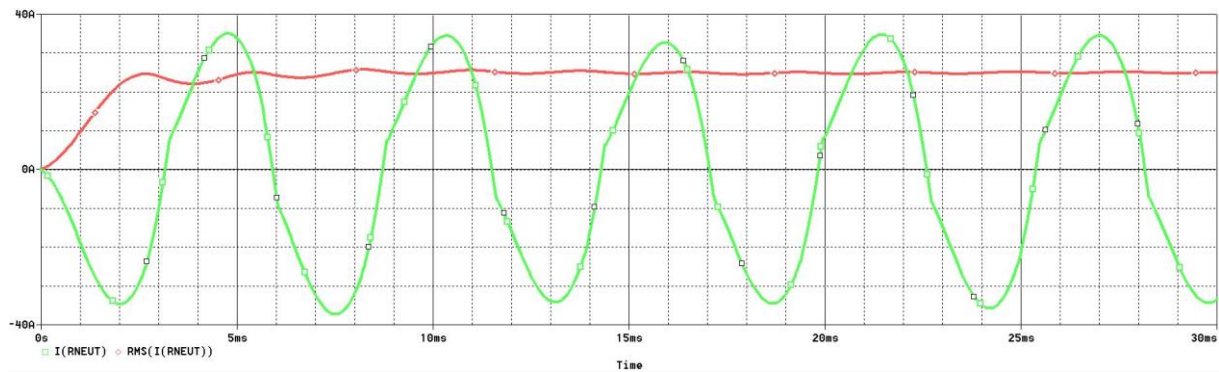


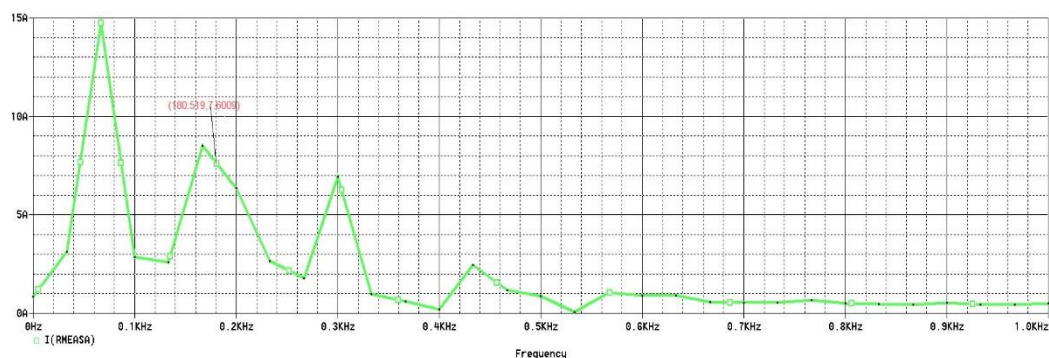
Figura 73. Representación de intensidad instantánea y eficaz en el neutro

Pues esto es debido a que la carga a la que está conectada el sistema trifásico es **no lineal** lo que provoca que ciertos armónicos de orden impar (3, 5, 9 ...) no se anulen al llegar al conductor neutro, si no, que se sumarán.

A continuación, vamos a demostrar que esto es cierto.

El valor eficaz de la intensidad en el neutro es de 24.7 A aproximadamente. Con la siguiente expresión, se debe verificar el mismo valor.

$$I_N = \sqrt{\sum_{h=3,9,15,21} (3I_{sh})^2} \approx 3I_{S3, linea} \quad Ec.[14]$$



Como la frecuencia fundamental son 60 Hz, la del tercer armónico corresponderá

Figura 74. Descomposición armónica de la intensidad de línea

con 180 Hz.

Realizamos el análisis de Fourier de cualquiera de la corriente de una de las fases (ya que coinciden en valor eficaz).

Para 180 Hz, corresponden 7.6 A, por lo tanto, sustituyendo este valor en la ecuación 7, obtenemos como resultado 22.7 A eficaces. Por lo que se verifica, qué para sistemas trifásicos, es de suma importancia el tercer armónico ya que puede provocar sobretensiones en el neutro.

8.2.4. Método operativo

Para generar las formas de ondas, solo será necesario conectar las sondas del osciloscopio a las del generador de funciones, seleccionando en este último el tipo de onda con las características que se pedirán a continuación. Es necesario tener cuidado con la polaridad de las sondas ya que se podría invertir la forma de onda.

A continuación, se va a proceder a realizar una breve explicación de cómo se ha de proceder para el correcto uso de la función FFT en el osciloscopio.

Representación del espectro (FFT) usando el osciloscopio digital TPS2012B

Usando la transformación FFT se puede convertir la señal del dominio del tiempo (YT), a sus componentes en el dominio de la frecuencia (componentes espectrales).

Para utilizar la FFT es necesario llevar a cabo las siguientes tareas:

- Configurar la forma de onda de la señal en el dominio del tiempo.
- Pulsar el botón **MATH** para acceder a FFT.
- Seleccionar el canal al que se quiere aplicar.
- Seleccionar el tipo de ventana (Hanning, Flattop o Rectangular) eligiendo cual se adapta mejor al tipo de onda que estamos representando.
- Ajustar la velocidad de muestreo (Como mínimo frecuencia máxima de la señal = velocidad de muestreo dividido entre dos para evitar “aliasing”). Se elige con el mando de SEC/DIV.
- Se puede usar FFT zoom para magnificar el espectro en la zona central y así tener una visión mucho más definida.

- Se pueden usar los cursores para medir el espectro

Configurar la forma de onda en el dominio del tiempo YT.

- Pulsar **AUTOCONFIGURAR(AUTOSET)** para mostrar la forma de onda YT.
- Girar el mando POSICIÓN VERTICAL para centrarla verticalmente (cero divisiones).
- Girar el mando POSICIÓN HORIZONTAL hasta situar la parte de la onda que desea analizar en las 8 divisiones centrales de la pantalla.
- Girar el mando VOLTS/DIV para garantizar que toda la forma de onda queda en pantalla.
- Girar el mando SEC/DIV para proporcionar la resolución que desee al espectro.
- (Tener en cuenta que a frecuencias de muestreo más rápidas se reduce las posibilidades de representaciones falsas de la señal pero a costa de perder resolución)

Mostrar la FFT

- Pulsar el botón de **MATH**.
- Establecer la opción fuente en FFT.
- Seleccionar el canal fuente de la FFT (CH1 o CH2).

8.2.4.1. Onda senoidal pura

Configurar el generador de funciones en modo senoidal y representar con él una onda de 1 V de valor eficaz y 50Hz.

- 4. Represente la señal medida**
- 5. A través de la herramienta matemática FFT, represente el espectro de frecuencias resultante**
- 6. Con ayuda de los cursores, mida los armónicos 1, 3 y 5.**

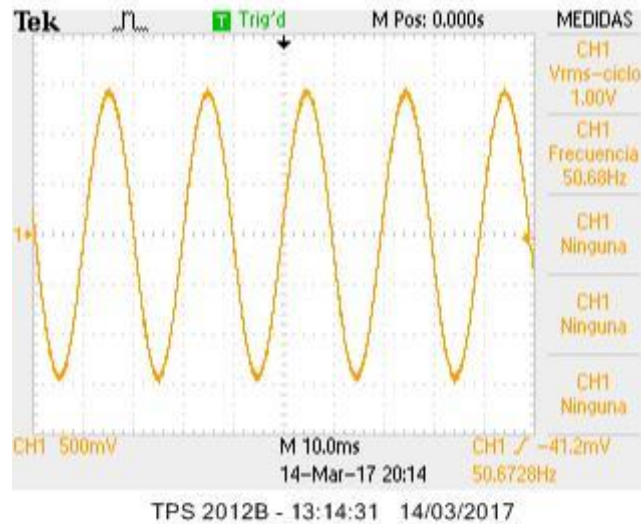
Solución:

Figura 75. Señal senoidal medida en el osciloscopio

Seguir el procedimiento de acomodar la señal en el display para tener suficientes puntos sobre los que realizar la FFT y usar la opción del botón rojo MATH en modo FFT sobre el canal de entrada de la señal, la ventana elegida puede ser Hanning o Flattop indistintamente, aunque preferiblemente Hanning.

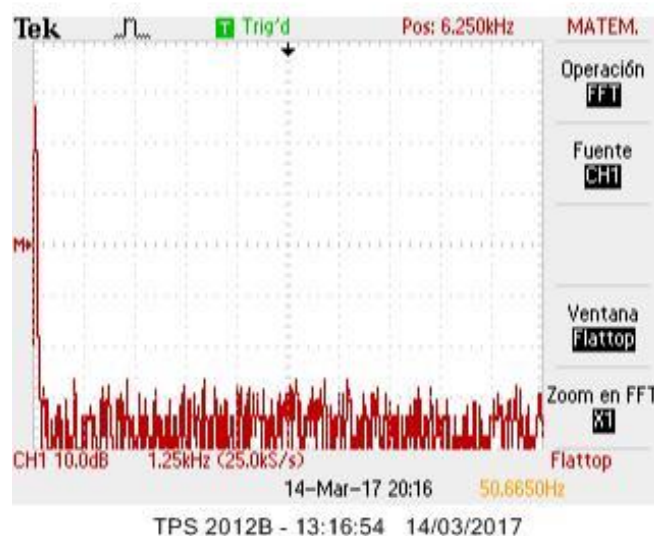


Figura 76. Función FFT aplicada a una señal senoidal

Una vez realizada la transformada centrar la frecuencia que se quiere analizar y usar los cursores para recabar información sobre el punto en cuestión.

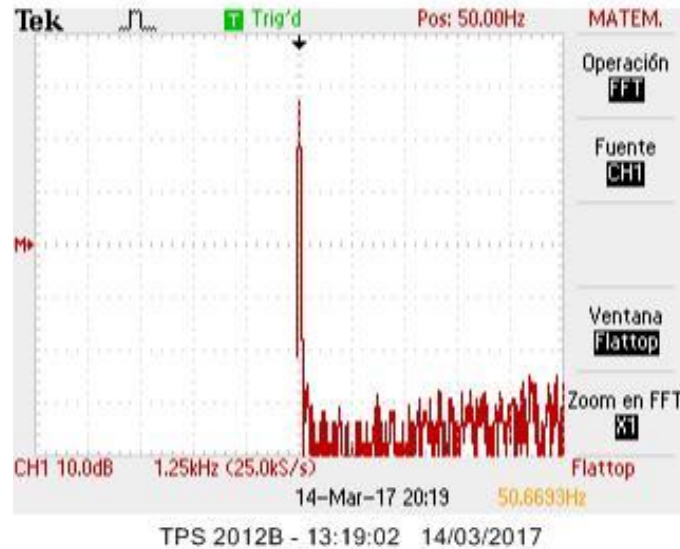


Figura 77. Función FFT aplicada a una señal senoidal centrada en 50 Hz



Figura 78. Medida con cursores de la amplitud del armónico fundamental de la onda senoidal

Se puede observar un único pico en 50Hz, que están centrado tal como pone en el indicador de posición en la parte superior derecha de la pantalla, con un valor aproximado de casi 0dB (0.21dB concretamente) tal y como se esperaba ya que, como se explicó anteriormente en los fundamentos teóricos 0dBs equivalen a 1V eficaz. Este

tipo de cursores se usa normalmente para comparar valores más que para medirlos, de modo que en las próximas medidas se usara el otro tipo de cursores, frecuencia.

8.2.4.2. Onda triangular con componente continua

Configurar el generador de funciones en modo triangular y representar con él una onda de 5V de pico a pico, 1KHz y 2.5 V de componente continua.

4. Represente la señal medida
5. A través de la herramienta matemática FFT, represente el espectro de frecuencias resultante
6. Con ayuda de los cursores, mida los armónicos 1, 3 y 5 así como su componente continua.

Solución:

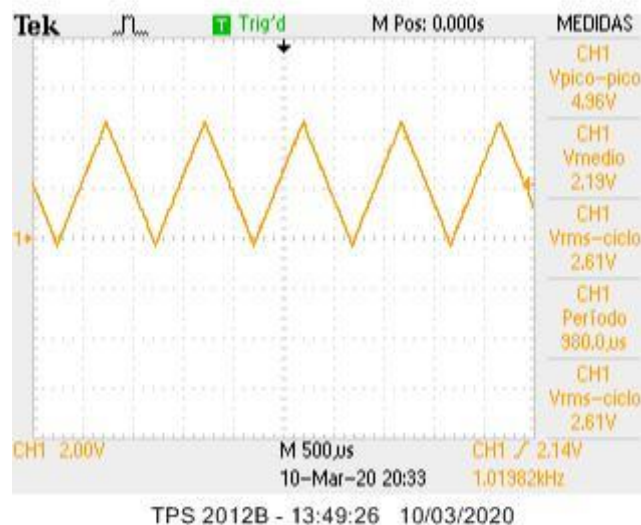


Figura 79. Señal triangular medida en el osciloscopio

Realizar en mismo proceso de antes y medir con los cursores la amplitud y frecuencia de la componente DC, primer, tercer y quinto armónico representando los valores de dichos armónicos.

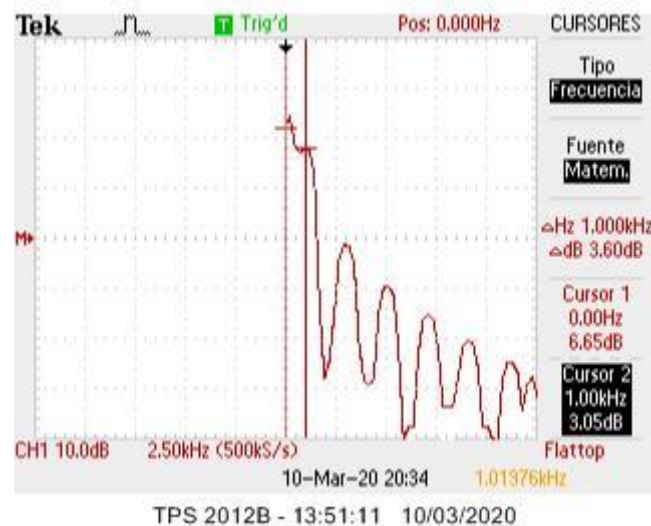


Figura 80. Medida con cursores de la amplitud del armónico fundamental y componente DC de la onda triangular

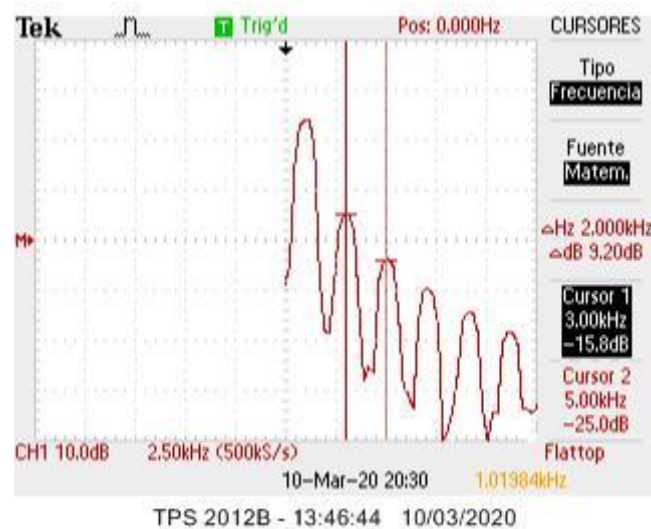


Figura 81. Medida con cursores de la amplitud del tercer y quinto armónico de la onda triangular

El valor de amplitud de la componente DC es de -15 dB que pasándolo a valor eficaz es:

$$6.65 = 20 \log V_{rms} \quad 6.65 = 20 \log(V_{rms}) \quad [\text{Ec. 15}]$$

$$V_{rms} = 10^{\frac{6.65}{20}} = 2.1503V \quad [\text{Ec. 16}]$$

$$V_{pp} = V_{rms} \cdot \sqrt{2} = 3.0409V \quad [\text{Ec. 17}]$$

Se procede de igual manera para el cálculo de la tensión de pico de las componentes armónicas que se nos piden:

Primer armónico

$$3.05 = 20 \text{Log}(V_{rms}) \quad [\text{Ec. 15}]$$

$$V_{rms} = 10^{\frac{3.05}{20}} = 1.4207V \quad [\text{Ec. 16}]$$

$$V_{pp} = V_{rms} \cdot \sqrt{2} = 2.0092V \quad [\text{Ec. 17}]$$

Tercer armónico

$$-15.8 = 20 \text{Log}(V_{rms}) \quad [\text{Ec. 15}]$$

$$V_{rms} = 10^{\frac{-15.8}{20}} = 0.1622V \quad [\text{Ec. 16}]$$

$$V_{pp} = V_{rms} \cdot \sqrt{2} = 0.2294V \quad [\text{Ec. 17}]$$

Quinto armónico

$$-25 = 20 \text{Log}(V_{rms}) \quad [\text{Ec. 15}]$$

$$V_{rms} = 10^{\frac{-25}{20}} = 0.05623V \quad [\text{Ec. 16}]$$

$$V_{pp} = V_{rms} \cdot \sqrt{2} = 0.07953V \quad [\text{Ec. 17}]$$

Tri. empírica	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia	0Hz	1KHz	3KHz	5 KHz
Amplitud	3.0409 V	2.0092 V	229.4 mV	79.53 mV

8.2.4.3. Onda cuadrada con componente continua

Configurar el generador de funciones en modo de onda cuadrada y representar con él una onda de 5V pico a pico, una frecuencia de 1KHz y una componente continua de 2.5 V.

1. Represente la señal medida
2. A través de la herramienta matemática FFT, represente el espectro de frecuencias resultante
3. Con ayuda de los cursores, mida los armónicos 1, 3 y 5 así como su componente continua.

Solución:

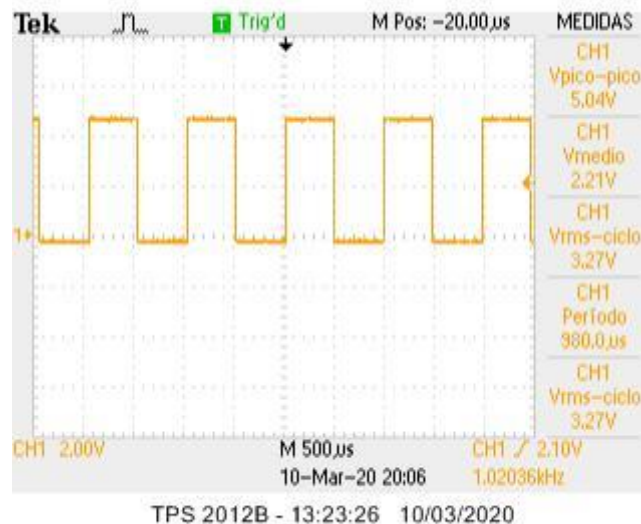


Figura 82. Señal cuadrada medida en el osciloscopio

Aplicar la función FFT a la señal y analizar la frecuencia y amplitud de los armónicos del primero, tercero y quinto. Comparar la amplitud del noveno con el primer armónico y representar la comparativa de forma **aproximada**.

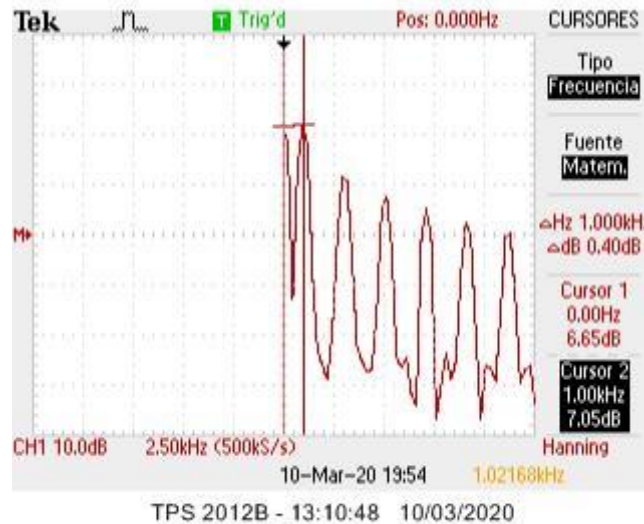


Figura 83. Medida con cursores de la amplitud del armónico fundamental y componente DC de la onda cuadrada

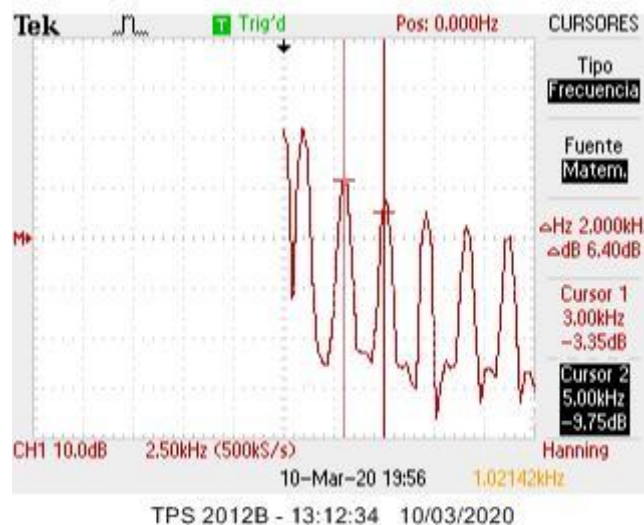


Figura 84Figura 22. Medida con cursores de la amplitud del armónico tercero y quinto de la onda cuadrada

A continuación, se va a proceder a transformar los valores arrojados por el osciloscopio en DB a valores de pico a pico.

Componente DC

$$6.65 = 20\text{Log}(V_{rms}) \quad [\text{Ec. 15}]$$

$$V_{rms} = 10^{\frac{6.65}{20}} = 2.1503V \quad [\text{Ec. 16}]$$

$$V_{pp} = V_{rms} \cdot \sqrt{2} = 3.041 V \quad [\text{Ec. 17}]$$

Primer armónico

$$7.05 = 20\text{Log}(V_{rms}) \quad [\text{Ec. 15}]$$

$$V_{rms} = 10^{\frac{7.05}{20}} = 2.252V \quad [\text{Ec. 16}]$$

$$V_{pp} = V_{rms} \cdot \sqrt{2} = 3.184 V \quad [\text{Ec. 17}]$$

Tercer armónico

$$-3.35 = 20\text{Log}(V_{rms}) \quad [\text{Ec. 15}]$$

$$V_{rms} = 10^{\frac{-3.35}{20}} = 0.68V \quad [\text{Ec. 16}]$$

$$V_{pp} = V_{rms} \cdot \sqrt{2} = 0.9616 V \quad [\text{Ec. 17}]$$

Quinto armónico

$$-9.75 = 20\text{Log}(V_{rms}) \quad [\text{Ec. 15}]$$

$$V_{rms} = 10^{\frac{-9.75}{20}} = 0.3255V \quad [\text{Ec. 16}]$$

$$V_{pp} = V_{rms} \cdot \sqrt{2} = 0.4603 V \quad [\text{Ec. 17}]$$

Cuad. empírica	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia	0 Hz	1 KHz	3 KHz	5 KHz
Amplitud	3.041 V	3.184 V	0.9616 V	0.4603 V

8.2.4.4. Análisis espectral y criterio de Nyquist

Ahora que ya conocemos FFT debemos saber que al ser una aproximación matemática debemos tener cuidado con la frecuencia de muestreo del osciloscopio ya que nos podría llevar a la visualización de armónicos “alias” si la frecuencia de muestreo se encuentra por debajo de la mitad de la frecuencia de Nyquist.

El análisis espectral por el método FFT se realiza en el osciloscopio a partir de los 2048 puntos centrales que se representan en el display de manera que al representar puntos situados muy cercanos entre si disminuye la frecuencia de muestreo del osciloscopio de manera notable produciendo la aparición de armónicos en el modo FFT que, realmente, no están en la frecuencia donde se presentan. Esos “ecos” de armónicos de otras frecuencias, representados cerca de armónicos que sí son reales, son llamados “alias”.

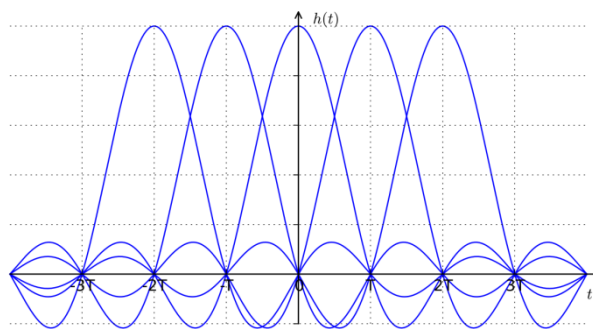


Figura 85

Para visualizar esto en el osciloscopio usamos la misma onda cuadrada de antes pero con una frecuencia de 50kHz y ponemos el osciloscopio con el mando de tiempo antes de efectuar el método FFT en un valor 5kHz de frecuencia de muestreo. Una vez hecho representar el 5º armónico en 250kHz para ver los “alias”. Representarlo en oscilograma de manera **aproximada**.

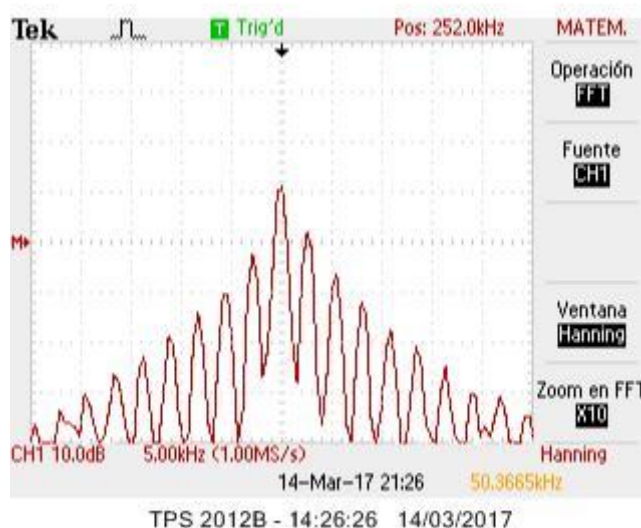


Figura 86. Representación de los alias por no cumplir el criterio de Nyquist [1]

Como se puede ver en la figura 20 hay muchos picos que podrían confundirse como armónicos cerca de 150kHz pero solo son ecos de otros armónicos situados en otras frecuencias, para evitar esta distorsión es importante mantener el valor de la frecuencia de muestreo en valores altos siempre que se pueda.

8.2.5. Resultados finales

Comparar los datos teóricos, simulados y experimentales. Incluir las comparativas con las imágenes de la simulación en el informe de prácticas.

8.2.5.1. Comparativa de valores obtenidos de la onda triangular

Tri. teórica	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia	0Hz	1KHz	3KHz	5 KHz
Amplitud(V)	2.5V	2.026V	0.225V	0.081 V

Tri. simulada	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia	0Hz	1KHz	3KHz	5KHz
Amplitud	2.5098 V	2.0345V	226.143mV	81.477mV

Tri. empírica	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia	0Hz	1KHz	3KHz	5 KHz
Amplitud	3.0409 V	2.0092 V	229.4 mV	79.53 V

8.2.5.2. Comparativa de valores obtenidos de la onda cuadrada

Cuad. teórica	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia	0Hz	1KHz	3KHz	5 KHz
Amplitud(V)	2.5V	3.183V	1.061V	0.637 V

Cuad.simu	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia	0 Hz	1KHz	3KHz	5KHz
Amplitud	2.5049 V	3.1894V	1.0634V	638.265 mV

Cuad. empírica	Componente DC	1º armónico	3º armónico	5º armónico
Frecuencia	0 Hz	1 KHz	3 KHz	5 KHz
Amplitud	3.041 V	3.184 V	0.9616 V	0.4603 V

Como conclusión se puede observar que los resultados obtenidos en las simulaciones y el análisis teórico, coinciden casi a la perfección luego indica que están bien hechas. Sin embargo, los datos que arrojan el análisis experimental

En este apartado se ha podido comprobar qué en un análisis de armónicos, el instrumento de medida y su calidad pueden afectar seriamente a la medición por características como la frecuencia de muestreo.

8.3. Modulación PWM basada en circuito integrado NE 555 configurado como astable. Análisis teórico, práctico y simulaciones. Guion del alumno.

8.3.1. Introducción y fundamentos teóricos

En esta práctica, se va a proceder al diseño, simulación y montaje de una señal PWM para controlar distintos dispositivos, así como el análisis y comparación de valores obtenidos mediante el análisis a través de las series de Fourier de las componentes armónicas de señal.

El montaje se caracterizará por un temporizador IC 555 configurados tanto en modo astable, como en un montaje basado en un modo monoestable.

Con la realización de esta práctica, se espera iniciarnos en la modulación PWM a través de un montaje de carácter sencillo en el que el alumno será capaz de comprender el funcionamiento de una señal modulada en ancho de pulso.

8.3.1.1. Modulación de ancho de pulso (PWM)

La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM), surge de la necesidad de establecer un control a altas frecuencias variando el ciclo de trabajo de una señal. Se tienen multitud de aplicaciones ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga hasta para conmutar inversores.

Entonces, una señal PWM se basa en una señal que conmuta en valores discretos. Variando su Duty Cycle (DT) seremos capaces de modificar el valor de tensión (o corriente) media que se le aplique a una carga. Es decir, si la amplitud de una señal es de 5 V y se le aplica un duty cycle del 100%, a la salida entregará los 5V a la carga. En cambio, si se con un duty cycle del 50%, se entregará a la carga 2.5V.

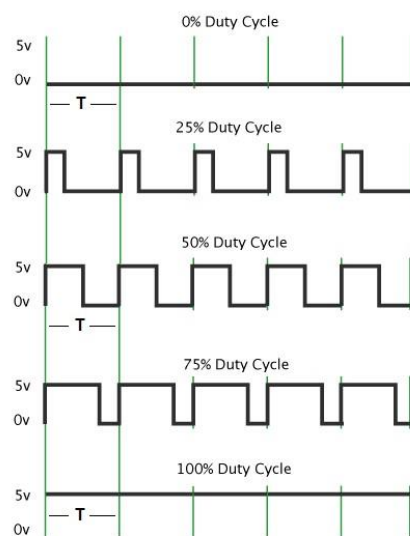


Figura 87. Muestra de Duty Cycle en señal PWM

Este tipo de modulación, surge de la necesidad de generar una señal en la que los armónicos y la frecuencia fundamental estén muy separadas. Este método, es usado para la regulación interna en inversores (ya que se necesitan tiempo de conmutación ínfimos entre otras especificaciones), como variador de frecuencia de motores DC etc.

Existen multitud de diseños de modulación PWM, nosotros nos vamos a centrar en un circuito que genera una señal PWM a través de un temporizador 555 configurado como astable.

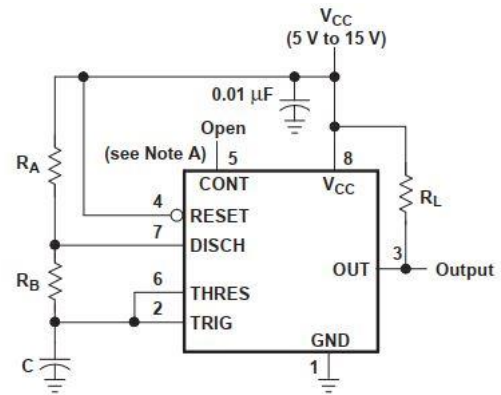


Figura 88. Temporizador 555 configurado en modo astable [3]

8.3.1.2. Temporizador ICI 555

Este componente es un circuito temporizador de precisión que es capaz de producir tiempos de retardo y oscilaciones precisas. Existen dos maneras de configurar este temporizador:

- **Modo astable**
- **Modo monoestable**

En modo monoestable, el intervalo de tiempo es controlado por una sola conexión a una línea de resistencia y condensador externa. En cambio, si se configura en modo astable la frecuencia y el duty cycle pueden ser controlados independientemente con dos resistencias y un condensador externos.

Internamente, el temporizador 555 se componen de dos comparadores, un biestable, un transistor de descarga y un divisor de voltaje. El funcionamiento es el siguiente.

El divisor de voltaje resistivo se utiliza para establecer los niveles de voltaje en el comparador. Consecuentemente, el comparador alto tiene una referencia de $\frac{2}{3} V_{CC}$

y el bajo tiene una referencia de $1/3 V_{CC}$. Las salidas de los comparadores controlan el estado del biestable. Cuando el voltaje de disparo se reduce por debajo de $1/3 V_{CC}$, el biestable, se inicia y la salida salta a un nivel alto. La entrada de umbral normalmente está conectada a un circuito temporizador RC externo. Cuando el voltaje en el capacitor externo excede de $2/3 V_{CC}$, el comparador alto reestablece el biestable, el que a su vez regresa la salida a su nivel bajo. Cuando la salida del dispositivo es baja, el transistor de descarga se enciende y proporciona una trayectoria para la descarga rápida del capacitor de temporización externo.

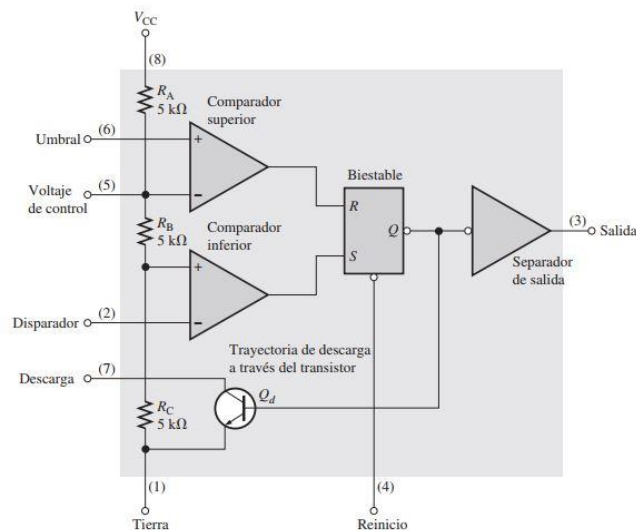


Figura 89. Diagrama interno 555 [4]

8.3.2. Objeto de la práctica

Los objetivos de la práctica pueden resumirse en:

1. Analizar señales moduladas en ancho de pulso a través de los diferentes tipos de análisis que se proponen.
2. Comprobar el funcionamiento y aplicación de la señal PWM generado con un temporizador de precisión IC 555 generado como astable.
3. Analizar las componentes armónicas de señales PWM de ciclo de trabajo variable a través de las series de Fourier.

Los resultados del aprendizaje son:

1. Adquirir la habilidad de realizar cálculos teóricos para diseñar montajes que generen una señal PWM.
2. Realizar montajes sencillos que permitan generar señales PWM para su posterior uso.
3. Ser capaz de analizar las componentes armónicas de las señales generadas.

8.3.3. Descripción básica

En esta práctica, se va a proceder al diseño, simulación y montaje de una señal PWM con un temporizador de precisión IC 555 configurado como astable en la que el alumno ha de ser capaz de fijar los valores para que la señal a la salida se adapte a sus necesidades.

8.3.3.1. Descripción temporizador 555 como astable

En la figura 3, se muestra la disposición del temporizador de precisión 555 configurado como astable. Esta configuración elegida, los componentes externos como son R_a , R_b y C fijarán la frecuencia de oscilación a la salida. El condensador de 0.01 μF conectado en la patilla 5, servirá única y exclusivamente para el desacoplamiento y no tendrá efecto en la operación.

A continuación, se ofrece una breve explicación de cómo será el proceso que se siga para generar la señal PWM prevista.

Este modelo, añadiendo la resistencia R_b como pueden apreciar en la figura 3, y conectando el pin 2 y 6 (Trigger y Threshold), provocarán que el mismo se autodispere a diferencia de la señal PWM generada en el apartado 4 que era necesario introducir una señal de reloj que disparase nuestro circuito.

El condensador, se cargará a través de R_a y R_b y se descargará solo a través de R_b . El ciclo de trabajo será controlado por los valores de R_a y R_b .

La salida del 555 se basará en las operaciones de carga y descarga del condensador, estos valores de carga y descarga estarán comprendidos entre $1/3 V_{cc}$ y $2/3 V_{cc}$. Cuando la operación de carga del condensador llega a $2/3 V_{cc}$, a la salida inmediatamente se establecerá nivel bajo hasta que se alcance $1/3 V_{cc}$ que cambiará

su valor a estado alto. Esto conformará una onda cuadrada con ciclo de trabajo variable dependiente de los valores R_a y R_b .

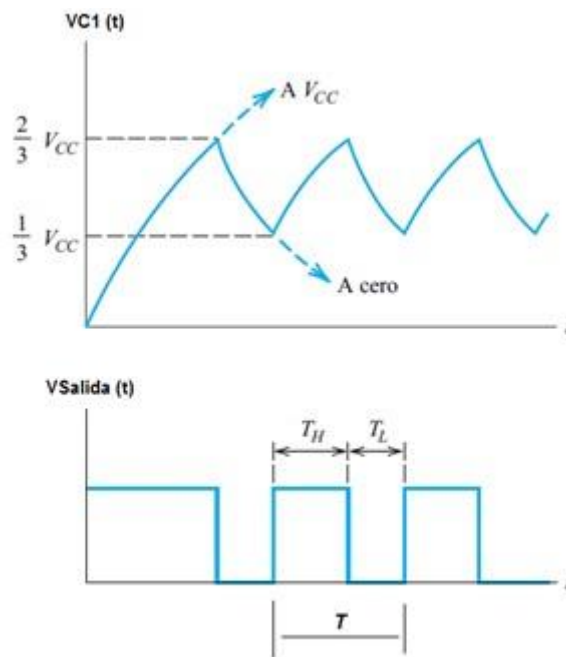


Figura 90. Comparación de tensión en condensador y tensión a la salida en NE 555 [4]

La frecuencia de oscilación a la salida vendrá definida por la siguiente expresión.

$$f = \frac{1.44}{(R_a + 2R_b) \times C} \quad [Ec. 5]$$

Seleccionando los valores de R_a y R_b , podremos ajustar el ciclo de trabajo. Como C se carga a través de R_a y R_b y se descarga solo a través de R_b , se pueden obtener ciclos de trabajo próximos al 50% si se cumple que $R_b \gg R_a$ por lo que los tiempos de carga y descarga serán prácticamente iguales.

Una fórmula para calcular el ciclo de trabajo se desarrolla de la siguiente manera. El tiempo en que la salida se encuentre en estado alto, es el tiempo que lleva a C a cargarse desde $\frac{1}{3} V_{CC}$ hasta $\frac{2}{3} V_{CC}$ [4].

$$t_H = 0.693(R_a + R_b) \times C \quad [Ec. 6]$$

En la figura 26 podemos observar gráficamente los valores de $R_A + 2R_B$ y C que fijarán distintas frecuencias de oscilación a la salida.

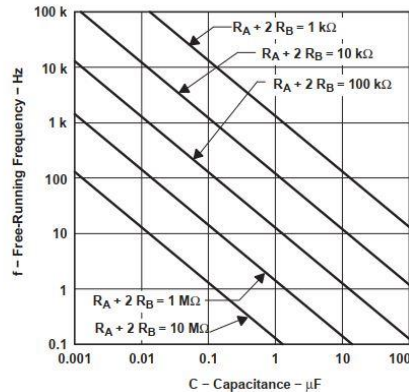


Figura 91. Tabla de valores de componentes para NE555 configurado como astable

Como el tiempo que se encuentra en estado bajo solo depende de la resistencia R_B , la expresión que definirá este tiempo es:

$$t_L = 0.693 \times R_B \times C \quad [Ec. 7]$$

El periodo de la señal de salida, corresponderá a la suma de los valores del tiempo que se encuentra en estado alto y estado bajo.

Por último, el ciclo de trabajo vendrá fijado por la siguiente expresión.

$$DT(\%) = \frac{t_H}{t_H + t_L} \times 100 \quad [Ec. 8]$$

8.3.3.2. Análisis de Fourier de una señal PWM

Es necesario realizar un estudio en espectro de frecuencia de las señales PWM para poder cuantificar la calidad que obtendrá esta modulación a su salida. Es prioritario conseguir un contenido armónico de señal lo más pequeño posible.

Para efectuar un análisis de componentes armónicas de señal, será necesario acudir a las transformadas de Fourier. Para este tipo de señales la transformada de Fourier para hallar los valores de las componentes armónicas serán las siguientes.

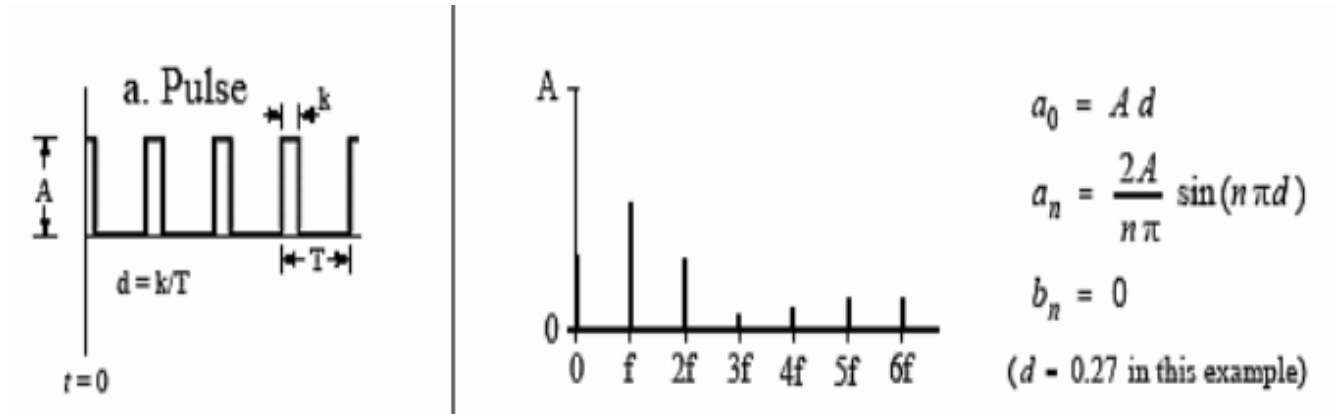


Figura 92. Ejemplo descomposición de Fourier para señal pulsante [8]

El que no exista término b_n , será indicativo de que la señal pulsante, podrá ser reconstruida en su totalidad por señales seno sin necesidad de usar señales coseno [8].

8.3.4. Análisis teórico

En nuestro caso, vamos a generar la señal PWM con el 555 configurado como astable para variar la intensidad de luminosidad de un led de potencia de 1W.

El circuito resultante será el siguiente.

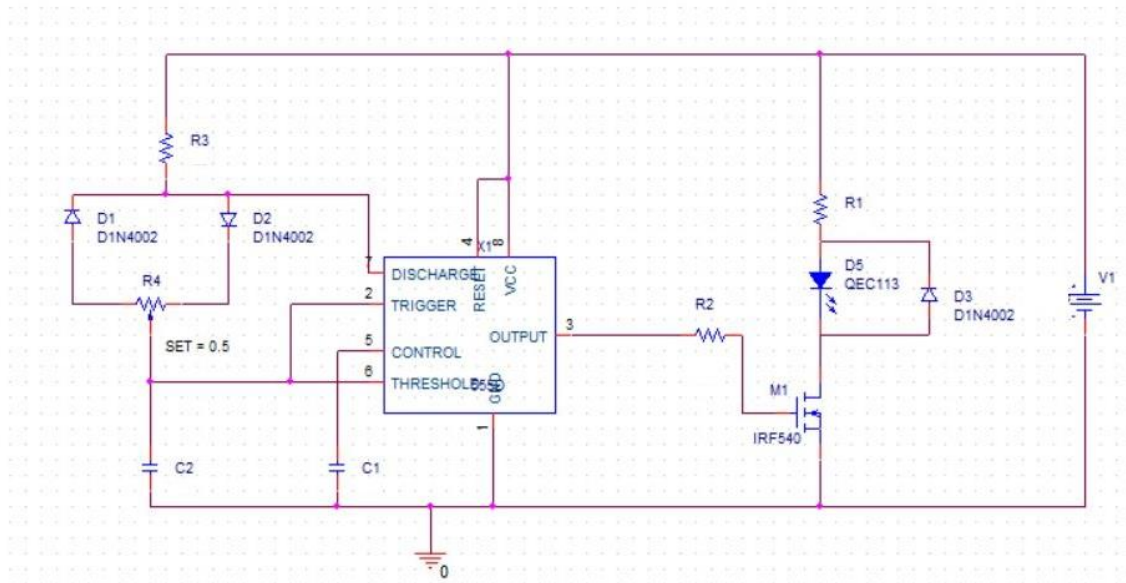


Figura 93. Circuito generador de señal PWM con NE555 configurado como astable

Este circuito está basado, como se señaló con anterioridad, en un montaje de 555 configurado como astable. Pero podemos observar, qué en este caso, tenemos algunas diferencias.

La resistencia R_b , se va a sustituir por un potenciómetro y dos diodos. Los diodos permitirán que haya dos caminos, uno para carga y otro para descarga. El potenciómetro, a su vez, será el encargado de variar el ciclo de trabajo a la salida. El condensador añadido a la patilla 5 (C_1) se encargará de eliminar el ruido de alta frecuencia.

Cuestión:

Basándose en la gráfica de la figura (FIGURA DE LA GRAFICA CONFIGURADA COMO ASTABLE), escoja los valores que estime oportunos para generar una señal PWM a la salida a la frecuencia deseada. Conocido los valores del condensador conectado al pin de Control (5) $100nF$, la tensión de alimentación de $10V$ y el potenciómetro de $100k\Omega$.

Realice los cálculos teóricos que se piden a continuación:

1. Calcule el tiempo que permanece en estado alto y bajo la tensión a la salida para un ciclo de trabajo del 75%.
2. Para un ciclo de trabajo del 25%, vuelva a calcular el tiempo que permanecerá en estado alto y bajo la señal.
3. Para los dos ciclos de trabajo que se mencionan en los apartados anteriormente, halle la tensión media que tendrá la señal modulada en ancho de pulso.
4. Analice las componentes armónicas 1, 3 y 5 a través de las series de Fourier para los ciclos de trabajo anteriormente mencionados.

Solución:

8.3.5. Simulaciones

Diseñe en Orcad Pspice el circuito que se genere la señal PWM con el temporizador IC 555 con los valores fijados durante el análisis teórico:

Simule el circuito y responda a las preguntas que se declaran a continuación.

1. ¿Se aproxima el valor obtenido de frecuencia a la salida con el que ha impuesto? Represente la tensión a la salida del 555.
2. Para un ciclo de trabajo del 75%, compare la señal a la salida con la tensión en el condensador. Explique brevemente que es lo que sucede.
3. Represente el tiempo que permanece en estado alto y bajo la tensión a la salida para ese mismo ciclo de trabajo.
4. Para un ciclo de trabajo del 25%, realice de nuevo los dos apartados anteriores.
5. Para los dos ciclos de trabajo que se mencionan en los apartados anteriormente, represente la tensión media y exponga una breve explicación.

6. Analice las componentes armónicas para los ciclos de trabajo anteriormente mencionados.

Solución:

8.3.6. Método operativo

Una vez ha realizado los cálculos teóricos oportunos y su correspondiente simulación, se va a proceder al montaje del mismo para modificar el valor de la luminosidad del led variando el ancho de pulso de la señal PWM.

8.3.6.1. Lista de materiales

Los materiales a escoger para el montaje dependerán del diseño escogido por el alumno:

- 3 diodos D1N4002
- 1 resistencia de valor a convenir de 0.5W.
- 1 resistencia de valor a convenir de 0.5W.
- 1 resistencia de 33Ω de 25W.
- 1 potenciómetro de $100k\Omega$.
- 1 circuito integrado NE555.
- 1 condensador de valor a convenir.
- 1 condensador de $100nF$.
- 1 MOSFET IRF540.
- 1 LED ProLight Opto blanco (PM2B-1LWE).
- 1 Placa de prototipos ProtoBoard.
- Osciloscopio Tektronix TPS2012B
- Fuente de alimentación Agilent E3631A.
- Cableado de banana para alimentación.
- 2 Sondas de osciloscopio TektroniX



Figura 94. Led ProLight Opto Blanco

Tener en cuenta la conexión del LED, mucho cuidado con la polaridad.

8.3.6.2. Montaje

El montaje a realizar con los datos calculados teóricamente sería el siguiente.

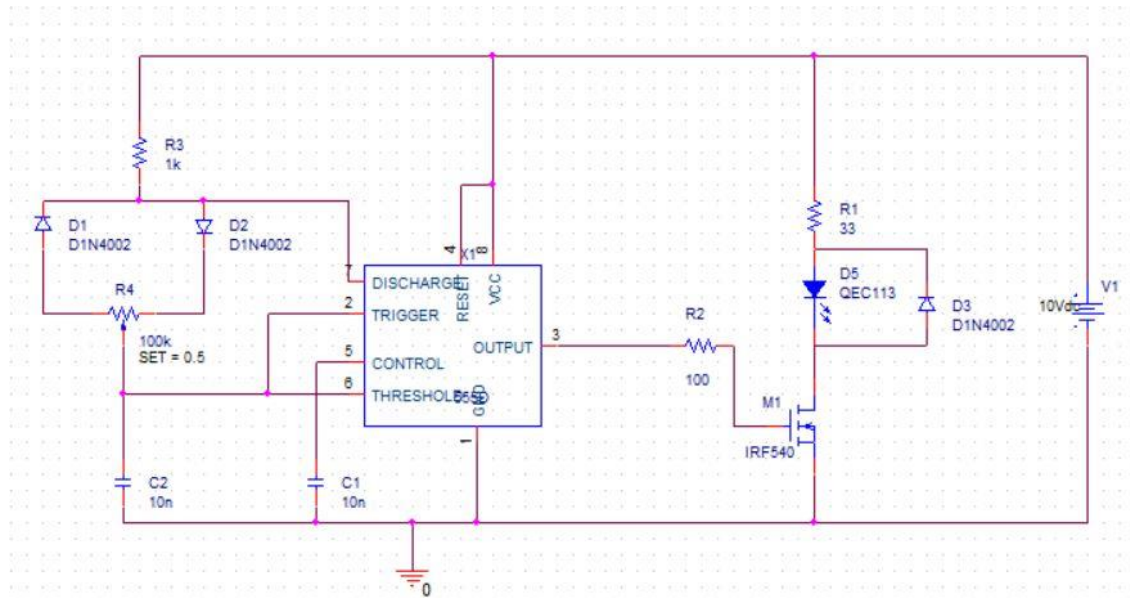


Figura 95. Generador PWM con NE555 configurado como astable que controla luminosidad de un led de potencia

Se pide:

1. Representar, para un ciclo de trabajo del 50%, la tensión a la salida del 555 y mida el valor de la frecuencia. ¿Se aproxima al valor calculado?
2. Represente, para un ciclo de trabajo del 75%, el valor de tensión a la salida del 555 y compárelo con el del condensador. ¿Se aproxima a lo obtenido en la simulación? Mida el tiempo que permanece la salida en estado alto, bajo y halle el valor medio
3. Realice de nuevo el apartado 2 pero para un ciclo de trabajo del 25%.
4. Analice las componentes armónicas a través del análisis FFT en la función MATH que incorpora el osciloscopio para un ciclo de trabajo del 75% y 25%

Solución:

8.3.7. Montaje del circuito en Tinkercad

Como medida para poder representar visualmente el circuito y obtener representaciones de señales representativas (en ningún caso se podrán realizar mediciones).

Esta potente herramienta online y de libre distribución desarrollada por Autodesk Inc, está enfocada al ámbito educativo para la simulación de circuitos y representaciones más gráficas de su funcionamiento.

En esta página de simulaciones de circuitos online, podremos contar con multitud de componentes de montaje para así ser capaz de realizar todo tipo de montajes podremos encontrar fuentes de alimentación, aparatos de medida, componentes pasivos, microcontroladores, sensores y un largo etc. Para crear los circuitos, lo único que tendrá que hacer es crear una cuenta en Autodesk y una vez dentro de la página Tinkercad, diseñar un circuito. Es una herramienta muy sencilla de usar, de ahí que su uso esté orientado al ámbito docente.

Para situaciones vividas como la actual pandemia Covid-19, podría ser usada para ver el funcionamiento experimental de los circuitos creando los montajes que normalmente, serían montados por el alumno en los laboratorios.

Se pide:

Monte el circuito de la figura 41 de igual forma que lo haría en el laboratorio. Seleccione los valores de los componentes y simule el circuito. Una vez tenga montado el circuito:

1. Represente para un ciclo de trabajo del 25%, 50% y 75% aproximadamente la tensión a la salida y en el condensador mediante el instrumento Osciloscopio que se encuentra en Tinkercad. Compare, para cada valor, la luminosidad del LED. Explique brevemente cómo se comporta el circuito.
2. Para cada ciclo de trabajo, mostrar el valor medio medido a la salida y explicar cómo influencia valor de la luminosidad del LED.
3. Cambie el LED por un motor DC y observe, los valores de RPM que ofrece para los diferentes ciclos de trabajo.

Solución:**8.3.8. Comparación de resultados**

Por último, establezca una comparación entre los resultados teóricos, simulados y experimentales.

8.3.8.1. Comparación de valores en estado alto, bajo y tensión media a la salida para DT 25% y 75%

	DC 75%		
	TH (ms)	TL(ms)	Vmedia(V)
Teórico			
Simulación			
Experimental			

	DC 25%		
	TH (ms)	TL(ms)	Vmedia(V)
Teórico			
Simulación			
Experimental			

8.3.8.2. Comparación de medida de componentes armónicos de señal para DT 25% y 75%

	DC 75%			
	Componente DC	Fundamental	Armónico 3	Armónico 5
Teórico				
Simulación				
Experimental				

	DC 25%			
	Componente DC	Fundamental	Armónico 3	Armónico 5
Teórico				
Simulación				
Experimental				

8.4. Modulación PWM basada en circuito integrado NE 555 configurado como astable. Análisis teórico, práctico y simulaciones. Guion del profesor.**8.4.1. Introducción y fundamentos teóricos**

En esta práctica, se va a proceder al diseño, simulación y montaje de una señal PWM para controlar distintos dispositivos, así como el análisis y comparación de valores obtenidos mediante el análisis a través de las series de Fourier de las componentes armónicas de señal.

El montaje se caracterizará por un temporizador IC 555 configurados tanto en modo astable, como en un montaje basado en un modo monoestable.

Con la realización de esta práctica, se espera iniciarnos en la modulación PWM a través de un montaje de carácter sencillo en el que el alumno será capaz de comprender el funcionamiento de una señal modulada en ancho de pulso.

8.4.1.1. Modulación de ancho de pulso (PWM)

La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM), surge de la necesidad de establecer un control a altas frecuencias variando el ciclo de trabajo de una señal. Se tienen multitud de aplicaciones ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga hasta para conmutar inversores.

Entonces, una señal PWM se basa en una señal que conmuta en valores discretos. Variando su Duty Cycle (DT) seremos capaces de modificar el valor de tensión (o corriente) media que se le aplique a una carga. Es decir, si la amplitud de una señal es de 5 V y se le aplica un duty cycle del 100%, a la salida entregará los 5V a la carga. En cambio, si se con un duty cycle del 50%, se entregará a la carga 2.5V.

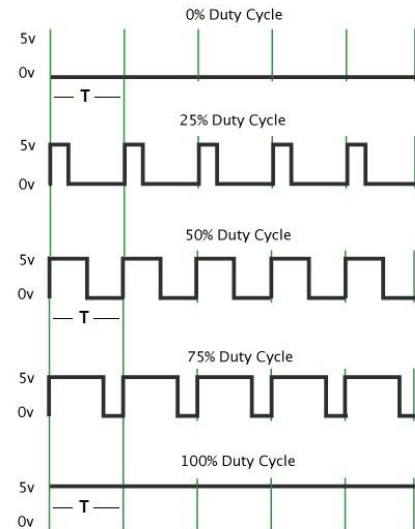


Figura 96. Muestra de Duty Cycle en señal PWM

Este tipo de modulación, surge de la necesidad de generar una señal en la que los armónicos y la frecuencia fundamental estén muy separadas. Este método, es usado para la regulación interna en inversores (ya que se necesitan tiempo de conmutación ínfimos entre otras especificaciones), como variador de frecuencia de motores DC etc.

Existen multitud de diseños de modulación PWM, nosotros nos vamos a centrar en un circuito que genera una señal PWM a través de un temporizador 555 configurado como astable.

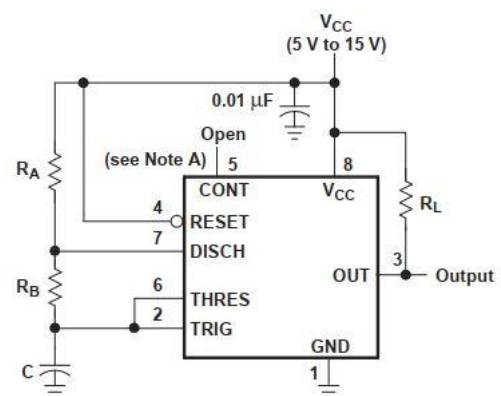


Figura 97. Temporizador 555 configurado en modo astable [3]

8.4.1.2. Temporizador ICI 555

Este componente es un circuito temporizador de precisión que es capaz de producir tiempos de retardo y oscilaciones precisas. Existen dos maneras de configurar este temporizador:

- **Modo astable**
- **Modo monoestable**

En modo monoestable, el intervalo de tiempo es controlado por una sola conexión a una línea de resistencia y condensador externa. En cambio, si se configura en modo astable la frecuencia y el duty cycle pueden ser controlados independientemente con dos resistencias y un condensador externos.

Internamente, el temporizador 555 se componen de dos comparadores, un biestable, un transistor de descarga y un divisor de voltaje. El funcionamiento es el siguiente.

El divisor de voltaje resistivo se utiliza para establecer los niveles de voltaje en el comparador. Consecuentemente, el comparador alto tiene una referencia de $\frac{2}{3} V_{cc}$ y el bajo tiene una referencia de $\frac{1}{3} V_{cc}$. Las salidas de los comparadores controlan el estado del biestable. Cuando el voltaje de disparo se reduce por debajo de $\frac{1}{3} V_{cc}$, el biestable, se inicia y la salida salta a un nivel alto. La entrada de umbral normalmente está conectada a un circuito temporizador RC externo. Cuando el voltaje en el capacitor externo excede de $\frac{2}{3} V_{cc}$, el comparador alto reestablece el biestable, el que a su vez regresa la salida a su nivel bajo. Cuando la salida del dispositivo es baja, el transistor de descarga se enciende y proporciona una trayectoria para la descarga rápida del capacitor de temporización externo.

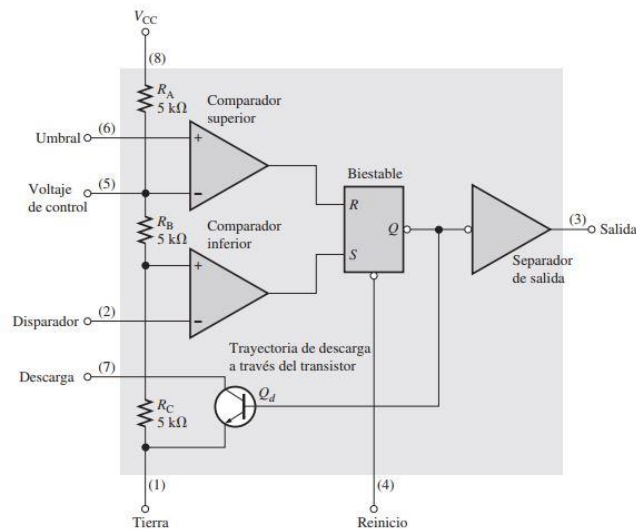


Figura 98. Diagrama interno 555 [4]

8.4.2. Objeto de la práctica

Los objetivos de la práctica pueden resumirse en:

4. Analizar señales moduladas en ancho de pulso a través de los diferentes tipos de análisis que se proponen.
5. Comprobar el funcionamiento y aplicación de la señal PWM generado con un temporizador de precisión IC 555 generado como astable.
6. Analizar las componentes armónicas de señales PWM de ciclo de trabajo variable a través de las series de Fourier.

Los resultados del aprendizaje son:

4. Adquirir la habilidad de realizar cálculos teóricos para diseñar montajes que generen una señal PWM.
5. Realizar montajes sencillos que permitan generar señales PWM para su posterior uso.
6. Ser capaz de analizar las componentes armónicas de las señales generadas.

8.4.3. Descripción básica

En esta práctica, se va a proceder al diseño, simulación y montaje de una señal PWM con un temporizador de precisión IC 555 configurado como astable en la que el alumno ha de ser capaz de fijar los valores para que la señal a la salida se adapte a sus necesidades.

8.4.3.1. Descripción temporizador 555 como astable

En la figura 3, se muestra la disposición del temporizador de precisión 555 configurado como astable. Esta configuración elegida, los componentes externos como son R_a , R_b y C fijarán la frecuencia de oscilación a la salida. El condensador de 0.01 μF conectado en la patilla 5, servirá única y exclusivamente para el desacoplamiento y no tendrá efecto en la operación.

A continuación, se ofrece una breve explicación de cómo será el proceso que se siga para generar la señal PWM prevista.

Este modelo, añadiendo la resistencia R_b como pueden apreciar en la figura 3, y conectando el pin 2 y 6 (Trigger y Threshold), provocarán que el mismo se autodispare a diferencia de la señal PWM generada en el apartado 4 que era necesario introducir una señal de reloj que disparase nuestro circuito.

El condensador, se cargará a través de R_a y R_b y se descargará solo a través de R_b . El ciclo de trabajo será controlado por los valores de R_a y R_b .

La salida del 555 se basará en las operaciones de carga y descarga del condensador, estos valores de carga y descarga estarán comprendidos entre $1/3 V_{cc}$ y $2/3 V_{cc}$. Cuando la operación de carga del condensador llega a $2/3 V_{cc}$, a la salida inmediatamente se establecerá nivel bajo hasta que se alcance $1/3 V_{cc}$ que cambiará su valor a estado alto. Esto conformará una onda cuadrada con ciclo de trabajo variable dependiente de los valores R_a y R_b .

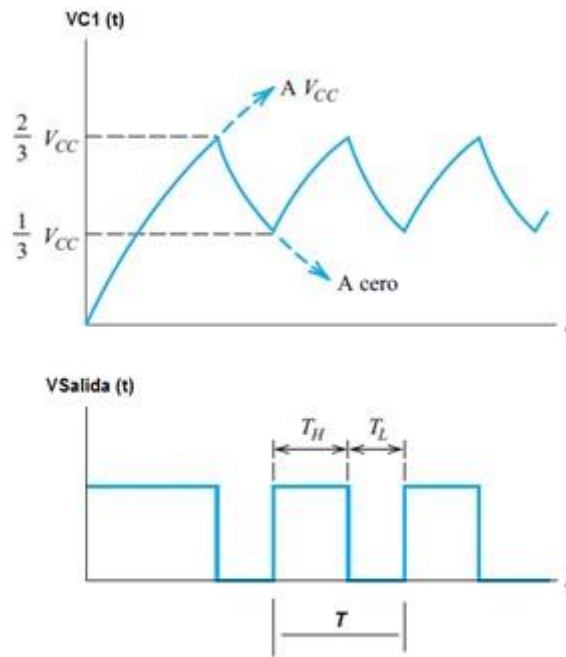


Figura 99. Comparación de tensión en condensador y tensión a la salida en NE 555 [4]

La frecuencia de oscilación a la salida vendrá definida por la siguiente expresión.

$$f = \frac{1.44}{(R_a + 2R_b) \times C} \quad [Ec. 5]$$

Seleccionando los valores de R_a y R_b , podremos ajustar el ciclo de trabajo. Como C se carga a través de R_a y R_b y se descarga solo a través de R_b , se pueden obtener ciclos de trabajo próximos al 50% si se cumple que $R_b \gg R_a$ por lo que los tiempos de carga y descarga serán prácticamente iguales.

Una fórmula para calcular el ciclo de trabajo se desarrolla de la siguiente manera. El tiempo en que la salida se encuentre en estado alto, es el tiempo que lleva a C a cargarse desde $\frac{1}{3} V_{CC}$ hasta $\frac{2}{3} V_{CC}$ [4].

$$t_H = 0.693(R_a + R_b) \times C \quad [Ec. 6]$$

En la figura 26 podemos observar gráficamente los valores de $R_a + 2R_b$ y C que fijarán distintas frecuencias de oscilación a la salida.

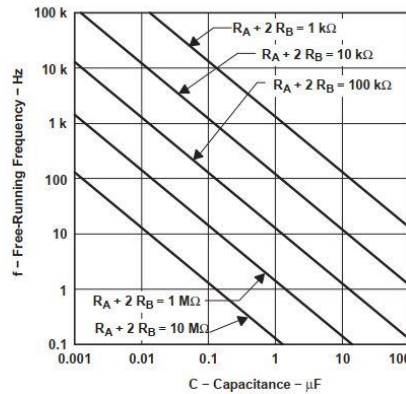


Figura 100. Tabla de valores de componentes para NE555 configurado como astable

Como el tiempo que se encuentra en estado bajo solo depende de la resistencia R_B , la expresión que definirá este tiempo es:

$$t_L = 0.693 \times R_B \times C \quad [Ec. 7]$$

El periodo de la señal de salida, corresponderá a la suma de los valores del tiempo que se encuentra en estado alto y estado bajo.

Por último, el ciclo de trabajo vendrá fijado por la siguiente expresión.

$$DT(\%) = \frac{t_H}{t_H + t_L} \times 100 \quad [Ec. 8]$$

8.4.3.2. Análisis de Fourier de una señal PWM

Es necesario realizar un estudio en espectro de frecuencia de las señales PWM para poder cuantificar la calidad que obtendrá esta modulación a su salida. Es prioritario conseguir un contenido armónico de señal lo más pequeño posible.

Para efectuar un análisis de componentes armónicas de señal, será necesario acudir a las transformadas de Fourier. Para este tipo de señales la transformada de Fourier para hallar los valores de las componentes armónicas serán las siguientes.

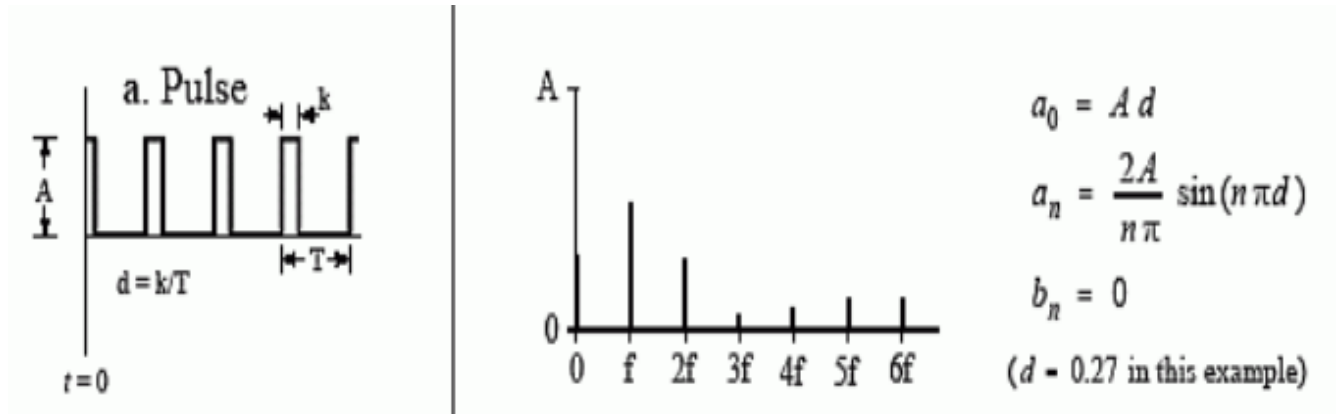


Figura 101. Ejemplo descomposición de Fourier para señal pulsante

El que no exista término b_n , será indicativo de que la señal pulsante, podrá ser reconstruida en su totalidad por señales seno sin necesidad de usar señales coseno.

8.4.4. Análisis teórico

En nuestro caso, vamos a generar la señal PWM con el 555 configurado como astable para variar la intensidad de luminosidad de un led de potencia de 1W.

El circuito resultante será el siguiente.

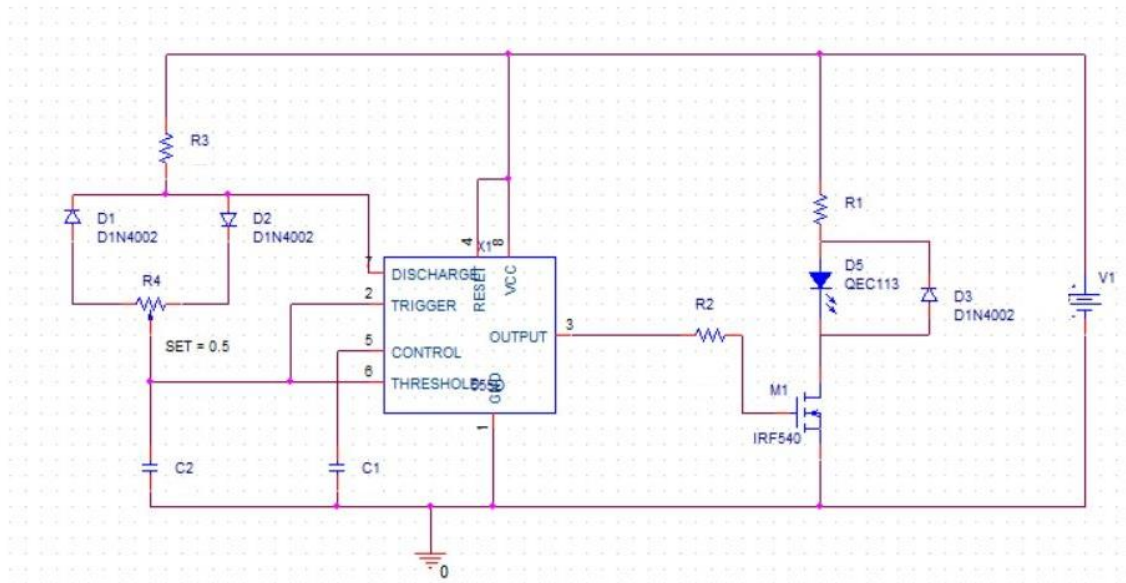


Figura 102. Circuito generador de señal PWM con NE555 configurado como astable

Este circuito está basado, como se señaló con anterioridad, en un montaje de 555 configurado como astable. Pero podemos observar, qué en este caso, tenemos algunas diferencias.

La resistencia R_b , se va a sustituir por un potenciómetro y dos diodos. Los diodos permitirán que haya dos caminos, uno para carga y otro para descarga. El potenciómetro, a su vez, será el encargado de variar el ciclo de trabajo a la salida. El condensador añadido a la patilla 5 (C_1) se encargará de eliminar el ruido de alta frecuencia.

Cuestión:

Basándose en la gráfica de la figura (FIGURA DE LA GRAFICA CONFIGURADA COMO ASTABLE), escoja los valores que estime oportunos para generar una señal PWM a la salida a la frecuencia deseada. Conocido los valores del condensador conectado al pin de Control (5) $100nF$, la tensión de alimentación de $10V$ y el potenciómetro de $100k\Omega$.

Realice los cálculos teóricos que se piden a continuación:

5. Calcule el tiempo que permanece en estado alto y bajo la tensión a la salida para un ciclo de trabajo del 75%.
6. Para un ciclo de trabajo del 25%, vuelva a calcular el tiempo que permanecerá en estado alto y bajo la señal.
7. Para los dos ciclos de trabajo que se mencionan en los apartados anteriormente, halle la tensión media que tendrá la señal modulada en ancho de pulso.
8. Analice las componentes armónicas 1, 3 y 5 a través de las series de Fourier para los ciclos de trabajo anteriormente mencionados.

Solución:

Para este caso, se han escogido un valor de potenciómetro de 100 kΩ, una resistencia de 1 kΩ y un condensador de 10nF. Esto provocará que a la salida, obtengamos una señal con una frecuencia en torno a 1 KHz. Variando el valor del potenciómetro, lo que variaremos será el tiempo que se encuentra en estado alto la señal, pero siempre permanecerá invariante la frecuencia.

1. Calcule el tiempo que permanece en estado alto y bajo la tensión a la salida para un ciclo de trabajo del 75%.

El tiempo que pasa en estado alto y en estado bajo la señal la señal para el ciclo de trabajo anterior será.

$$t_H = 0.693(Ra + Rb * D) \times C = 0.693(1k + 100k * 0.75) * 10nF = 0.5267 \text{ ms}$$

$$t_L = 0.693 \times Rb \times (1 - D) \times C = 0.693 * 100k * (1 - 0.75) * 10nF = 0.17325 \text{ ms}$$

2. Para un ciclo de trabajo del 25%, vuelva a calcular el tiempo que permanecerá en estado alto y bajo la señal.

El tiempo que permanecerá en estado alto y bajo, calculado teóricamente será el siguiente.

$$t_H = 0.693(Ra + Rb * D) \times C = 0.693(1k + 100k * 0.25) * 10nF = 0.18018 \text{ ms}$$

$$t_L = 0.693 \times Rb \times (1 - D) \times C = 0.693 * 100k * (1 - 0.25) * 10nF = 0.51975 \text{ ms}$$

3. Para los dos ciclos de trabajo que se mencionan en los apartados anteriormente, halle la tensión media que tendrá la señal modulada en ancho de pulso.

Para un ciclo de trabajo del 75% el valor de la tensión media entregada a la carga será:

$$V_{media} = V_{max} \times D = 10 \text{ V} \times 0.75 = 7.5 \text{ V}$$

Para un ciclo de trabajo del 25% el valor de la tensión media entregada a la carga será:

$$V_{media} = V_{max} \times D = 10 \text{ V} \times 0.25 = 2.5 \text{ V}$$

4. Analice las componentes armónicas a través de las series de Fourier para los ciclos de trabajo anteriormente mencionados.

Para un ciclo de trabajo del 75%, la descomposición de Fourier será la siguiente:

- **Componente DC**

$$a_0 = 10 * 0.75 = 7.5 \text{ V}$$

- **N=1:**

$$a_n = \frac{2 \text{ V}}{n \pi} \text{sen}(n\pi D) = \frac{2 * 10}{1 \pi} \text{sen}(1 * \pi * 0.75) = 4.5 \text{ V}$$

- **N=3:**

$$a_n = \frac{2 \text{ V}}{n \pi} \text{sen}(n\pi D) = \frac{2 * 10}{3 \pi} \text{sen}(3 * \pi * 0.75) = 1.5 \text{ V}$$

- **N=5:**

$$a_n = \frac{2 V}{n \pi} \text{sen}(n\pi D) = \frac{2 * 10}{5 \pi} \text{sen}(5 * \pi * 0.75) = 0.9 V$$

Para un ciclo de trabajo del 25%, la descomposición de Fourier será la siguiente:

- **Componente DC**

$$a_0 = 10 * 0.25 = 2.5 V$$

- **N=1:**

$$a_n = \frac{2 V}{n \pi} \text{sen}(n\pi D) = \frac{2 * 10}{1 \pi} \text{sen}(1 * \pi * 0.25) = 4.5 V$$

- **N=3:**

$$a_n = \frac{2 V}{n \pi} \text{sen}(n\pi D) = \frac{2 * 10}{3 \pi} \text{sen}(3 * \pi * 0.25) = 1.5 V$$

- **N=5:**

$$a_n = \frac{2 V}{n \pi} \text{sen}(n\pi D) = \frac{2 * 10}{5 \pi} \text{sen}(5 * \pi * 0.75) = 0.9 V$$

8.4.5. Simulaciones

Diseñe en Orcad Pspice el circuito que se genere la señal PWM con el temporizador IC 555 con los valores fijados durante el análisis teórico:

Simule el circuito y responda a las preguntas que se declaran a continuación.

7. ¿Se aproxima el valor obtenido de frecuencia a la salida con el que ha impuesto? Represente la tensión a la salida del 555.

8. Para un ciclo de trabajo del 75%, compare la señal a la salida con la tensión en el condensador. Explique brevemente que es lo que sucede.
9. Represente el tiempo que permanece en estado alto y bajo la tensión a la salida para ese mismo ciclo de trabajo.
10. Para un ciclo de trabajo del 25%, realice de nuevo los dos apartados anteriores.
11. Para los dos ciclos de trabajo que se mencionan en los apartados anteriormente, represente la tensión media y exponga una breve explicación.
12. Analice las componentes armónicas para los ciclos de trabajo anteriormente mencionados.

Solución:

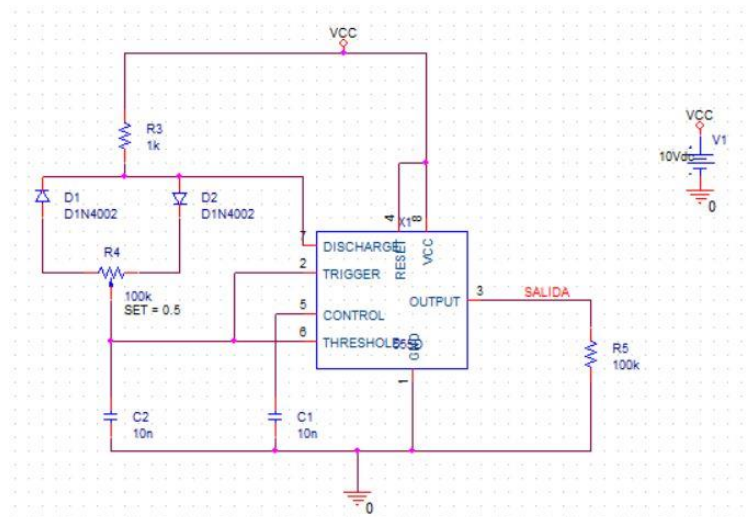


Figura 103. Diseño para la simulación en Orcad PSpice

Respondiendo a la primera pregunta, teóricamente se ha fijado un valor de frecuencia a la salida de 1KHz. Representando la señal a la salida para un ciclo de trabajo del 50%. Para visualizar correctamente la medida, estableceremos un perfil de simulación para 2 ms.

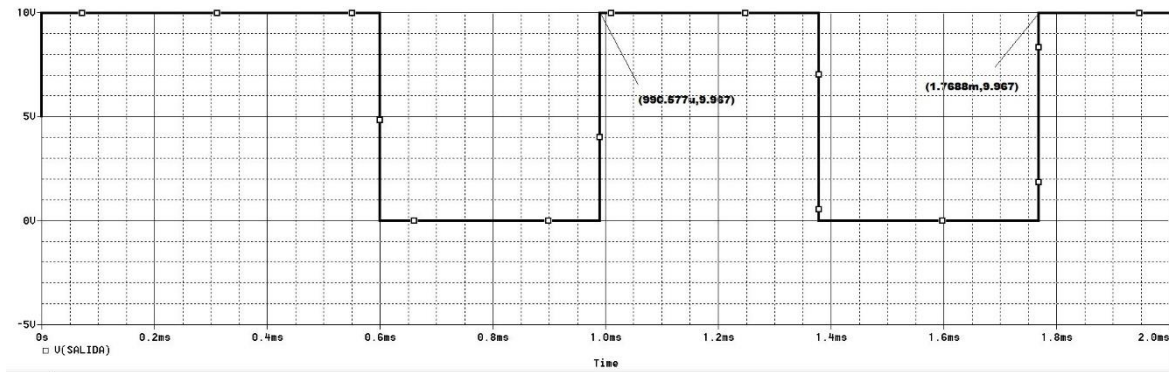


Figura 104. Señal a la salida con Duty Cycle 50%

Se puede observar que el periodo de la señal es:

$$T = 1.7688 \text{ ms} - 990.577 \text{ } \mu\text{s} = 0.77822 \text{ ms}$$

$$f_{\text{salida}} = \frac{1}{T} = \frac{1}{0.77822 \text{ ms}} = 1285 \text{ Hz}$$

El valor obtenido de la frecuencia a la salida, dista del valor prefijado de 1KHz. Esto se debe a la elección de los componentes que provocarán que el valor obtenido sea superior.

Por ello, para la realización del análisis de Fourier, se ha de tener en cuenta esta variación del valor de frecuencia por lo que habrá que tener en cuenta que el valor fundamental de frecuencia es 1285 Hz.

Para un ciclo de trabajo del 75%:

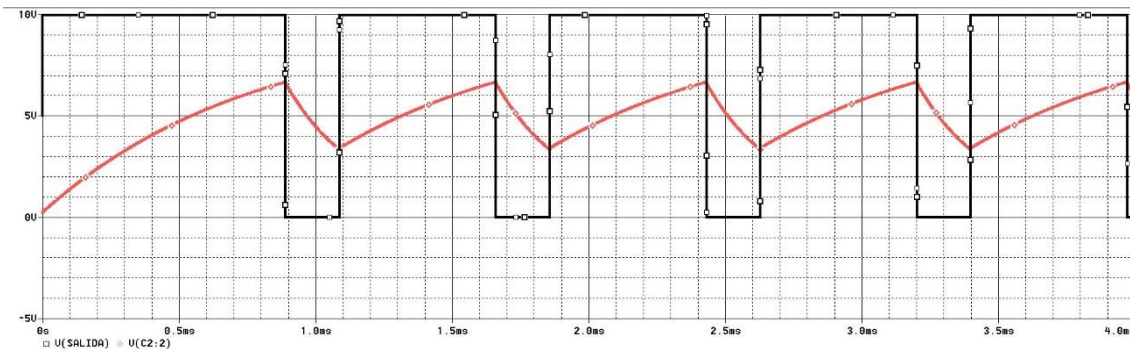


Figura 105. Comparativa de señal a la salida con valor de tensión en el condensador para Duty Cycle 75%

Como podemos apreciar, en la operación de carga del condensador, a la salida se obtendrá nivel alto hasta que alcance $2/3 V_{cc}$ en el que, instantáneamente, pasará a descargarse, y la salida a su vez, pasará a nivel bajo hasta que el valor de la tensión en el condensador alcance el valor de $1/3$ de V_{cc} .

A continuación, se presentan los valores simulados correspondientes al tiempo que se encuentra en estado alto y bajo para un ciclo de trabajo del 75% son:

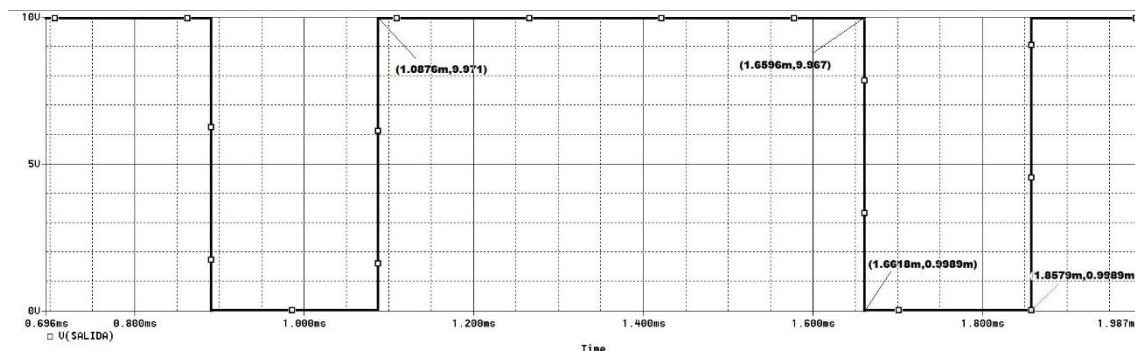


Figura 106. Tiempo en estado alto y bajo de señal a la salida con Duty Cycle 75%

$$t_H = 1.6596m - 1.0876m = 0.572 \text{ ms}$$

$$t_L = 1.8579m - 1.6618m = 0.1961 \text{ ms}$$

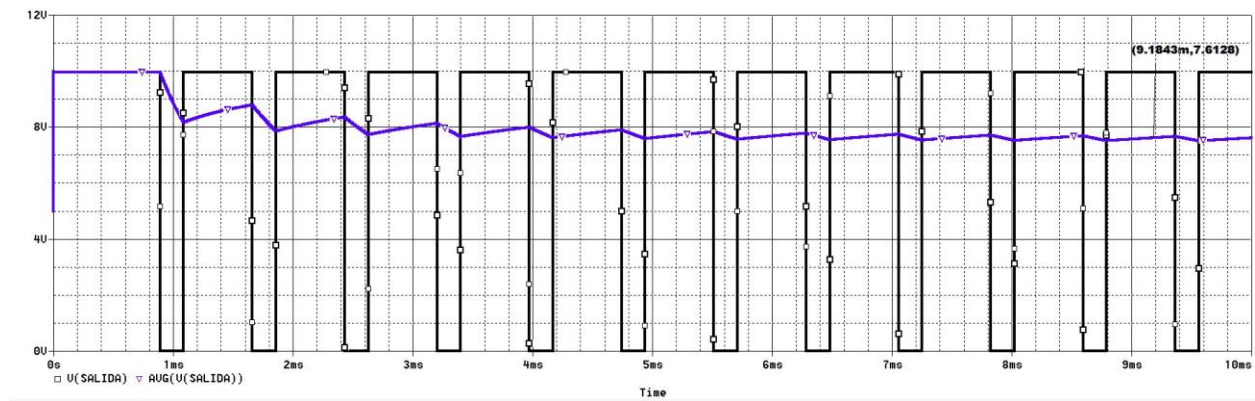


Figura 107. Tensión media a la salida para Duty Cycle del 75%

El valor de la tensión media a la salida arrojado por la simulación 7.6128 V.

El análisis de Fourier para la señal de salida con un ciclo de trabajo de 75% será el siguiente.

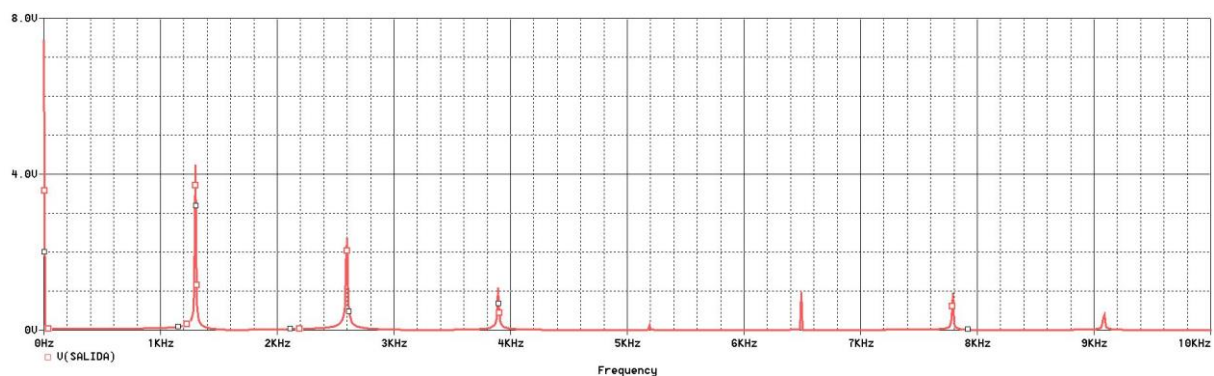


Figura 108. Análisis FFT a señal a la salida para Duty Cycle 75%

Los valores obtenidos por la simulación son:

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V (SALIDA)

DC COMPONENT = 7.4526E+00

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	1.2800E+03	4.5187E+00	1.0000E+00	9.1382E+01	0.0000E+00
2	2.5600E+03	3.1720E+00	7.0197E-01	-8.7235E+01	-2.7000E+02
3	3.8400E+03	1.4626E+00	3.2368E-01	9.4147E+01	-1.8000E+02
4	5.1200E+03	4.5921E-02	1.0162E-02	9.5530E+01	-2.7000E+02
5	6.4000E+03	9.2915E-01	2.0562E-01	-8.3088E+01	-5.4000E+02
6	7.6800E+03	1.0564E+00	2.3380E-01	9.8295E+01	-4.5000E+02
7	8.9600E+03	6.0763E-01	1.3447E-01	-8.0323E+01	-7.2000E+02
8	1.0240E+04	4.5902E-02	1.0158E-02	-7.8940E+01	-8.1000E+02
9	1.1520E+04	5.2989E-01	1.1727E-01	1.0244E+02	-7.2000E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 8.5236E+01 PERCENT

Figura 109. Análisis FFT en archivo Output file de la señal de salida con Duty Cycle 75%

A continuación, se modifica el ciclo de trabajo al 25% y se procede a realizar de nuevo los apartados 2 y 3 pero para este valor.

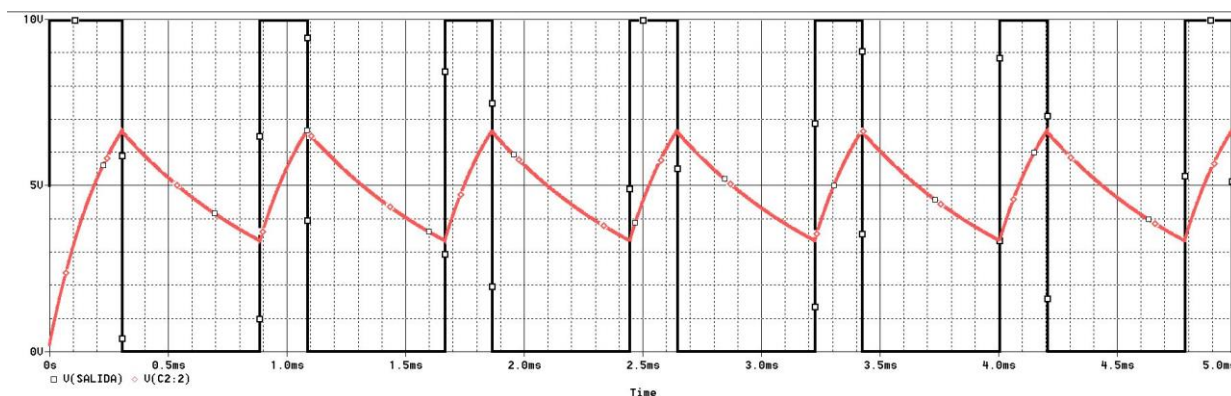


Figura 110. Representación de tensión a la salida frente a tensión en el condensador para Duty Cycle 25%

Para este ciclo de trabajo, se observa que el tiempo de descarga aumenta, es decir, se tarda más en alcanzar el valor de $1/3 V_{cc}$ que en alcanzar, en la carga, el de $2/3 V_{cc}$. Esto se traduce en que a la salida, se permanece más tiempo a estado bajo que en estado alto.

El tiempo que permanecerá en estado alto y bajo, calculado teóricamente será el siguiente.

$$t_H = 0.693(Ra + Rb * D) \times C = 0.693(1k + 100k * 0.25) * 10nF = 0.18018 \text{ ms}$$

$$t_L = 0.693 \times Rb \times (1 - D) \times C = 0.693 * 100k * (1 - 0.25) * 10nF = 0.51975 \text{ ms}$$

Los valores arrojados por la simulación son:

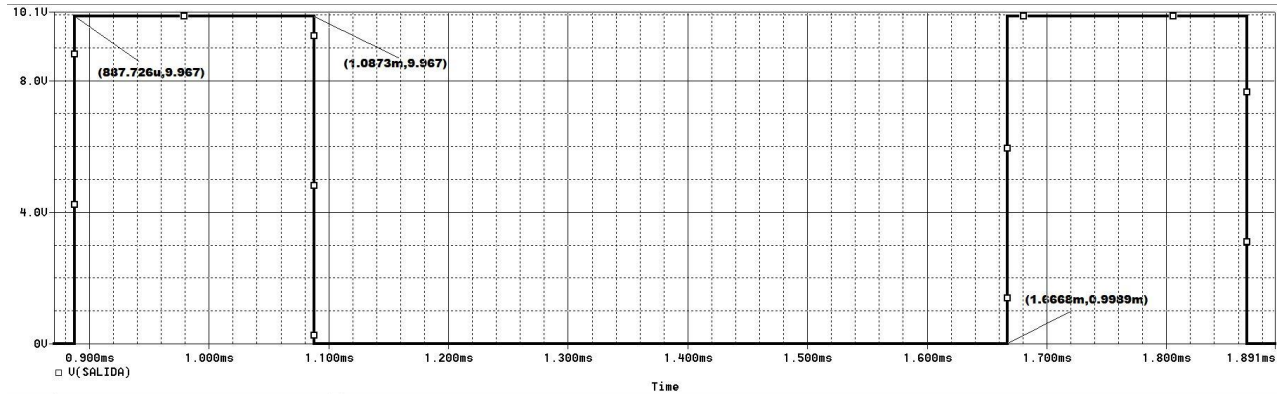


Figura 111. Tiempo en estado alto y bajo de señal a la salida con Duty Cycle 25%

$$t_H = 1.0873m - 887.726m = 0.19957 \text{ ms}$$

$$t_L = 1.6668m - 1.0873m = 0.5795 \text{ ms}$$

La tensión media que se entrega a la salida será:

$$V_{media} = V_{max} \times D = 10 \text{ V} \times 0.25 = 2.5 \text{ V}$$

Los datos arrojados por la simulación.

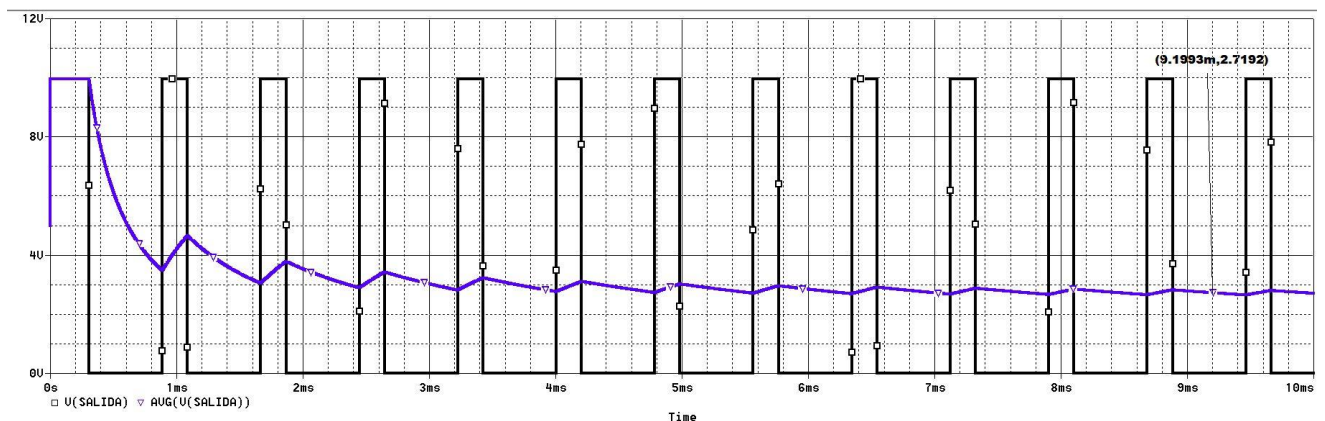


Figura 112. Tensión media a la salida para Duty Cycle del 25%

En la simulación, el valor de la tensión media a la salida es de 2.7192 V.

El análisis de Fourier a la salida para un ciclo de trabajo del 25 % es.

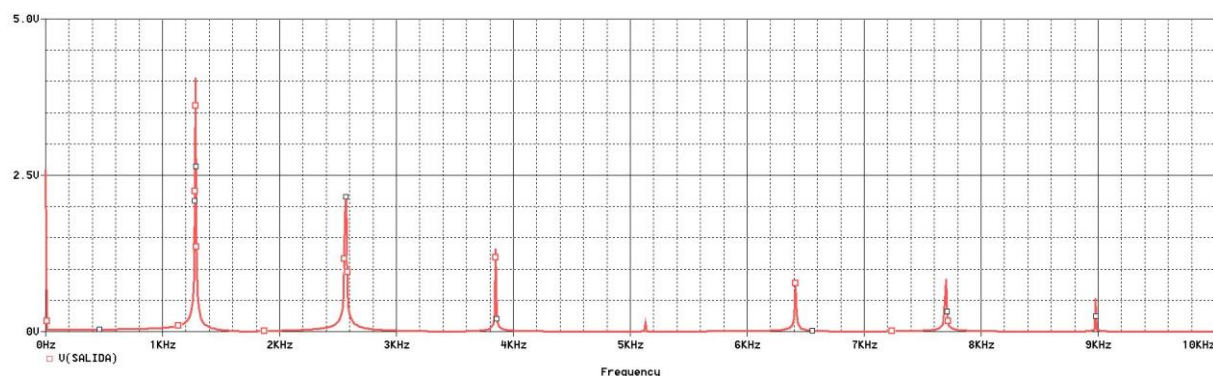


Figura 113. Análisis FFT a señal a la salida para Duty Cycle 25%

Los valores obtenidos por la simulación son:

FOURIER COMPONENTS OF TRANSIENT RESPONSE V(SALIDA)

DC COMPONENT = 2.5767E+00

HARMONIC NO	FREQUENCY (HZ)	FOURIER COMPONENT	NORMALIZED COMPONENT	PHASE (DEG)	NORMALIZED PHASE (DEG)
1	1.2800E+03	4.6038E+00	1.0000E+00	9.1521E+01	0.0000E+00
2	2.5600E+03	3.1678E+00	6.8809E-01	9.3041E+01	-9.0000E+01
3	3.8400E+03	1.3718E+00	2.9796E-01	9.4562E+01	-1.8000E+02
4	5.1200E+03	1.6808E-01	3.6509E-02	-8.3917E+01	-4.5000E+02
5	6.4000E+03	1.0081E+00	2.1897E-01	-8.2396E+01	-5.4000E+02
6	7.6800E+03	1.0441E+00	2.2678E-01	-8.0876E+01	-6.3000E+02
7	8.9600E+03	5.1149E-01	1.1110E-01	-7.9355E+01	-7.2000E+02
8	1.0240E+04	1.6714E-01	3.6304E-02	1.0217E+02	-6.3000E+02
9	1.1520E+04	6.0228E-01	1.3082E-01	1.0369E+02	-7.2000E+02

TOTAL HARMONIC DISTORTION = 8.3291E+01 PERCENT

Figura 114. Análisis FFT en archivo Output file de la señal de salida con Duty Cycle 25%

8.4.6. Método operativo

Una vez ha realizado los cálculos teóricos oportunos y su correspondiente simulación, se va a proceder al montaje del mismo para modificar el valor de la luminosidad del led variando el ancho de pulso de la señal PWM.

8.4.6.1. Lista de materiales

Los materiales a escoger para el montaje dependerán del diseño escogido por el alumno:

- 3 diodos D1N4002
- 1 resistencia de valor a convenir de 0.5W.
- 1 resistencia de valor a convenir de 0.5W.
- 1 resistencia de 33Ω de 25W.
- 1 potenciómetro de 100k Ω .
- 1 circuito integrado NE555.
- 1 condensador de valor a convenir.
- 1 condensador de 100nF.
- 1 MOSFET IRF540.
- 1 LED ProLight Opto blanco (PM2B-1LWE).
- 1 Placa de prototipos ProtoBoard.
- Osciloscopio Tektronix TPS2012B
- Fuente de alimentación Agilent E3631A.
- Cableado de banana para alimentación.
- 2 Sondas de osciloscopio Tektronix

Tener en cuenta la conexión del LED, mucho cuidado con la polaridad.



Figura 115. Led ProLight Opto Blanco

8.4.6.2. Montaje

El montaje a realizar con los datos calculados teóricamente sería el siguiente.

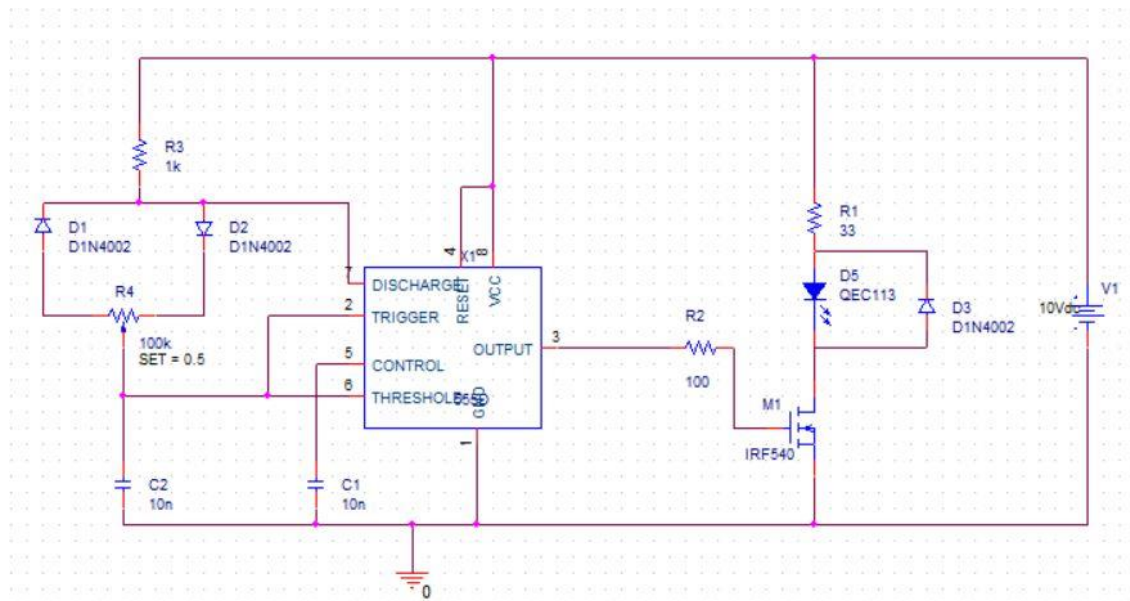


Figura 116. Generador PWM con NE555 configurado como astable que controla luminosidad de un led de potencia

Se pide:

5. Representar, para un ciclo de trabajo del 50%, la tensión a la salida del 555 y mida el valor de la frecuencia. ¿Se aproxima al valor calculado?
6. Represente, para un ciclo de trabajo del 75%, el valor de tensión a la salida del 555 y compárelo con el del condensador. ¿Se aproxima a lo obtenido en la simulación? Mida el tiempo que permanece la salida en estado alto, bajo y halle el valor medio
7. Realice de nuevo el apartado 2 pero para un ciclo de trabajo del 25%.
8. Analice las componentes armónicas a través del análisis FFT en la función MATH que incorpora el osciloscopio para un ciclo de trabajo del 75% y 25%

Solución:

Debido a la pandemia mundial COVID-19, no se ha podido acceder al laboratorio por lo que no se ha podido proceder al montaje y obtención de los datos experimentales.

8.4.7. Montaje del circuito en Tinkercad

Como medida para poder representar visualmente el circuito y obtener representaciones de señales representativas (en ningún caso se podrán realizar mediciones).

Esta potente herramienta online y de libre distribución desarrollada por Autodesk Inc, está enfocada al ámbito educativo para la simulación de circuitos y representaciones más gráficas de su funcionamiento.

En esta página de simulaciones de circuitos online, podremos contar con multitud de componentes de montaje para así ser capaz de realizar todo tipo de montajes podremos encontrar fuentes de alimentación, aparatos de medida, componentes pasivos, microcontroladores, sensores y un largo etc. Para crear los circuitos, lo único que tendrá que hacer es crear una cuenta en Autodesk y una vez dentro de la página Tinkercad, diseñar un circuito. Es una herramienta muy sencilla de usar, de ahí que su uso esté orientado al ámbito docente.

Para situaciones vividas como la actual pandemia Covid-19, podría ser usada para ver el funcionamiento experimental de los circuitos creando los montajes que normalmente, serían montados por el alumno en los laboratorios.

Se pide:

Monte el circuito de la figura 41 de igual forma que lo haría en el laboratorio. Seleccione los valores de los componentes y simule el circuito. Una vez tenga montado el circuito:

4. Represente para un ciclo de trabajo del 25%, 50% y 75% aproximadamente la tensión a la salida y en el condensador mediante el instrumento Osciloscopio que se encuentra en Tinkercad. Compare, para cada valor, la luminosidad del LED. Explique brevemente cómo se comporta el circuito.
5. Para cada ciclo de trabajo, mostrar el valor medio medido a la salida y explicar cómo influencia valor de la luminosidad del LED.
6. Cambie el LED por un motor DC y observe, los valores de RPM que ofrece para los diferentes ciclos de trabajo.

Solución:

A continuación, se muestra el circuito equivalente montado para realizar las mediciones y demostraciones oportunas.

El circuito en cuestión usado se puede encontrar en el siguiente link.

<https://www.tinkercad.com/things/ec5HX4ZBtxC-pwm-generator>

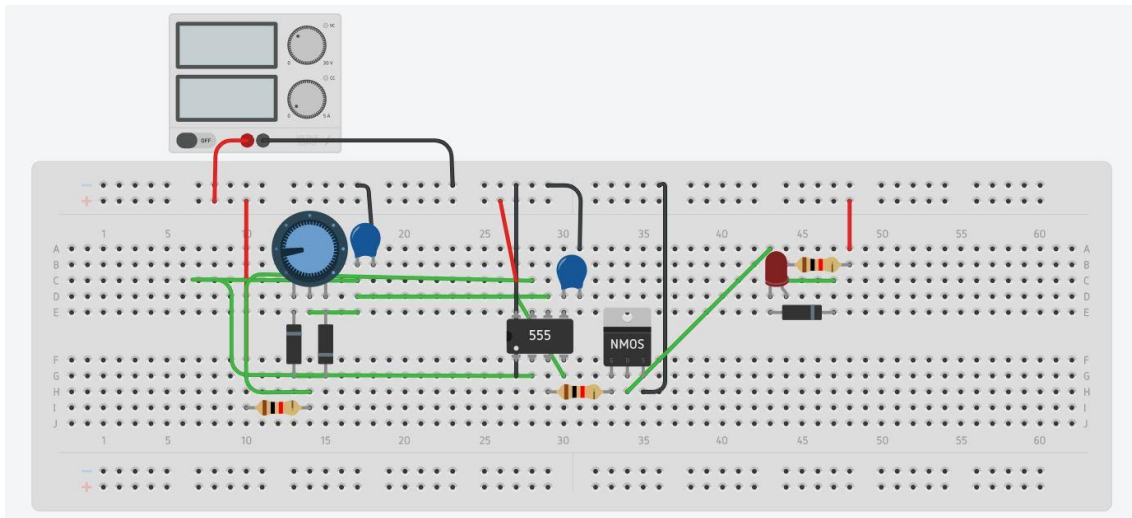


Figura 117. Circuito montado en Tinkercad

Al circuito en cuestión, añadimos, de la misma manera que se haría en el laboratorio, dos pantallas de osciloscopio (porque en este caso, cada osciloscopio es solo de un canal) y representamos.

Ciclo de trabajo del 25%:

A continuación, se muestran todas las gráficas oportunas así como la medición del valor medio a la salida.

Para ello, como la tensión requerida a la salida es de 1 KHz aproximadamente, en el osciloscopio seleccionamos un valor de tiempo por división de 1 ms.

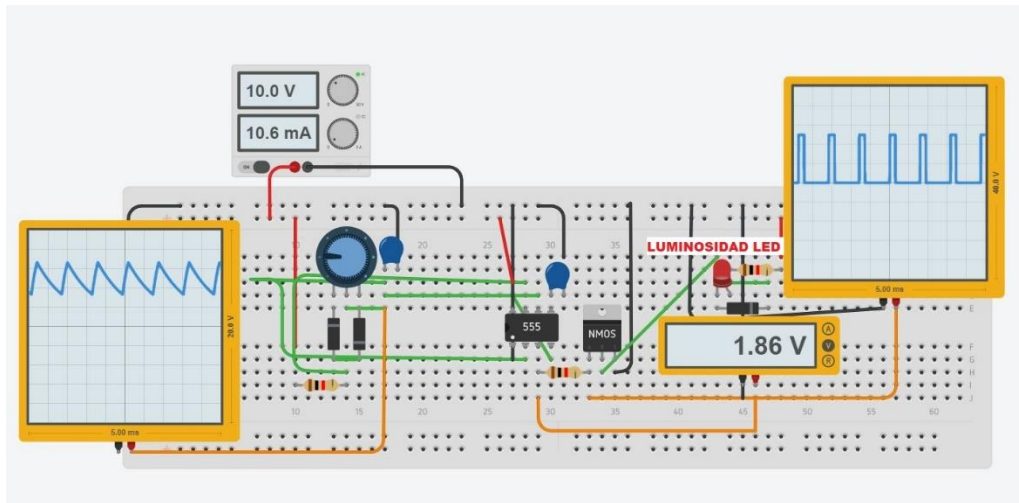


Figura 118. Tensión y valor medio de la misma a la salida, tensión en el condensador y luminosidad del led para duty cycle 25%

La tensión media y la luminosidad del LED se pueden apreciar en la figura 43.

A continuación, cambiamos el led por un motor de corriente continua y anotamos el valor de las revoluciones por minuto que ofrece a la salida.

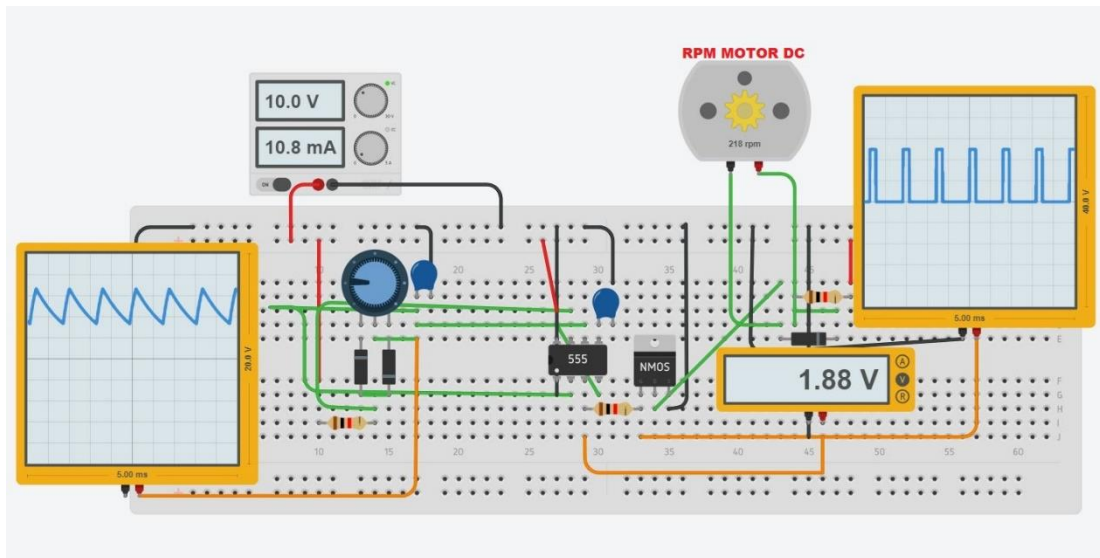


Figura 119. Tensión y valor medio de la misma a la salida, tensión en el condensador y rpm del motor para duty cycle 25%

Ciclo de trabajo del 50%:

Procedemos a realizar lo mismo que para el ciclo de trabajo del 50% variando el valor del potenciómetro.

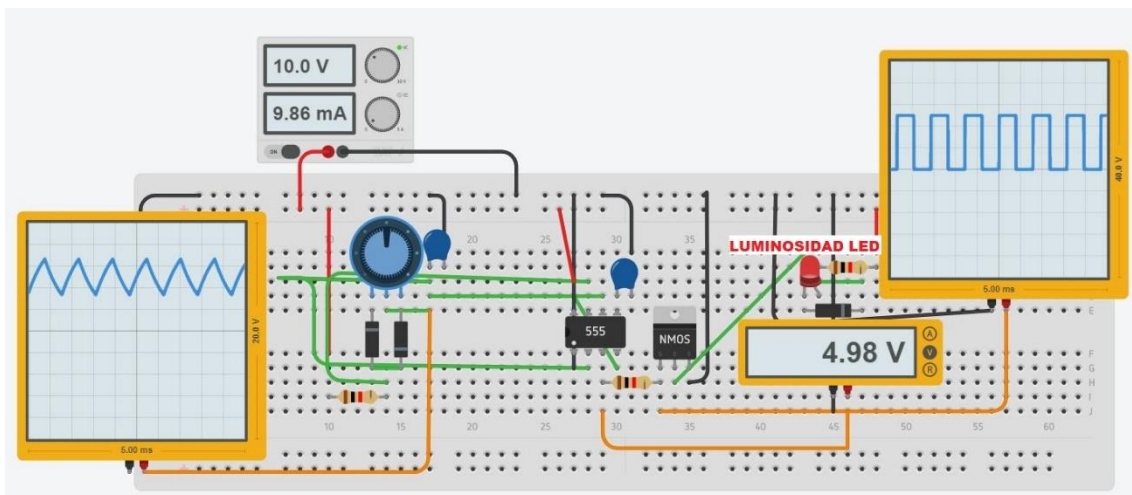


Figura 120. Tensión y valor medio de la misma a la salida, tensión en el condensador y luminosidad del led para duty cycle 50%

Cambiamos el LED por un motor de corriente continua y medimos las revoluciones por minuto del mismo.

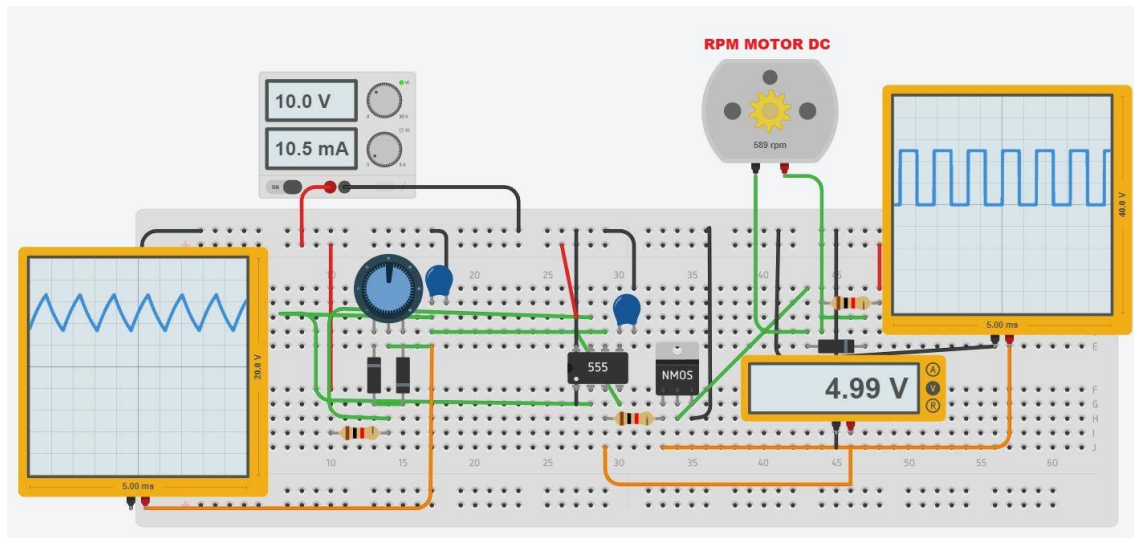


Figura 121. Tensión y valor medio de la misma a la salida, tensión en el condensador y rpm del motor para duty cycle 50%

Ciclo de trabajo del 75%:

Por último, para un ciclo de trabajo del 75%,

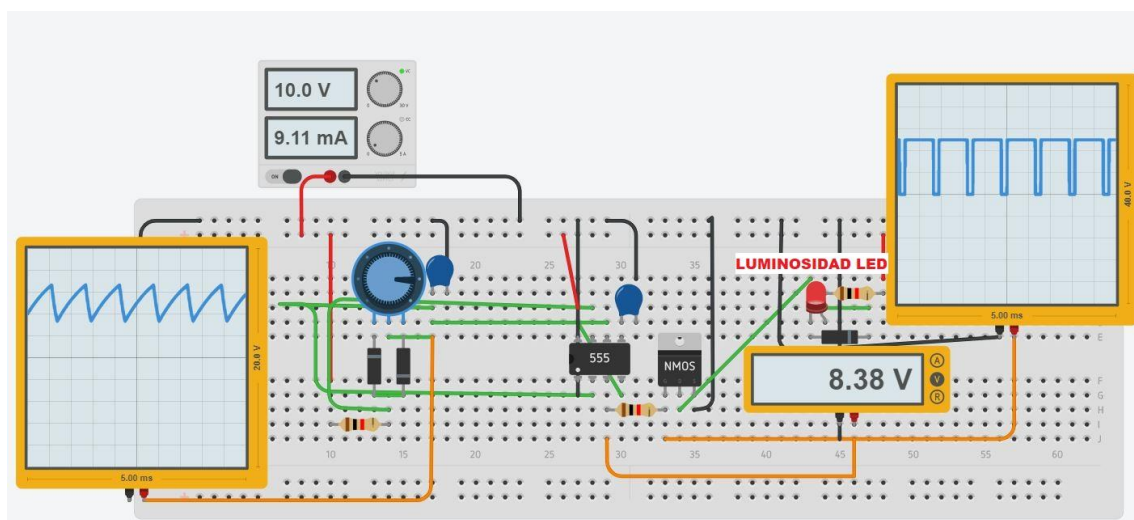


Figura 122. Tensión y valor medio de la misma a la salida, tensión en el condensador y luminosidad del led para duty cycle 75%

Cambiamos el led de nuevo para ver las revoluciones por minuto del motor:

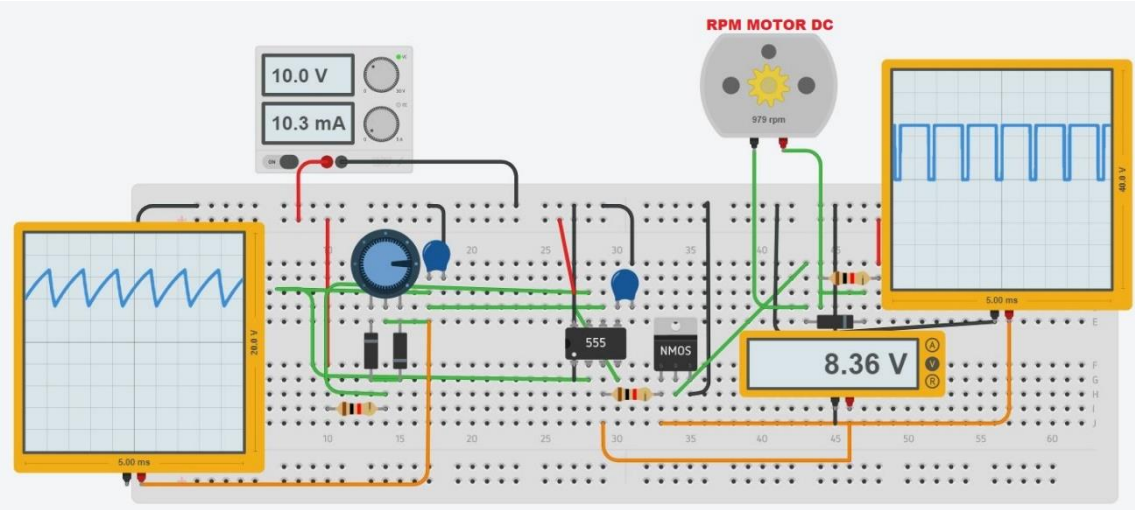


Figura 123.Tensión y valor medio de la misma a la salida, tensión en el condensador y rpm del motor para duty cycle 75%

8.4.8. Comparación de resultados

Por último, establezca una comparación entre los resultados teóricos, simulados y experimentales.

8.4.8.1. Comparación de valores en estado alto, bajo y tensión media a la salida para DT 25% y 75%

	DC 75%		
	TH (ms)	TL(ms)	Vmedia(V)
Teórico	0,5267	0,17325	7,5
Simulación	0,572	0,1961	7,6128
Experimental			

	DC 25%		
	TH (ms)	TL(ms)	Vmedia(V)
Teórico	0,18018	0,51975	2,5
Simulación	0,19957	0,5795	2,7192
Experimental			

8.4.8.2. Comparación de medida de componentes armónicos de señal para DT 25% y 75%

	DC 75%			
	Componente DC	Fundamental	Armónico 3	Armónico 5
Teórico	7.5 V	4.5 V	1.5 V	0.9 V
Simulación	7.4526 V	4.5187 V	1.4626 V	0.92915 V
Experimental				

	DC 25%			
	Componente DC	Fundamental	Armónico 3	Armónico 5
Teórico	2.5 V	4.5 V	1.5 V	0.9 V
Simulación	2.5767 V	4.6038V	1.3718 V	1.0081 V
Experimental				

8.5. Modulación SPWM basada en circuito integrado NE 555. Simulación de inversor monofase con Simulink. Guion del alumno.**8.5.1. Introducción y fundamentos teóricos**

En esta práctica, se va a proceder al diseño, simulación y montaje de una señal SPWM en la que se ha de ser capaz de diseñar el circuito capaz de generar dicha señal.

Este montaje se compondrá de un temporizador de precisión IC 555 así como un amplificador operacional AO741. Con el IC 555, podremos generar una señal, a la salida, el resultado de la modulación senoidal por ancho de pulso. El AO741 se empleará en el circuito generador de un tren de pulsos que servirá como señal portadora.

Así mismo, encontraremos también otro montaje a modo de simulación en la plataforma Simulink en la que comprobaremos, como se puede aplicar la modulación SPWM en el funcionamiento interno de un inversor monofásico.

8.5.1.1. Modulación de ancho de pulso (PWM)

La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (normalmente cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

Entonces, una señal PWM se basa en una señal que conmuta en valores discretos. Variando su Duty Cycle (DT) seremos capaces de modificar el valor de tensión (o corriente) medio que se le aplique a una carga. Es decir, si la amplitud de una señal es de 5 V y se le aplica un duty cycle del 100%, a la salida entregará los 5V a la carga. En cambio, si se con un duty cycle del 50%, se entregará a la carga 2.5V.

Este tipo de modulación, surge de la [Figura 124. Muestra de Duty Cycle en señal PWM](#) necesidad de generar una señal en la que los armónicos y la frecuencia fundamental estén muy separadas. Este método, es usado para la regulación interna en inversores (ya que se necesitan tiempo de conmutación ínfimos entre otras especificaciones), como variador de frecuencia de motores DC etc.

Existen multitud de diseños de modulación PWM, nosotros nos vamos a centrar en dos circuitos que generan una señal PWM a través de un temporizador 555.

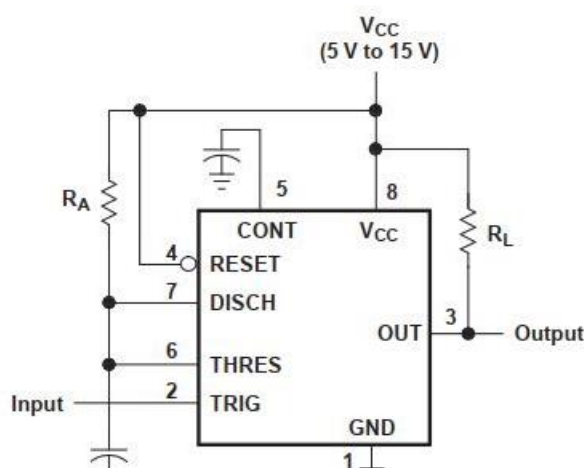


Figura 125. Temporizador 555 configurado en modo monoestable [3]

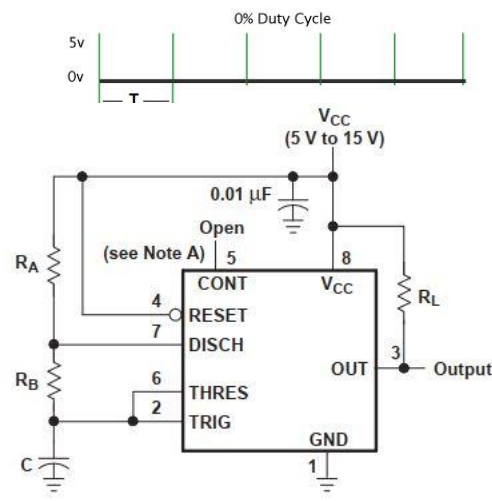


Figura 126. Temporizador 555 configurado en modo astable [3]

8.5.1.2. Temporizador ICI 555

Este componente es un circuito temporizador de precisión que es capaz de producir tiempos de retardo y oscilaciones precisas. Existen dos maneras de configurar este temporizador:

- **Modo astable**
- **Modo monoestable**

En modo monoestable, el intervalo de tiempo es controlado por una sola conexión a una línea de resistencia y condensador externa. En cambio, si se configura en modo astable la frecuencia y el duty cycle pueden ser controlados independientemente con dos resistencias y un condensador externos.

Internamente, el temporizador 555 se componen de dos comparadores, un biestable, un transistor de descarga y un divisor de voltaje. El funcionamiento es el siguiente.

El divisor de voltaje resistivo se utiliza para establecer los niveles de voltaje en el comparador. Consecuentemente, el comparador alto tiene una referencia de $\frac{2}{3} V_{cc}$ y el bajo tiene una referencia de $\frac{1}{3} V_{cc}$. Las salidas de los comparadores controlan el estado del biestable. Cuando el voltaje de disparo se reduce por debajo de $\frac{1}{3} V_{cc}$, el biestable, se inicia y la salida salta a un nivel alto. La entrada de umbral normalmente está conectada a un circuito temporizador RC externo. Cuando el voltaje en el capacitor externo excede de $\frac{2}{3} V_{cc}$, el comparador alto reestablece el biestable, el que a su vez regresa la salida a su nivel bajo. Cuando la salida del dispositivo es baja, el transistor de descarga se enciende y proporciona una trayectoria para la descarga rápida del capacitor de temporización externo.

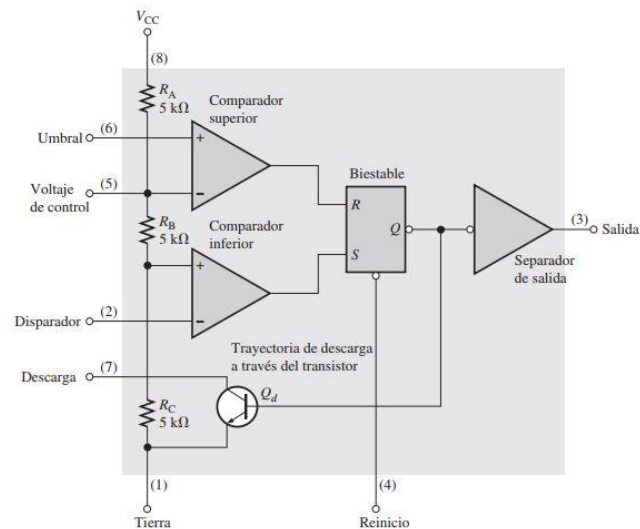


Figura 127. Diagrama interno 555 [4]

8.5.2. Objeto de la práctica

Los objetivos de la práctica pueden resumirse en:

7. Analizar el funcionamiento de la modulación senoidal por ancho de pulso
8. Comprobar el funcionamiento y aplicación de los diferentes tipos de modulación PWM.

Los resultados del aprendizaje son:

7. Adquirir la habilidad de realizar cálculos teóricos para diseñar montajes que generen una señal PWM.
8. Realizar montajes sencillos que permitan generar señales PWM para su posterior uso.
9. Ser capaz de analizar las componentes armónicas de las señales generadas.

8.5.3. Generación de señal SPWM

Este tipo de modulación PWM se caracteriza por tener tanto una señal portadora y otra de referencia. Como señal portadora tendremos una señal senoidal y como referencia una señal de reloj. En este tipo de modulación, la anchura del pulso es directamente proporcional a la amplitud de la señal moduladora. La característica principal de esta señal PWM es que tendrá la misma frecuencia y valor eficaz que la señal moduladora.

El SPWM es un tipo de modulación digital ya que la onda conmutará en valores discretos. Se suele usar en el manejo de cargas eléctricas considerables. Los índices de modulación tanto de frecuencia como de amplitud y análisis de armónicos suelen ser invariantes para cualquier frecuencia. Su uso principal suele ser para el control de velocidad de motores DC (que será el montaje al que nos referimos).

El diseño del circuito generador de una onda SPWM se basará en el uso de un circuito integrado 555 para generar la señal y un oscilador de relajación que genera una onda de reloj que actuará como señal de referencia.

8.5.3.1. Cálculos para el diseño del oscilador de onda cuadrada

El oscilador de onda cuadrada básico mostrado en la figura 5 es un tipo de oscilador de relajación porque su operación está basada en la carga y descarga de un capacitor.

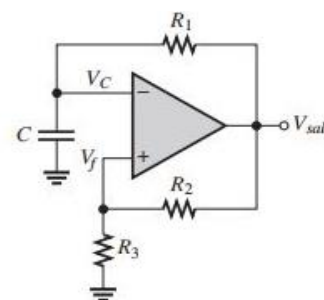


Figura 4. Oscilador de onda cuadrada [4]

Note que la entrada inversora del amplificador operacional es el voltaje de entrada, y la entrada no inversora es una parte de la salida realimentada a través de los capacitores R2 y R3 para producir histéresis. Cuando el circuito se enciende por primera vez, el capacitor se descarga y, por lo tanto, la entrada inversora está a 0 V. Esto hace que la salida sea un máximo

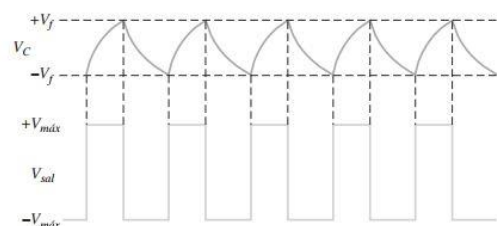


Figura 128. Forma de onda del oscilador de onda cuadrada

positivo y el capacitor comienza a descargarse hacia V_{sal} a través de $R1$. Cuando el voltaje en el capacitor (V_C) alcanza un valor igual al voltaje de realimentación (V_f) en la entrada no inversora, el amplificador operacional cambia al estado negativo máximo. En este momento, el capacitor comienza a descargarse desde $+V_f$ hacia $-V_f$. Cuando el voltaje en el capacitor alcanza $-V_f$, el amplificador operacional regresa al estado positivo máximo. Esta acción continúa repitiéndose, como muestra la figura 5 y se obtiene un voltaje de salida de onda cuadrada [4].

La fórmula del oscilador que fijará la frecuencia de la onda cuadrada será:

$$f_{reloj} = \frac{1}{2 \times R1 \times C \times \ln\left(\frac{2 \times R1}{R2} + 1\right)} \quad [\text{Ec.1}]$$

Se pide:

Diseñe un oscilador que genere un tren de pulsos de onda cuadrada a 10 KHz y amplitud de 8 V de amplitud.

Solución:

8.5.3.2. Cálculos para el diseño del 555 para generar la señal SPWM

El diseño que se propone a continuación está basado en una configuración del 555 monoestable como el que se puede observar en la figura 7.

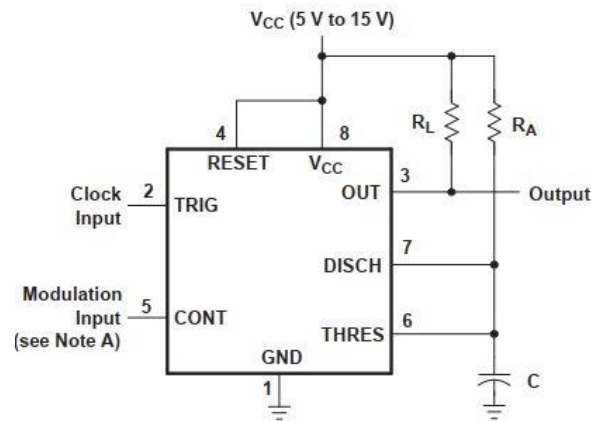


Figura 129. Diseño para SPWM con 555

En el pin 2, se conecta la señal de reloj proveniente del oscilador de relajación y en el pin 5 se conectará la señal moduladora (en nuestro caso una señal senoidal). Las características de los componentes deben cumplir la siguiente ecuación.

$$R_a \times C = \frac{1}{4 \times f_{reloj}} \quad [\text{Ec.4}]$$

Se pide:

Diseñe el circuito del 555 configurado como monoestable para la frecuencia de reloj calculada en el apartado 3.1 .

Solución:

8.5.3.3. Simulación

En este apartado, vamos a proceder a la simulación del 555 configurado como monoestable, con oscilador de relajación que genere el tren de pulsos de reloj.

El circuito en cuestión es el siguiente:

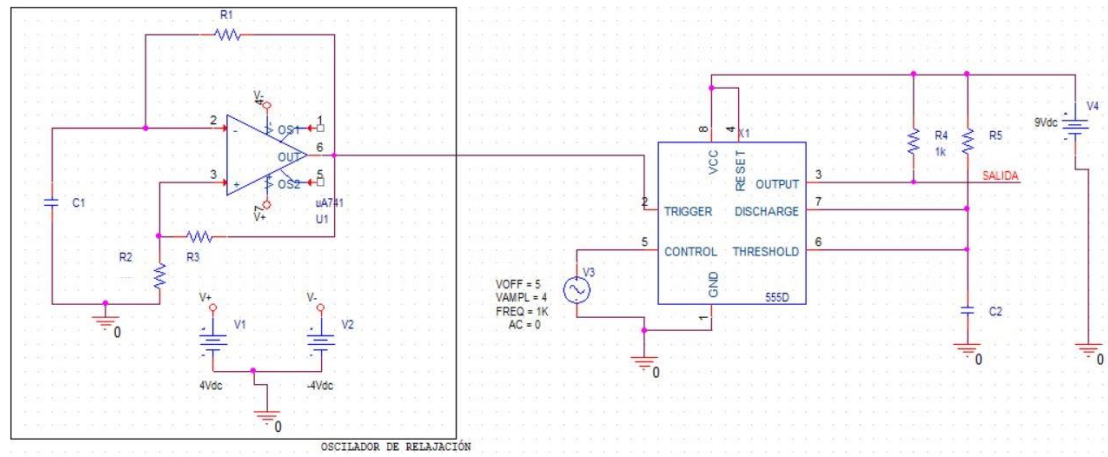


Figura 130. Generador señal SPWM con oscilador de relajación

En el caso de la simulación, no es posible la generar la onda SPWM usando como señal portadora la generada por el oscilador. Esto es debido a cierta diferencia que existe entre el temporizador NE 555 que se usará en el laboratorio y el que se dispone en Orcad PSpice 555D. Se descubrió que el ciclo de trabajo mínimo que es capaz de alcanzar coincide con el valor inverso al ciclo de trabajo de la señal moduladora, de tal modo que, para valores muy bajos de la onda cuadrada generada por el oscilador de relajación, la señal a la salida se sincronizase con el estado opuesto al de la onda portadora provocando esto que solo fuera modulable la mitad de la señal moduladora [6].

Para solucionar esto, se llegó a la conclusión de que eliminando la señal cuadrada generada y aportando en su lugar una señal moduladora generada con una fuente VPULSE en la que obtengamos una onda con un tiempo de estado de tensión ínfimo, se solucionase la incompatibilidad [6].

Por lo tanto, el circuito que se propondría para la simulación sería el siguiente:

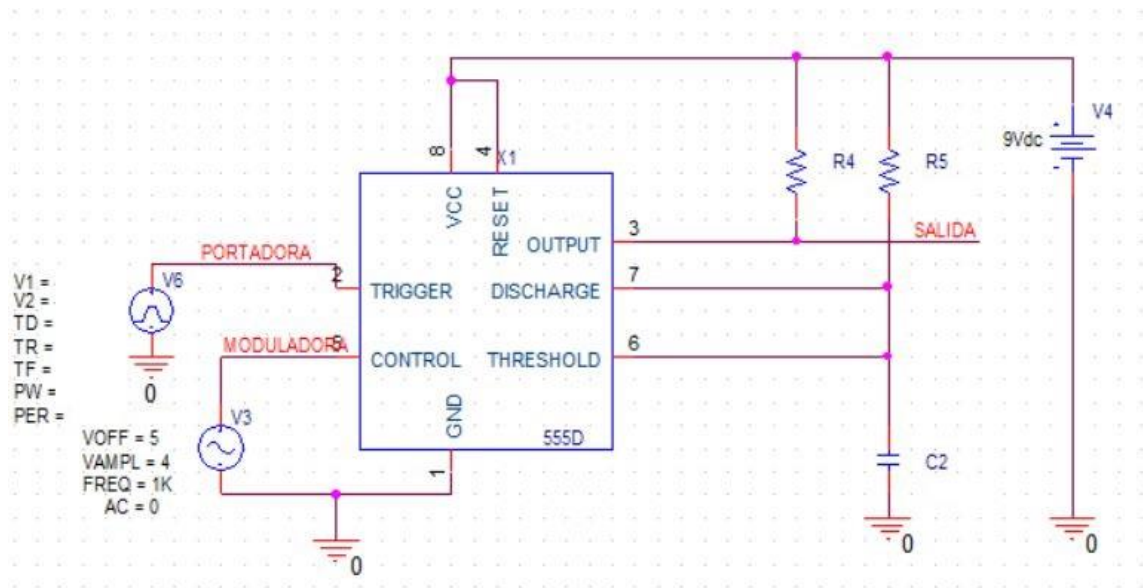


Figura 131. Circuito SPWM para simulación

Seleccione, para su simulación, los valores obtenidos en el diseño calculados en el apartado 4.2 y, para la señal portadora, cumpla los valores de frecuencia con los que se diseñó en primera instancia para ser generada con el oscilador de relajación. Responda a lo que se pide a continuación:

1. Represente la tensión a la salida del 555 y compárela con la señal moduladora. Explique brevemente que es lo que sucede.
2. Represente el valor eficaz de la señal moduladora y la tensión a la salida. ¿Qué puede observar?
3. Analice las componentes armónicas de la señal resultante de la modulación SPWM.

Solución:

8.5.3.4. Método operativo

Una vez haya realizado los cálculos teóricos y las simulaciones se puede proceder al montaje del mismo. Para ello seguimos la dinámica del circuito de la figura 8.

A continuación, se mostrará el patillaje del AO 741 y del NE555 necesarios para su montaje.

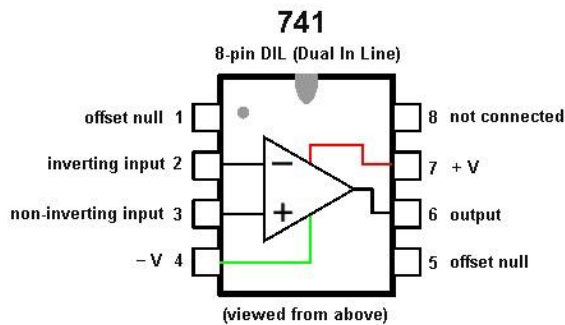


Figura 133. Patillaje AO741

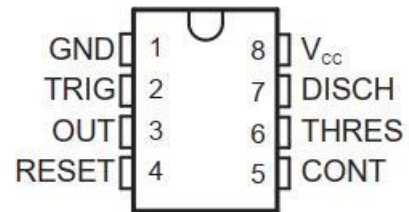


Figura 132. Patillaje NE555

Se pide:

Realice el montaje del circuito y:

1. Represente la tensión a la salida del 555 y compárela con la señal moduladora. Explique brevemente que es lo que sucede.
2. Represente el valor eficaz de la señal moduladora y la tensión a la salida. ¿Qué puede observar?
3. Analice las componentes armónicas de la señal resultante de la modulación SPWM.

Solución:

8.5.4. Modelado en simulink de un inversor monofásico disparado con señal SPWM unipolar

En este caso, una vez hayamos comprobado el funcionamiento de la señal SPWM y hayamos comprendido el mismo. Vamos a mostrar a través de un montaje, la importancia de su aplicación en el disparo de inversores modulados cómo será el de una fase.

Antes de comenzar, vamos a proceder a explicar brevemente el funcionamiento de los inversores modulados y para qué sirven.

Los inversores, también conocidos como convertidores DC-AC, surgen de la necesidad de convertir la corriente continua en corriente alterna. La corriente continua entrante al inversor puede tener diversas procedencias como pueden ser la salida de sistemas fotovoltaicos, baterías, alternadores etc. [7]

En este caso, nos enfrentamos a un inversor monofásico en estructura de puente completo unipolar controlado por una señal SPWM.

La señal SPWM generada, estará basada en el principio de comparar una señal senoidal (moduladora) con un tren de pulsos triangular (portadora). El porqué de usar una señal senoidal modulada en ancho de pulso, es la necesidad de qué a la salida, obtengamos una señal senoidal con un contenido armónico ínfimo necesitando filtros a la salida sencillos.

El funcionamiento del inversor de puente completo es muy sencillo. Los mosfet de potencia actuarán como interruptores. Cuando S1 se encuentre en estado alto, S2 se encontrará en estado bajo por lo que a la salida tendremos +Vdc la mitad del periodo. En cambio, cuando S2 se encuentre en estado alto, S1 se encontrará en estado bajo entregando a la salida -Vdc.

8.5.4.1. Descripción del circuito

En la imagen que se muestra a continuación de la composición del diseño, puede observar a que corresponde cada parte.

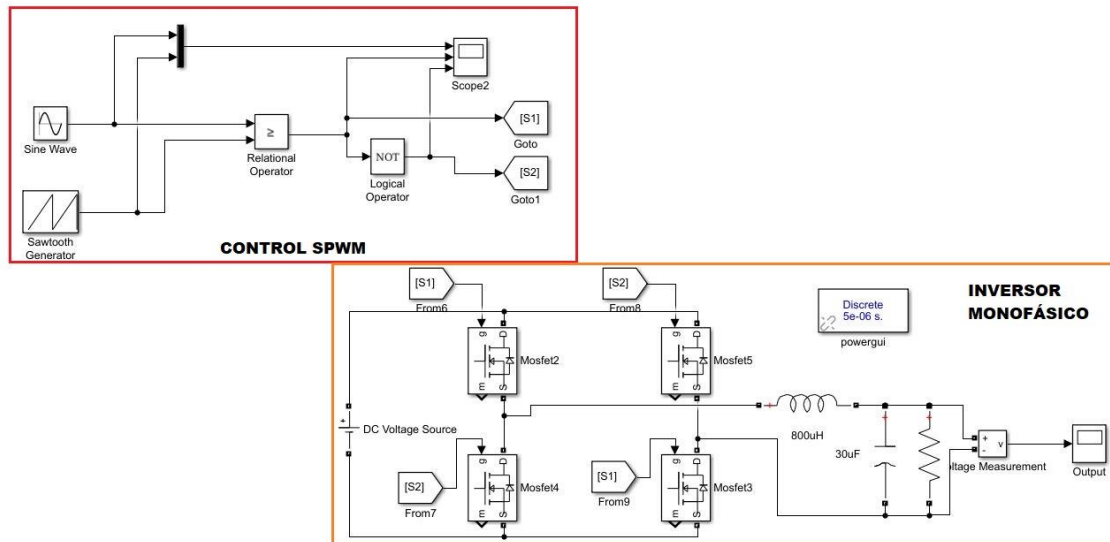


Figura 134. Inversor monofásico disparado con señal SPWM unipolar

La parte de control, consta de, como se mencionó con anterioridad, un circuito capaz de generar una señal SPWM comparando la señal senoidal con un tren de pulsos diente de sierra. Al compararla, cuando el valor de la señal senoidal sea superior al de la señal portadora, provocará que la salida esté en estado alto. El operador lógico NOT usado, para atacar los interruptores del inversor que han de estar en estado bajo cuando los demás se encuentran en estado alto.

La parte del inversor monofásico, constará de 4 mosfet que actuarán como interruptores que serán disparados con la señal correspondiente del circuito de control. Esto, generará a su salida una señal alterna. Para poder generar a la salida una señal senoidal, será necesario la inclusión de un filtro LC que reducirá el contenido armónico.

Pueden apreciar que en la figura 16 se encuentra un bloque llamado powergui. Este bloque permite elegir un método de resolución de nuestro circuito. En este caso, se ha elegido el método discreto que es usado para discretizar sistemas eléctricos para una solución en tiempos estipulados. Este bloque, será capaz de realizar análisis FFT que será necesario para lo que se pedirá en los apartados siguientes.

8.5.4.2. Diseño del circuito

Para el diseño de la parte de control, buscaremos que la modulación en amplitud sea igual a 1. Para ello, seleccionaremos un valor de amplitud de 1 tanto para la señal portadora como la de referencia. El valor de la frecuencia que se ha de seleccionar para la señal portadora ha de ser 100 veces menor que la de referencia. Los valores seleccionados en este caso serán, para la onda senoidal 50 Hz y para la portadora 5KHz.

Las señales en cuestión deberían ser como se presentan a continuación.

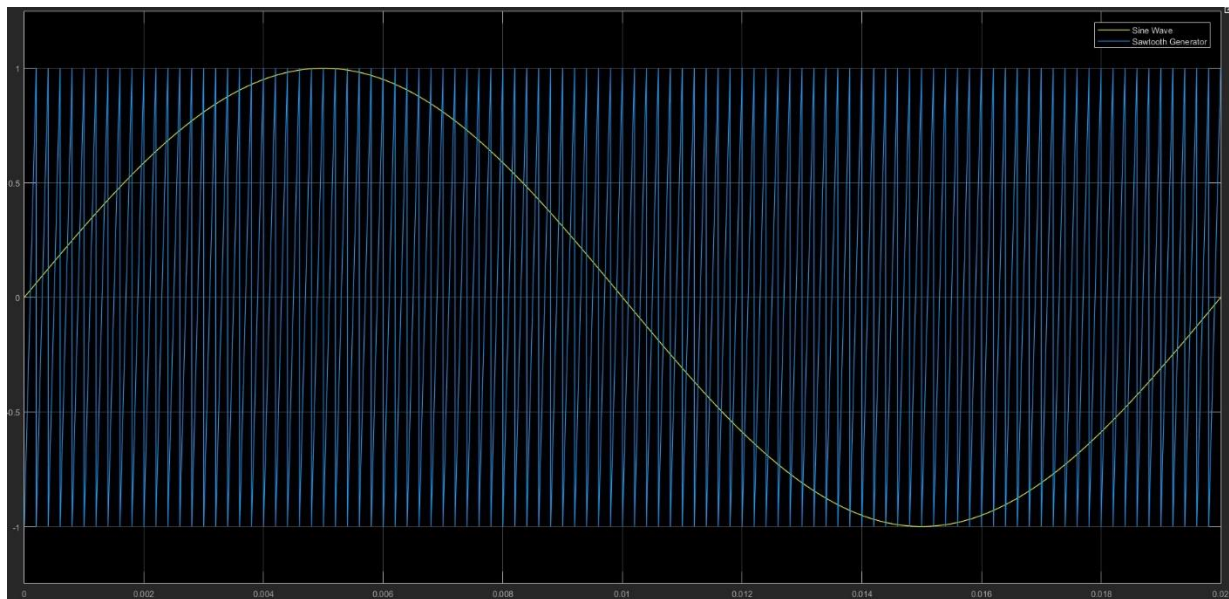


Figura 135. Señal portadora frente a señal de referencia

Una vez haya generado la señal SPWM será momento de realizar el diseño del montaje del inversor.

La tensión DC se elegirá dependiendo del valor que esperemos obtener a la salida. En este caso se ha elegido una tensión de 12 V.

8.5.4.3. Cuestiones

Para el circuito generado, muestre a través de los bloques SCOPE la representación de la señal SPWM con la que se dispararán los mosfet usados como interruptor en el inversor. Represente también la señal a la salida del inversor con y sin filtro LC, ¿Qué provoca el filtro LC? Ejecute el análisis FFT de la señal final de salida y comente los resultados obtenidos.

Notas:

Antes de continuar, se va a mostrar una pequeña descripción de cómo ha de proceder para la medición de componentes armónicos de señal.

Para ello se ha de proceder de la siguiente manera.

1. Entre en el bloque powergui y seleccione la ventana TOOLS (figura 19)
2. Una vez dentro, seleccione la opción FFT ANALYSIS (figura 18)

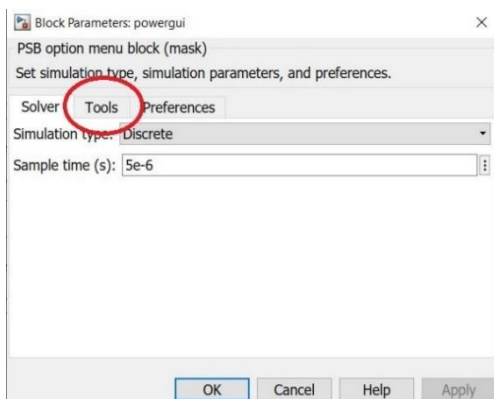


Figura 137. Para FFT 1

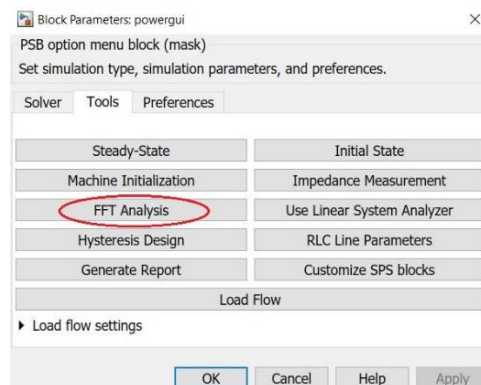


Figura 136. Para FFT 2

3. A continuación, nos aparecerá la siguiente ventana. En ella debemos seleccionar el canal al que queremos realizar el análisis y modificar los parámetros del mismo, así como la frecuencia fundamental de la señal, la frecuencia final del análisis etc (figura 23).

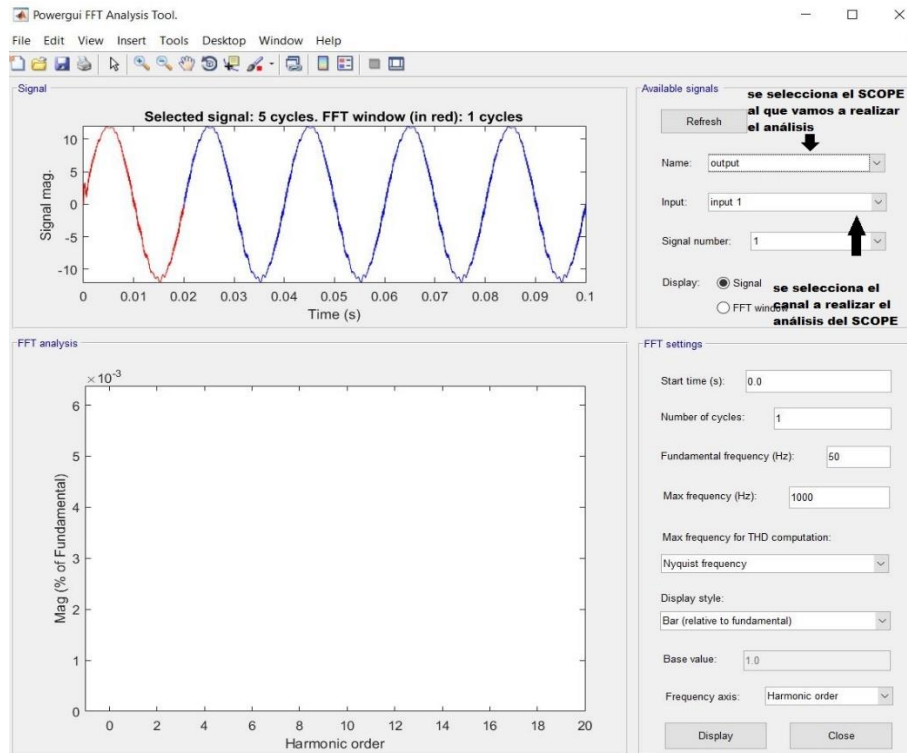


Figura 138. Para FFT 3

Solución:**8.6. Modulación SPWM basada en circuito integrado NE 555. Simulación de inversor monofase con Simulink. Guion del alumno.****8.6.1. Introducción y fundamentos teóricos**

En esta práctica, se va a proceder al diseño, simulación y montaje de una señal SPWM en la que se ha de ser capaz de diseñar el circuito capaz de generar dicha señal.

Este montaje se compondrá de un temporizador de precisión IC 555 así como un amplificador operacional AO741. Con el IC 555, podremos generar una señal, a la salida, el resultado de la modulación senoidal por ancho de pulso. El AO741 se empleará en el circuito generador de un tren de pulsos que servirá como señal portadora.

Así mismo, encontraremos también otro montaje a modo de simulación en la plataforma Simulink en la que comprobaremos, como se puede aplicar la modulación SPWM en el funcionamiento interno de un inversor monofásico.

8.6.1.1. Modulación de ancho de pulso (PWM)

La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (normalmente cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

Entonces, una señal PWM se basa en una señal que conmuta en valores discretos. Variando su Duty Cycle (DT) seremos capaces de modificar el valor de tensión (o corriente) medio que se le aplique a una carga. Es decir, si la amplitud de una señal es de 5 V y se le aplica un duty cycle del 100%, a la salida entregará los 5V a la carga. En cambio, si se con un duty cycle del 50%, se entregará a la carga 2.5V.

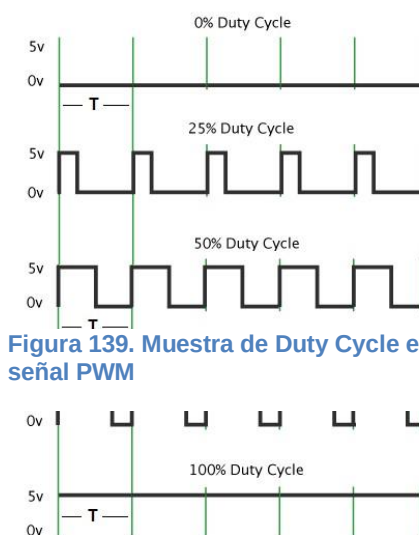


Figura 139. Muestra de Duty Cycle en señal PWM

Este tipo de modulación, surge de la necesidad de generar una señal en la que los armónicos y la frecuencia fundamental estén muy separadas. Este método, es usado para la regulación interna en inversores (ya que se necesitan tiempo de conmutación ínfimos entre otras especificaciones), como variador de frecuencia de motores DC etc.

Existen multitud de diseños de modulación PWM, nosotros nos vamos a centrar en dos circuitos que generan una señal PWM a través de un temporizador 555.

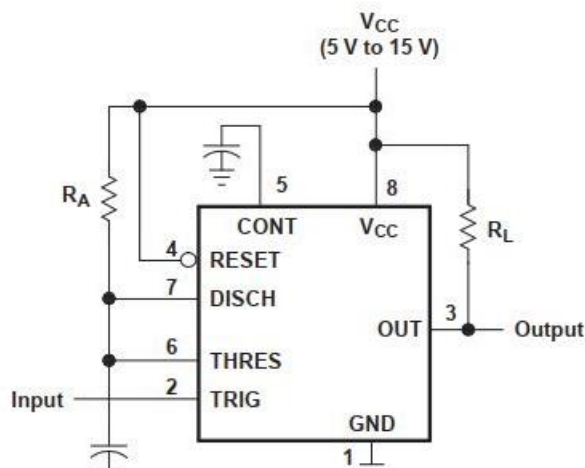


Figura 140. Temporizador 555 configurado en modo monoestable [3]

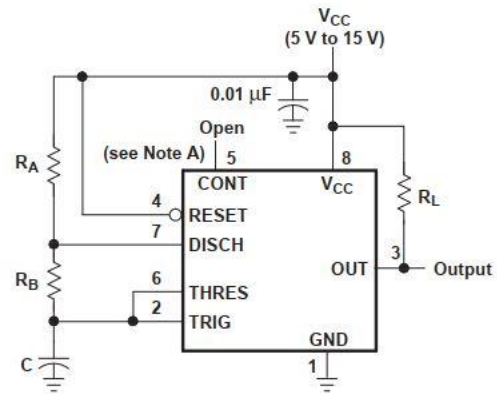


Figura 141. Temporizador 555 configurado en modo astable [3]

8.6.1.2. Temporizador ICI 555

Este componente es un circuito temporizador de precisión que es capaz de producir tiempos de retardo y oscilaciones precisas. Existen dos maneras de configurar este temporizador:

- **Modo astable**
- **Modo monoestable**

En modo monoestable, el intervalo de tiempo es controlado por una sola conexión a una línea de resistencia y condensador externa. En cambio, si se configura en modo astable la frecuencia y el duty cycle pueden ser controlados independientemente con dos resistencias y un condensador externos.

Internamente, el temporizador 555 se componen de dos comparadores, un biestable, un transistor de descarga y un divisor de voltaje. El funcionamiento es el siguiente.

El divisor de voltaje resistivo se utiliza para establecer los niveles de voltaje en el comparador. Consecuentemente, el comparador alto tiene una referencia de $\frac{2}{3} V_{CC}$ y el bajo tiene una referencia de $\frac{1}{3} V_{CC}$. Las salidas de los comparadores controlan

el estado del biestable. Cuando el voltaje de disparo se reduce por debajo de $1/3 V_{CC}$, el biestable, se inicia y la salida salta a un nivel alto. La entrada de umbral normalmente está conectada a un circuito temporizador RC externo. Cuando el voltaje en el capacitor externo excede de $2/3 V_{CC}$, el comparador alto reestablece el biestable, el que a su vez regresa la salida a su nivel bajo. Cuando la salida del dispositivo es baja, el transistor de descarga se enciende y proporciona una trayectoria para la descarga rápida del capacitor de temporización externo.

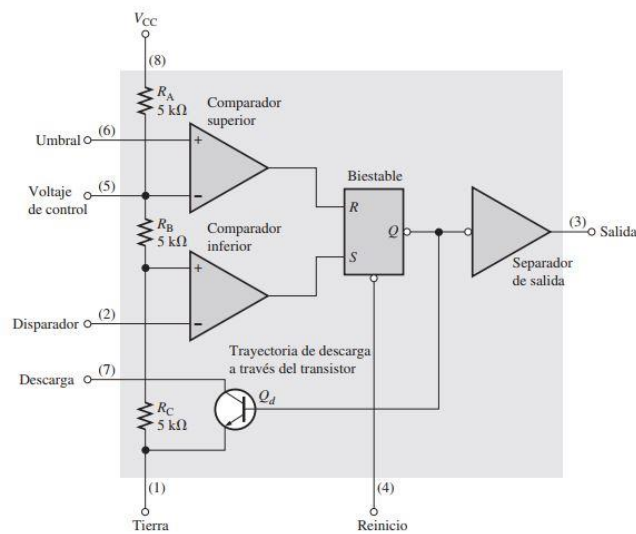


Figura 142. Diagrama interno 555 [4]

8.6.2. Objeto de la práctica

Los objetivos de la práctica pueden resumirse en:

9. Analizar el funcionamiento de la modulación senoidal por ancho de pulso
10. Comprobar el funcionamiento y aplicación de los diferentes tipos de modulación PWM.

Los resultados del aprendizaje son:

10. Adquirir la habilidad de realizar cálculos teóricos para diseñar montajes que generen una señal PWM.
11. Realizar montajes sencillos que permitan generar señales PWM para su posterior uso.

12. Ser capaz de analizar las componentes armónicas de las señales generadas.

8.6.3. Generación de señal SPWM

Este tipo de modulación PWM se caracteriza por tener tanto una señal portadora y otra de referencia. Como señal portadora tendremos una señal senoidal y como referencia una señal de reloj. En este tipo de modulación, la anchura del pulso es directamente proporcional a la amplitud de la señal moduladora. La característica principal de esta señal PWM es que tendrá la misma frecuencia y valor eficaz que la señal moduladora.

El SPWM es un tipo de modulación digital ya que la onda conmutará en valores discretos. Se suele usar en el manejo de cargas eléctricas considerables. Los índices de modulación tanto de frecuencia como de amplitud y análisis de armónicos suelen ser invariantes para cualquier frecuencia. Su uso principal suele ser para el control de velocidad de motores DC (que será el montaje al que nos referimos).

El diseño del circuito generador de una onda SPWM se basará en el uso de un circuito integrado 555 para generar la señal y un oscilador de relajación que genera una onda de reloj que actuará como señal de referencia.

8.6.3.1. Cálculos para el diseño del oscilador de onda cuadrada

El oscilador de onda cuadrada básico mostrado en la figura 5 es un tipo de oscilador de relajación porque su operación está basada en la carga y descarga de un capacitor.

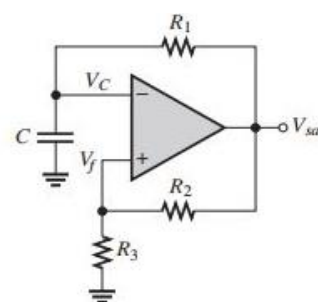


Figura 4. Oscilador de onda cuadrada [4]

Note que la entrada inversora del amplificador operacional es el voltaje de entrada, y la entrada no inversora es una parte de la salida realimentada a través de los capacitores R2 y R3 para producir histéresis. Cuando el circuito se enciende por primera vez, el capacitor se descarga y, por lo tanto, la entrada inversora está

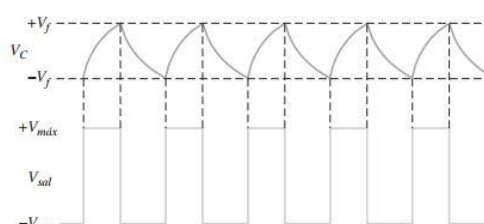


Figura 143. Forma de onda del oscilador de onda cuadrada

a 0 V. Esto hace que la salida sea un máximo positivo y el capacitor comienza a descargarse hacia V_{sal} a través de $R1$. Cuando el voltaje en el capacitor (V_C) alcanza un valor igual al voltaje de realimentación (V_f) en la entrada no inversora, el amplificador operacional cambia al estado negativo máximo. En este momento, el capacitor comienza a descargarse desde $+V_f$ hacia $-V_f$. Cuando el voltaje en el capacitor alcanza $-V_f$, el amplificador operacional regresa al estado positivo máximo. Esta acción continúa repitiéndose, como muestra la figura 5 y se obtiene un voltaje de salida de onda cuadrada [4].

La fórmula del oscilador que fijará la frecuencia de la onda cuadrada será:

$$f_{reloj} = \frac{1}{2 \times R1 \times C \times \ln\left(\frac{2 \times R1}{R2} + 1\right)} \quad [\text{Ec.1}]$$

Se pide:

Diseñe un oscilador que genere un tren de pulsos de onda cuadrada a 10 KHz y 8 V de amplitud.

Solución:

En nuestro caso, buscamos generar una frecuencia de en torno a 10 KHz, por lo que fijamos los valores correspondientes a $R1$, $R2$ y C .

Asignamos los siguientes valores:

$$R1 = R2 = 1K\Omega \quad C = 100nF$$

$$f_{reloj} = \frac{1}{2 \times R1 \times 100 \times 10^{-9} \times \ln\left(\frac{2 \times 1K}{1K} + 1\right)} = 10KHz \quad [\text{Ec.2}]$$

$$R1 = 455.12 \cong 500\Omega \quad [\text{Ec.3}]$$

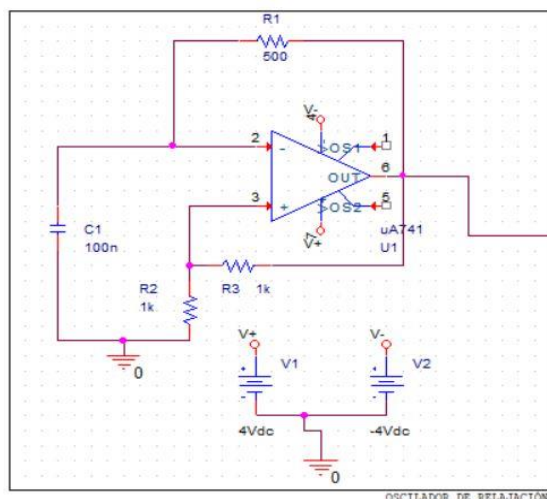


Figura 144. Oscilador de onda cuadrada PSpice

Se alimenta el AO741 con $\pm 4V$ para que la señal cuadrada a la salida se mueva entre ambos valores.

8.6.3.2. Cálculos para el diseño del 555 para generar la señal SPWM

El diseño que se propone a continuación está basado en una configuración del 555 monoestable como el que se puede observar en la figura 7.

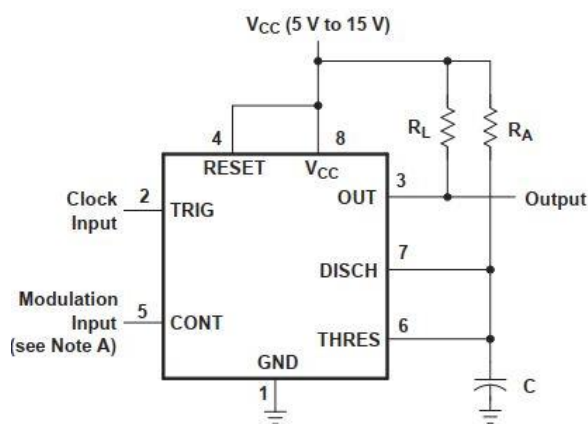


Figura 145. Diseño para SPWM con 555

En el pin 2, se conecta la señal de reloj proveniente del oscilador de relajación y en el pin 5 se conectará la señal moduladora (en nuestro caso una señal senoidal). Las características de los componentes deben cumplir la siguiente ecuación.

$$R_a \times C = \frac{1}{4 \times f_{reloj}} \quad [\text{Ec.4}]$$

Se pide:

Diseñe el circuito del 555 configurado como monoestable para la frecuencia de reloj calculada en el apartado 3.1 .

Solución:

Fijamos el valor del condensador y conocida la frecuencia de nuestra señal de reloj (en este caso 10KHz) obtenemos el valor de la resistencia.

$$C = 10 \text{ nF}$$
$$R_A = \frac{1}{4 \times f_{reloj} \times C} = 2.5 \text{ K}\Omega \quad [\text{Ec.5}]$$

El valor de RL mejorará el valor a nivel alto de la salida.

$$R_L = 1 \text{ K}\Omega$$

Conociendo ya todos los valores de diseño, procedemos al ensamblaje del circuito en su totalidad.

Como se comentó anteriormente, el valor de la tensión a la salida será proporcional a la amplitud de la señal moduladora.

8.6.3.3. Simulación

En este apartado, vamos a proceder a la simulación del 555 configurado como monoestable, con oscilador de relajación que genere el tren de pulsos de reloj.

El circuito en cuestión es el siguiente:

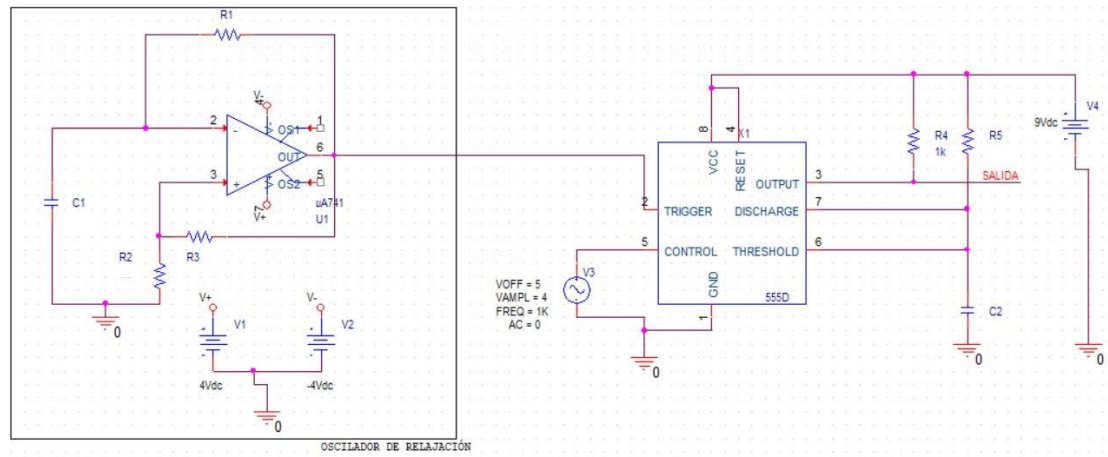


Figura 146. Generador señal SPWM con oscilador de relajación

En el caso de la simulación, no es posible la generar la onda SPWM usando como señal portadora la generada por el oscilador. Esto es debido a cierta diferencia que existe entre el temporizador NE 555 que se usará en el laboratorio y el que se dispone en Orcad PSpice 555D. Se descubrió que el ciclo de trabajo mínimo que es capaz de alcanzar coincide con el valor inverso al ciclo de trabajo de la señal moduladora, de tal modo que, para valores muy bajos de la onda cuadrada generada por el oscilador de relajación, la señal a la salida se sincronizase con el estado opuesto al de la onda portadora provocando esto que solo fuera modulable la mitad de la señal moduladora [6].

Para solucionar esto, se llegó a la conclusión de que eliminando la señal cuadrada generada y aportando en su lugar una señal moduladora generada con una fuente VPULSE en la que obtengamos una onda con un tiempo de estado de tensión ínfimo, se solucionase la incompatibilidad [6].

Por lo tanto, el circuito que se propondría para la simulación sería el siguiente:

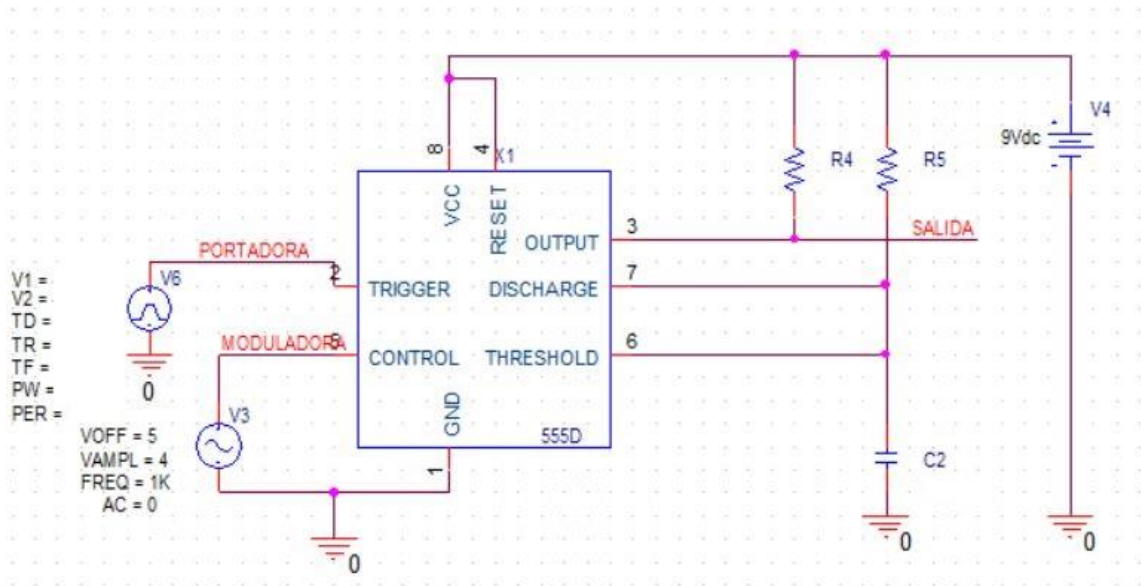


Figura 147. Circuito SPWM para simulación

Seleccione, para su simulación, los valores obtenidos en el diseño calculados en el apartado 4.2 y, para la señal portadora, cumpla los valores de frecuencia con los que se diseñó en primera instancia para ser generada con el oscilador de relajación. Responda a lo que se pide a continuación:

4. Represente la tensión a la salida del 555 y compárela con la señal moduladora. Explique brevemente que es lo que sucede.
5. Represente el valor eficaz de la señal moduladora y la tensión a la salida. ¿Qué puede observar?
6. Analice las componentes armónicas de la señal resultante de la modulación SPWM.

Solución:

Lo primero que deberíamos de hacer es ver los valores que queremos para nuestra señal pulsante. Como podemos apreciar en el enunciado del ejercicio, se nos pide generar una señal pulsante que cumpla con las especificaciones del oscilador de relajación de onda cuadrada.

Se diseñó para que ofreciese a su salida una señal cuadrada con un periodo de **10 KHz**, lo que es lo mismo, **0.1 ms**.

Por lo tanto, el circuito generado como la señal pulsante serán el siguiente.

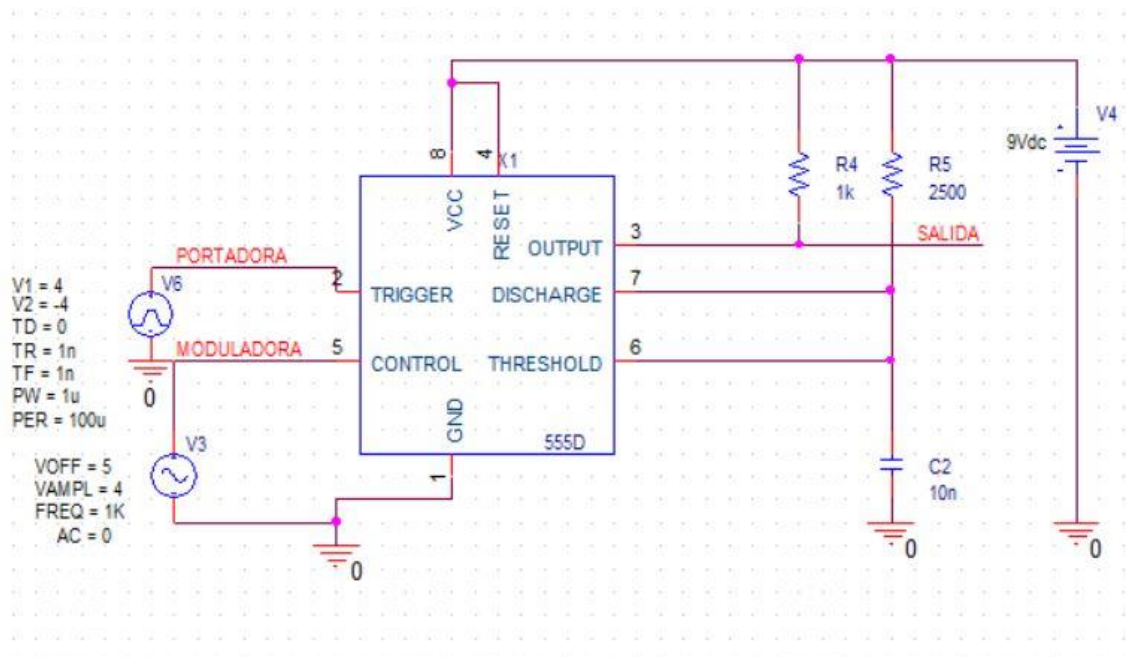


Figura 148. Circuito generador de señal SPWM con los valores fijados en el diseño

Como primer apartado, estableceremos una representación comparativa entre la señal moduladora y la que se obtiene a la salida del 555.

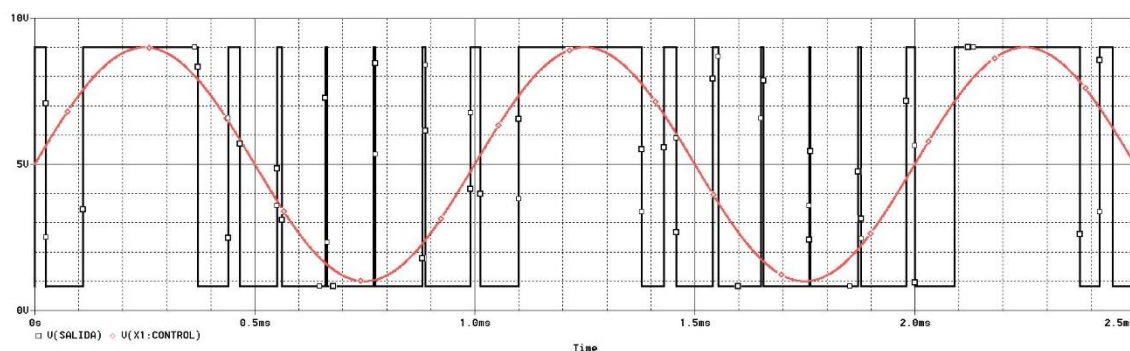


Figura 149. Señal moduladora y señal modulada

Podemos observar que, a medida que aumenta el valor de tensión de la señal moduladora, aumentará el tiempo en que se encontrará en estado alto la señal de salida.

Si comparamos los valores eficaces de ambas señales, podremos apreciar lo siguiente.

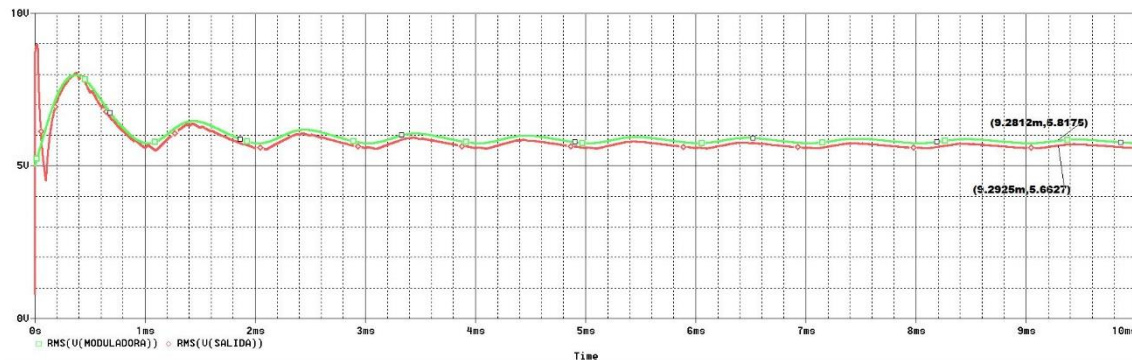


Figura 150. Tensión eficaz de señal de referencia y modulada

Se aprecia que, efectivamente, se cumple que el valor eficaz de la señal a la salida y el de la señal moduladora. Esto se debe a que, aunque tengamos una forma de onda diferente, el mensaje a enviar (por ejemplo, para comunicación) debe ser invariante.

El análisis de Fourier aplicando la función FFT a la salida será el siguiente:

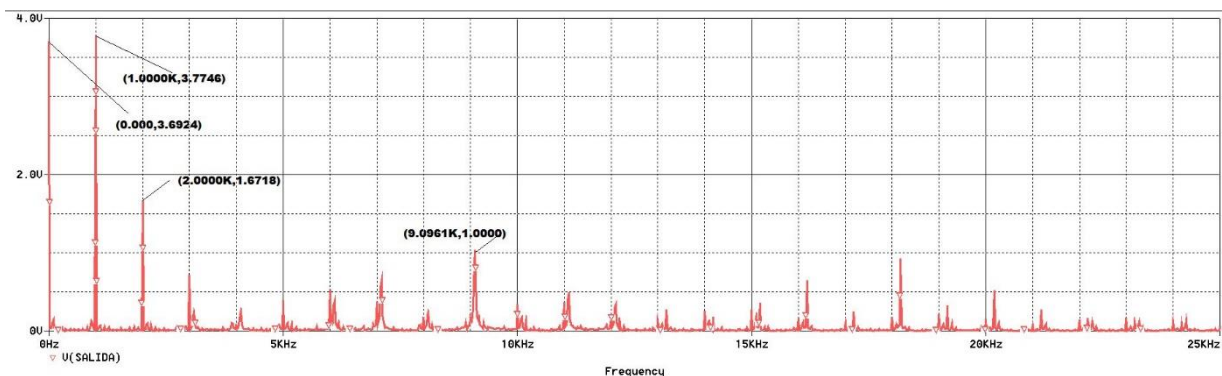


Figura 151. Análisis FFT a la señal SPWM

Respondiendo a la pregunta de qué sucederá si ampliamos la tensión de la señal moduladora, se modifica el valor de la fuente senoidal y ampliamos la amplitud a 5 V.

8.6.3.4. Método operativo

Una vez haya realizado los cálculos teóricos y las simulaciones se puede proceder al montaje del mismo. Para ello seguimos la dinámica del circuito de la figura 8.

A continuación, se mostrará el patillaje del AO 741 y del NE555 necesarios para su montaje.

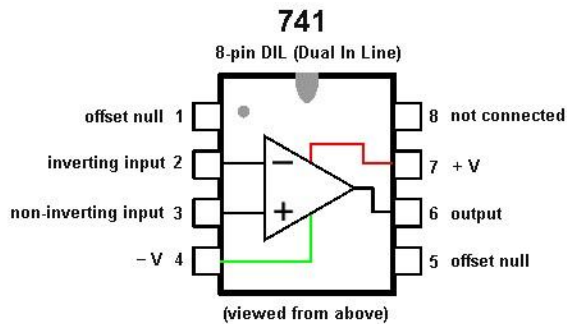


Figura 152. Patillaje AO741

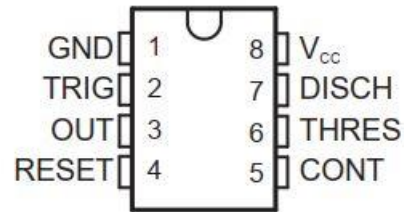


Figura 153. Patillaje NE555

Se pide:

Realice el montaje del circuito y:

4. Represente la tensión a la salida del 555 y compárela con la señal moduladora. Explique brevemente que es lo que sucede.
5. Represente el valor eficaz de la señal moduladora y la tensión a la salida. ¿Qué puede observar?
6. Analice las componentes armónicas de la señal resultante de la modulación SPWM.

Solución:

8.6.4. Modelado en simulink de un inversor monofásico disparado con señal SPWM unipolar

En este caso, una vez hayamos comprobado el funcionamiento de la señal SPWM y hayamos comprendido el mismo. Vamos a mostrar a través de un montaje, la importancia de su aplicación en el disparo de inversores modulados cómo será el de una fase.

Antes de comenzar, vamos a proceder a explicar brevemente el funcionamiento de los inversores modulados y para qué sirven.

Los inversores, también conocidos como convertidores DC-AC, surgen de la necesidad de convertir la corriente continua en corriente alterna. La corriente continua entrante al inversor puede tener diversas procedencias como pueden ser la salida de sistemas fotovoltaicos, baterías, alternadores etc. [7]

En este caso, nos enfrentamos a un inversor monofásico en estructura de puente completo unipolar controlado por una señal SPWM.

La señal SPWM generada, estará basada en el principio de comparar una señal senoidal (moduladora) con un tren de pulsos triangular (portadora). El porqué de usar una señal senoidal modulada en ancho de pulso, es la necesidad de qué a la salida, obtengamos una señal senoidal con un contenido armónico ínfimo necesitando filtros a la salida sencillos.

El funcionamiento del inversor de puente completo es muy sencillo. Los mosfet de potencia actuarán como interruptores. Cuando S1 se encuentre en estado alto, S2 se encontrará en estado bajo por lo que a la salida tendremos +Vdc la mitad del periodo. En cambio, cuando S2 se encuentre en estado alto, S1 se encontrará en estado bajo entregando a la salida -Vdc.

8.6.4.1. Descripción del circuito

En la imagen que se muestra a continuación de la composición del diseño, puede observar a que corresponde cada parte.

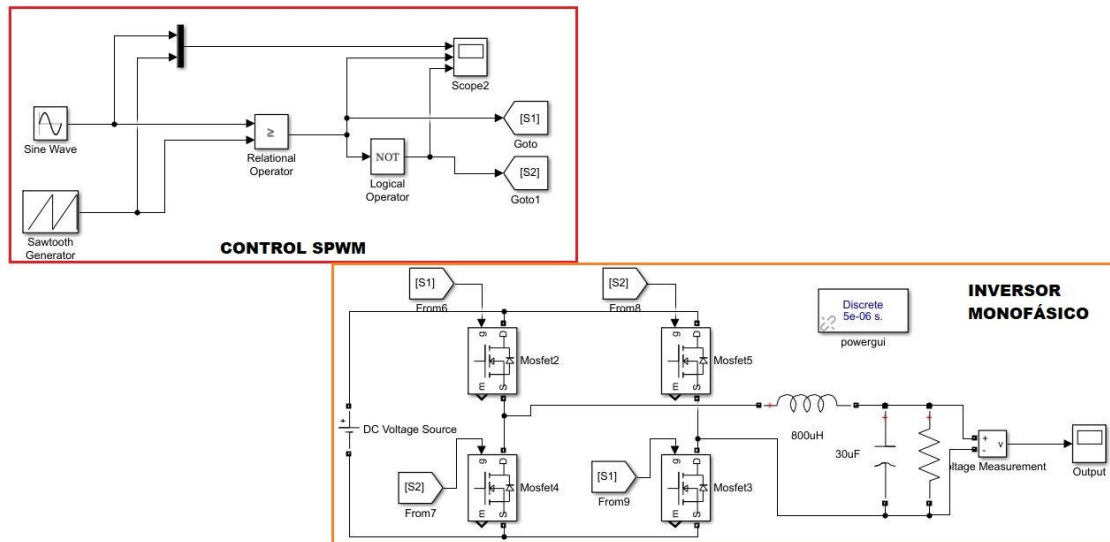


Figura 154. Inversor monofásico disparado con señal SPWM unipolar

La parte de control, consta de, como se mencionó con anterioridad, un circuito capaz de generar una señal SPWM comparando la señal senoidal con un tren de pulsos diente de sierra. Al compararla, cuando el valor de la señal senoidal sea superior al de la señal portadora, provocará que la salida esté en estado alto. El operador lógico NOT usado, para atacar los interruptores del inversor que han de estar en estado bajo cuando los demás se encuentran en estado alto.

La parte del inversor monofásico, constará de 4 mosfet que actuarán como interruptores que serán disparados con la señal correspondiente del circuito de control. Esto, generará a su salida una señal alterna. Para poder generar a la salida una señal senoidal, será necesario la inclusión de un filtro LC que reducirá el contenido armónico.

Pueden apreciar que en la figura 16 se encuentra un bloque llamado powergui. Este bloque permite elegir un método de resolución de nuestro circuito. En este caso, se ha elegido el método discreto que es usado para discretizar sistemas eléctricos para una solución en tiempos estipulados. Este bloque, será capaz de realizar análisis FFT que será necesario para lo que se pedirá en los apartados siguientes.

8.6.4.2. Diseño del circuito

Para el diseño de la parte de control, buscaremos que la modulación en amplitud sea igual a 1. Para ello, seleccionaremos un valor de amplitud de 1 tanto para la señal portadora como la de referencia. El valor de la frecuencia que se ha de seleccionar para la señal portadora ha de ser 100 veces menor que la de referencia. Los valores seleccionados en este caso serán, para la onda senoidal 50 Hz y para la portadora 5KHz.

Las señales en cuestión deberían ser como se presentan a continuación.

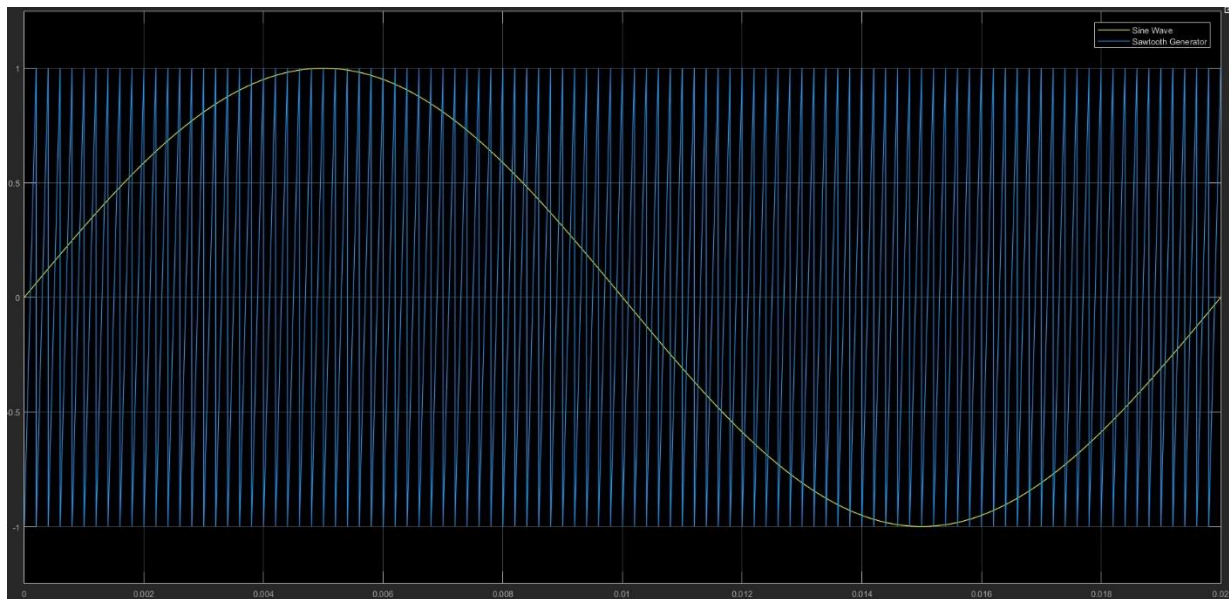


Figura 155. Señal portadora frente a señal de referencia

Una vez haya generado la señal SPWM será momento de realizar el diseño del montaje del inversor.

La tensión DC se elegirá dependiendo del valor que esperemos obtener a la salida. En este caso se ha elegido una tensión de 12 V.

8.6.4.3. Cuestiones

Para el circuito generado, muestre a través de los bloques SCOPE la representación de la señal SPWM con la que se dispararán los mosfet usados como interruptor en el inversor. Represente también la señal a la salida del inversor con y sin filtro LC, ¿Qué provoca el filtro LC? Ejecute el análisis FFT de la señal final de salida y comente los resultados obtenidos.

Notas:

Antes de continuar, se va a mostrar una pequeña descripción de cómo ha de proceder para la medición de componentes armónicos de señal.

Para ello se ha de proceder de la siguiente manera.

1. Entre en el bloque powergui y seleccione la ventana TOOLS (figura 19)
2. Una vez dentro, seleccione la opción FFT ANALYSIS (figura 18)

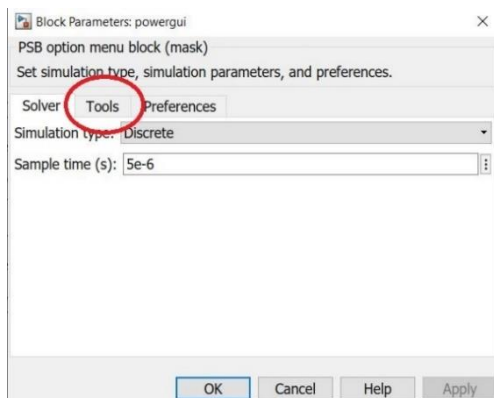


Figura 157. Para FFT 1

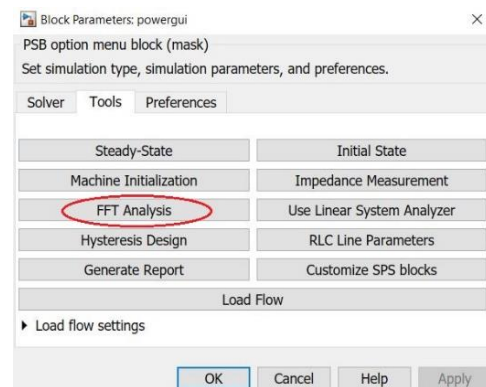


Figura 156. Para FFT 2

3. A continuación, nos aparecerá la siguiente ventana. En ella debemos seleccionar el canal al que queremos realizar el análisis y modificar los parámetros del mismo, así como la frecuencia fundamental de la señal, la frecuencia final del análisis etc (figura 23).

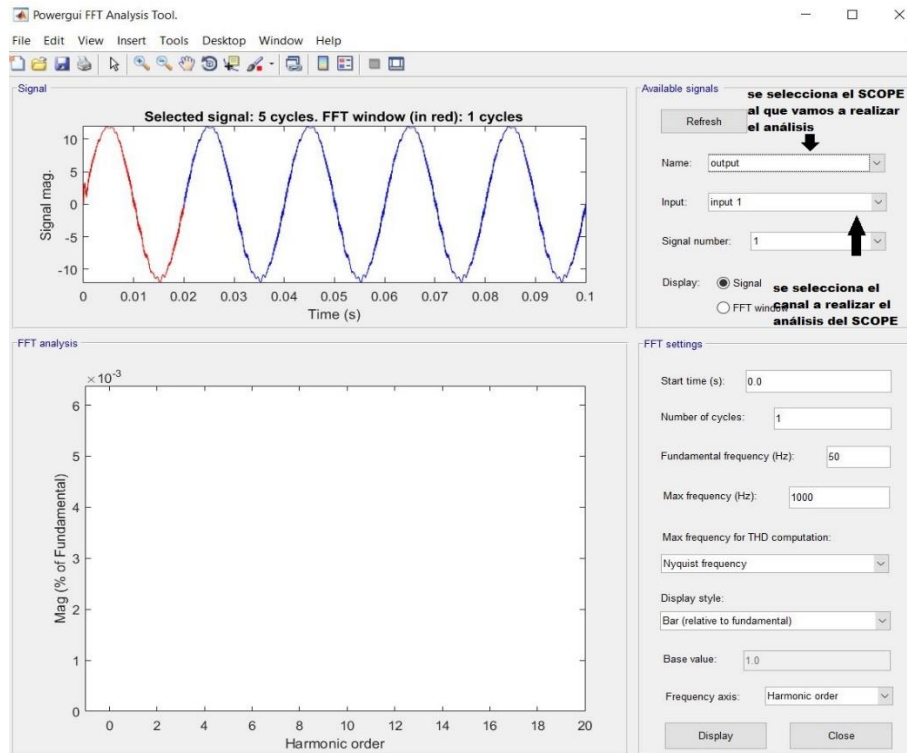


Figura 158. Para FFT 3

Solución:

La señal PWM resultante del circuito de control, en este caso, comparada con la señal portadora y de referencia será:

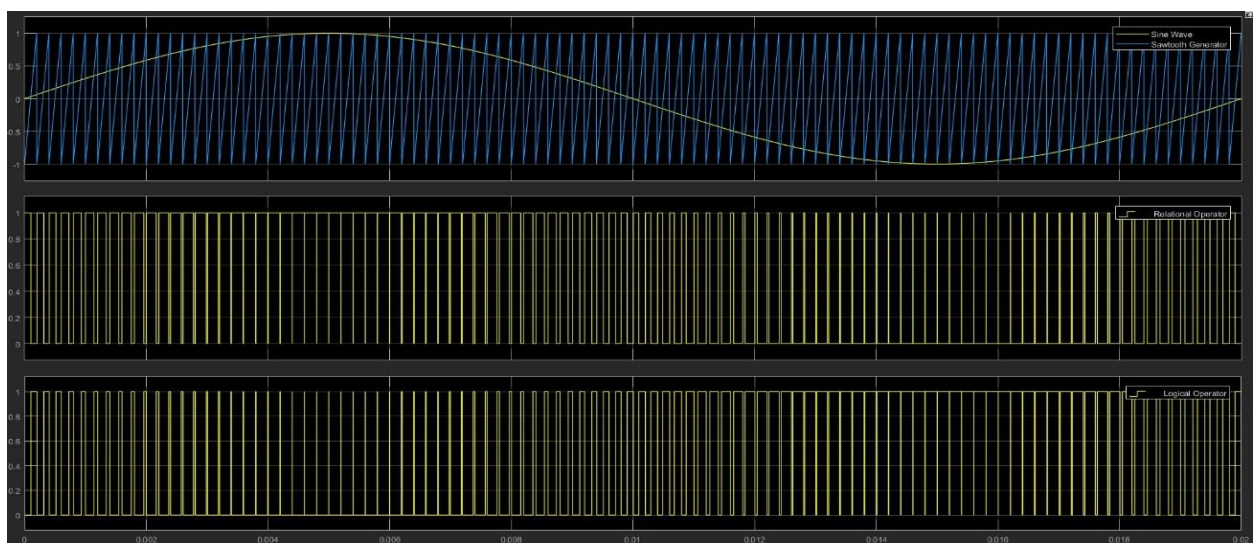


Figura 159. Comparación de señal de referencia y portadora; Representación de señal a la salida SPWM con y sin operador lógico NOT

Esta señal modulada por ancho de pulso, será la encargada de accionar los mosfet de potencia del convertidor DC/AC.

La señal a la salida del inversor con y sin filtro LC será la que se muestra.

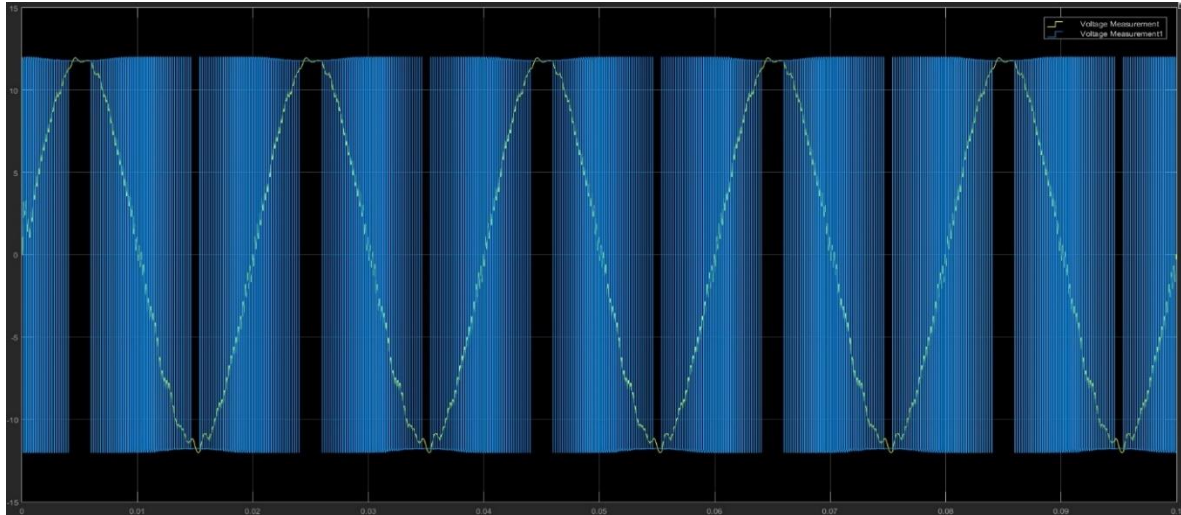


Figura 160. Señal a la salida con y sin filtro LC

En color azul, podemos observar la tensión a la salida del inversor sin filtro y en color amarillo, la señal una vez ha pasado por el filtro LC (senoidal). El filtro, provoca que la señal a la salida que no tiene carácter senoidal en ninguno de los casos, se convierta en (aunque un poco distorsionada) una señal totalmente senoidal.

En el análisis FFT de la señal a la salida, podremos comprobar que efectivamente el THD es bajo lo que indica que tenemos una aproximación a una onda senoidal correcta.

El análisis FFT en cuestión realizado a la señal de salida será el siguiente.

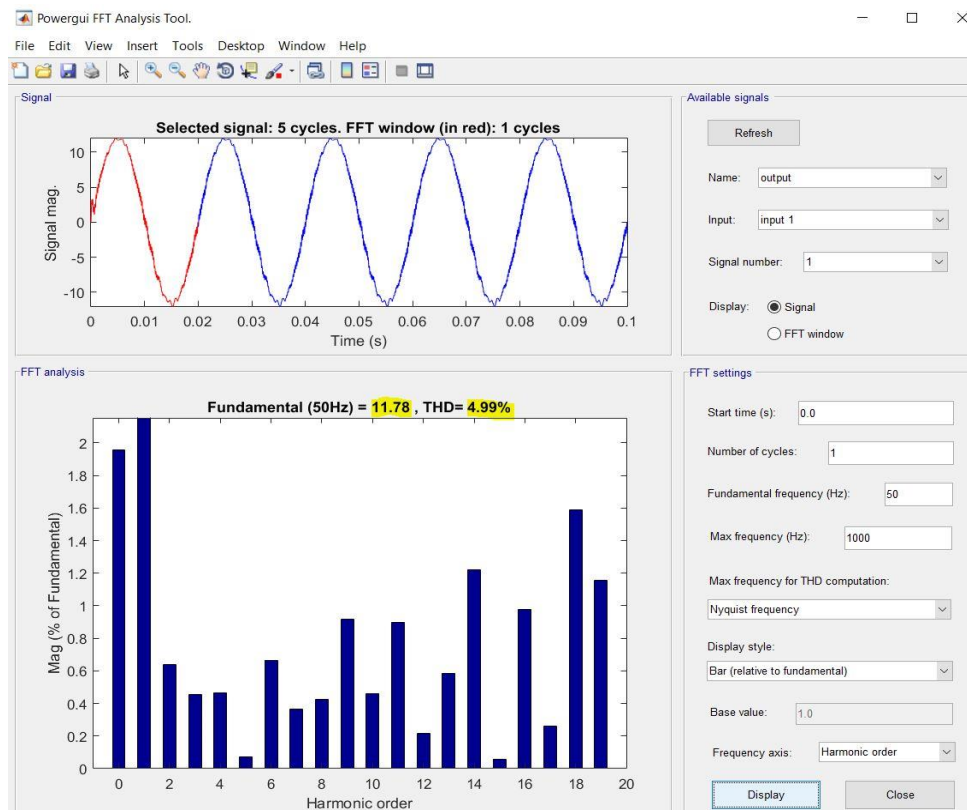


Figura 161. Análisis FFT de la señal a la salida del inversor

Podemos apreciar que en la gráfica superior se muestra la señal a la que se desea realizar el análisis y más abajo, el análisis en cuestión.

Viendo los resultados, podemos apreciar que obtenemos una señal de 11.78 V en la frecuencia fundamental (50 Hz) y un THD del 4.99%. Esto indica que la señal a la salida será una representación bastante fiel a una señal senoidal perfecta.

Para concluir con el análisis, aunque en el mismo parezca que los valores de los armónicos son muy altos, esto se debe a que el eje de ordenadas en una representación del porcentaje de tensión sobre el de la fundamental. Para el caso más superior sería en torno al 2% de 11.78 V lo que sería un valor muy pequeño.

8.7. Modulación PWM en Arduino. Implementación de código y análisis experimental. Guion del alumno.

8.7.1. Introducción y fundamentos teóricos

El objeto de esta práctica será introducirnos de manera práctica, a la programación de una señal modulada en ancho de pulso para el control de dispositivos a través del microcontrolador ARDUINO UNO R3. El uso de esta herramienta, facilitará la generación de la misma en comparación con prácticas realizadas con anterioridad siendo el montaje a realizar mas sencillo.

8.7.1.1. Modulación de ancho de pulso (PWM)

La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (normalmente cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

Entonces, una señal PWM se basa en una señal que conmuta en valores discretos. Variando su Duty Cycle (DT) seremos capaces de modificar el valor de tensión (o corriente) medio que se le aplique a una carga. Es decir, si la amplitud de una señal es de 5 V y se le aplica un duty cycle del 100%, a la salida entregará los 5V a la carga. En cambio, si se con un duty cycle del 50%, se entregará a la carga 2.5V.

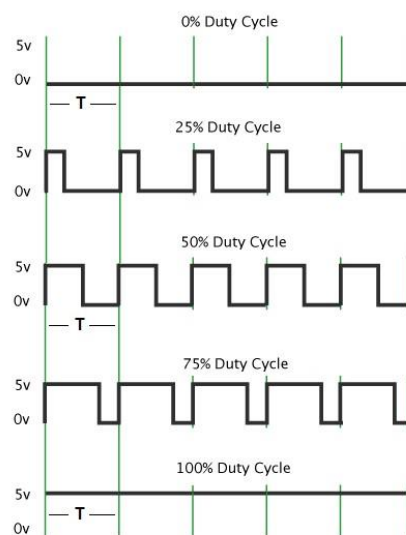


Figura 162. Muestra de Duty Cycle en señal PWM

Este tipo de modulación, surge de la necesidad de generar una señal en la que los armónicos y la frecuencia fundamental estén muy separadas. Este método, es usado para la regulación interna en inversores(ya que se necesitan tiempo de conmutación ínfimos entre otras especificaciones), como variador de frecuencia de motores DC etc.

Existen multitud de diseños de modulación PWM, nosotros nos vamos a centrar en dos circuitos que generan una señal PWM a través de un temporizador 555.

8.7.2. Objeto de la práctica

Los objetivos de la práctica pueden resumirse en:

11. Desarrollar código en Arduino que genere señal PWM
12. Analizar utilidad de esta vía de generación de señales moduladas en ancho de pulso

Los resultados del aprendizaje son:

13. Conocer la plataforma ARDUINO así como aspectos generales de la señal PWM generada en ellos
14. Aplicación de los montajes propuestos en la plataforma online Tinkercad

8.7.3. Realización de la práctica

8.7.3.1. Descripción básica

Con el microcontrolador Arduino UNO R3 se pueden realizar multitudes de operaciones cargando códigos en él, así como leer información de sensores, actuar sobre elementos como motores, es decir controlar todo tipo de situaciones.

En este caso, nos vamos a centrar en la programación de una señal PWM con la que vamos a controlar, como en prácticas anteriores, la luminosidad de un LED y la velocidad a la que girará un motor DC.

Se va a proceder con la realización de la práctica la programación a través del microcontrolador Arduino UNO R3 controlando la luminosidad de un LED o velocidad de giro de un motor DC.

8.7.3.2. Lista de materiales

Los materiales a usar son los siguientes:

- Placa protoboard
- Microcontrolador Arduino UNO R3
- Computador
- Led de potencia ProLight Opto

- 2 resistencias de $1\text{k}\Omega$ 0.5 W
- 1 potenciómetro de $100\text{k}\Omega$
- 1 diodo D1N4002
- Fuente de alimentación Agilent E3611A
- 1 MOSFET IRF540
- Cableado

8.7.4. Programación a través de Arduino de una señal PWM

Generar una señal PWM a través del microcontrolador es una tarea muy sencilla y cualquiera podría realizarla en casa, por lo que se propondrá la realización de este apartado a través de la plataforma Tinkercad debido a la no disposición de los laboratorios.

Se pide:

Realizar un código de Arduino que sea capaz de generar una señal PWM para poder controlar la luminosidad de un LED y la velocidad de un motor DC siguiendo el circuito que se muestra en la figura PONER. Modifique con el potenciómetro los valores del ciclo de trabajo y observe que suceden en el LED y el motor DC. Explique brevemente el código realizado

Tenga en cuenta para realizar el código la función que se muestra en el siguiente link para adaptar el rango de valores del potenciómetro.

<https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/math/map/>

Explique brevemente, una vez montado el circuito, su funcionamiento.



8.8. Modulaci3n PWM en Arduino. Implementaci3n de c3digo y an3lisis experimental. Guion del profesor.

El objeto de esta práctica será introducirnos de manera práctica, a la programación de una señal modulada en ancho de pulso para el control de dispositivos a través del microcontrolador ARDUINO UNO R3. El uso de esta herramienta, facilitará la generación de la misma en comparación con prácticas realizadas con anterioridad siendo el montaje a realizar mas sencillo.

La modulación por ancho de pulsos (también conocida como PWM) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (normalmente cuadrada, por ejemplo), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

Entonces, una señal PWM se basa en una señal que conmuta en valores discretos. Variando su Duty Cycle (DT) seremos capaces de modificar el valor de tensión (o corriente) medio que se le aplique a una carga. Es decir, si la amplitud de una señal es de 5 V y se le aplica un duty cycle del 100%, a la salida entregará los 5V a la carga. En cambio, si se con un duty cycle del 50%, se entregará a la carga 2.5V.

Este tipo de modulación, surge de la necesidad de generar una señal en la que los armónicos y la frecuencia fundamental estén muy separadas. Este método, es usado para la regulación interna en inversores (ya que se necesitan tiempo de conmutación ínfimos entre otras especificaciones), como variador de frecuencia de motores DC etc.

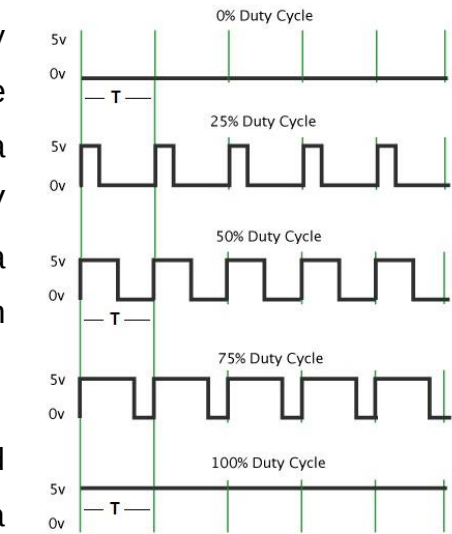


Figura 164. Muestra de Duty Cycle en señal PWM

Existen multitud de diseños de modulación PWM, nosotros nos vamos a centrar en dos circuitos que generan una señal PWM a través de un temporizador 555.

8.8.2. Objeto de la práctica

Los objetivos de la práctica pueden resumirse en:

13. Desarrollar código en Arduino que genere señal PWM
14. Analizar utilidad de esta vía de generación de señales moduladas en ancho de pulso

Los resultados del aprendizaje son:

15. Conocer la plataforma Arduino así como aspectos generales de la señal PWM generada en ellos
16. Aplicación de los montajes propuestos en la plataforma online Tinkercad

8.8.3. Realización de la práctica

8.8.3.1. Descripción básica

Con el microcontrolador Arduino UNO R3 se pueden realizar multitudes de operaciones cargando códigos en él, así como leer información de sensores, actuar sobre elementos como motores, es decir controlar todo tipo de situaciones.

En este caso, nos vamos a centrar en la programación de una señal PWM con la que vamos a controlar, como en prácticas anteriores, la luminosidad de un LED y la velocidad a la que girará un motor DC.

Se va a proceder con la realización de la práctica la programación a través del microcontrolador Arduino UNO R3 controlando la luminosidad de un LED o velocidad de giro de un motor DC.

8.8.3.2. Lista de materiales

Los materiales a usar son los siguientes:

- Placa protoboard
- Microcontrolador Arduino UNO R3
- Computador
- Led de potencia ProLight Opto
- 2 resistencias de $1k\Omega$ 0.5 W
- 1 potenciómetro de $100k\Omega$
- 1 diodo D1N4002
- Fuente de alimentación Agilent E3611A
- 1 MOSFET IRF540
- Cableado

8.8.4. Programación a través de Arduino de una señal PWM

Generar una señal PWM a través del microcontrolador es una tarea muy sencilla y cualquiera podría realizarla en casa, por lo que se propondrá la realización de este apartado a través de la plataforma Tinkercad debido a la no disposición de los laboratorios.

Se pide:

Realizar un código de Arduino que sea capaz de generar una señal PWM para poder controlar la luminosidad de un LED y la velocidad de un motor DC siguiendo el circuito que se muestra en la figura PONER. Modifique con el potenciómetro los valores del ciclo de trabajo y observe que suceden en el LED y el motor DC. Explique brevemente el código realizado

Tenga en cuenta para realizar el código la función que se muestra en el siguiente link para adaptar el rango de valores del potenciómetro.

<https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/math/map/>

Explique brevemente, una vez montado el circuito, su funcionamiento.

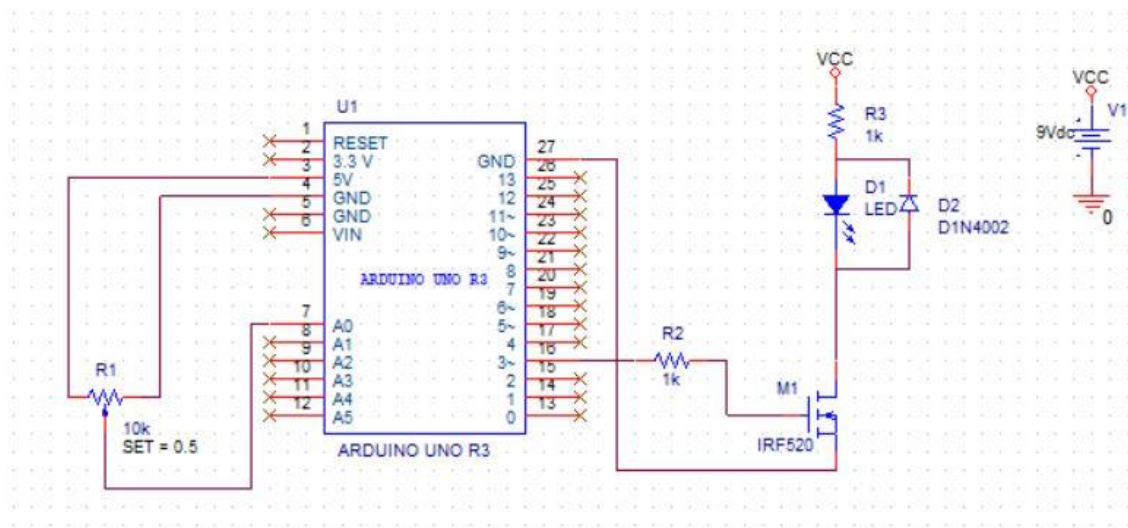


Figura 165. Esquema de circuito a montar con Arduino UNO R3

Solución:

El código en cuestión que es capaz de generar una señal con el ciclo de trabajo variable es el siguiente.

```
Generador_senal_PWM

const int pwm_port = 3;
int pw_value = 0;
int pw_value_2 = 0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(pwm_port, OUTPUT); // define el puerto pwm_port como salida
}

void loop() {
  pw_value = analogRead(0);
  /*el valor leído por la entrada analógica del potenciómetro
  iría del 0-1023 pero la señal PWM se mueve entre valores de
  0-255 por lo que habrá que adaptarla*/
  pw_value = map(pw_value, 0, 1023, 0, 255);
  /* el comando map, será capaz de modificar el rango al que buscamos
  el primer dato es el valor que se desea adaptar y los cuatro ultimos
  los valores a adaptar*/
  if(pw_value_2 != pw_value)
    pw_value_2 = pw_value;

  Serial.println(pw_value); // muestra en puerto serie el valor leído del potenciómetro
  analogWrite(pwm_port, pw_value); // vuelca a la salida la señal PWM
}
```

Figura 166. Código para generar señal PWM

En el mismo, pueden encontrar comentarios a modo de explicación de cómo funcionará el código. Lo más remarcable del código pueden ser el uso de la función `map()`.

La razón de usar esta función, reside en la necesidad de cambiar el rango de datos que recoge el pin 0 del potenciómetro, ya que este se encontrará entre 0-1023 y la señal PWM trabaja con un rango de valores de 0-255.

En el puerto serie, podrá ver en todo momento el valor del ciclo de trabajo siendo 0, 0% y 255 el 100%.

Para el montaje del circuito, en este caso he usado de nuevo la plataforma online Tinkercad ya que al no poder acceder a los laboratorios por el COVID-19 no disponía de las herramientas necesarias para realizar el montaje, pero el mismo, puede realizarse físicamente sin ningún problema porque seguiría siendo totalmente válido.

El circuito ya montado y demás quedaría de la siguiente manera.

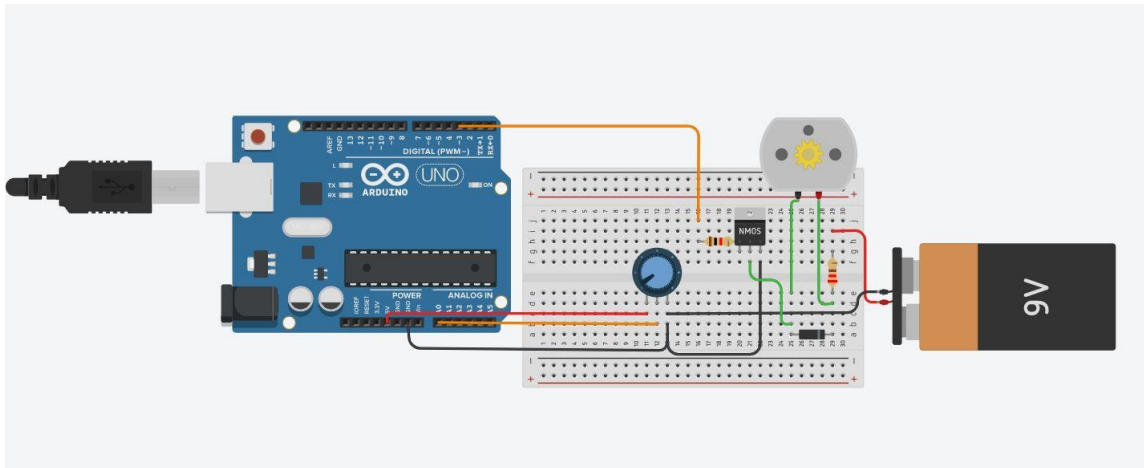


Figura 167. Montaje con arduino para variar velocidad de giro del motor DC

El link a la simulación en tinkercad se muestra a continuación:

<https://www.tinkercad.com/things/ORTzkAkTrLg-pwm-arduino/editel?sharecode=L2LMBgMNsftdEhdlreUxxBFFiTE7NTCP1pHpTR2fuY>

En el que como antes, podemos realizar medidas conectando un osciloscopio o multímetros como se haría en el laboratorio.

Se simula el circuito, y se puede apreciar como variando el valor del potenciómetro que va conectado a la entrada analógica 0, se variará el ciclo de la señal que genera el microcontrolador en el pin (ya configurado como salida) digital 3.

8.9. Anexo 1: Medida de armónicos en osciloscopio TEKTRONIK TPS 2000B

8.9.1. Introducción

En este anexo, se procederá a explicar cómo se ha de proceder para medir las componentes armónicas de una señal conectada en cualesquiera de los canales disponibles para un osciloscopio TEKTRONIK TPS2000 como los que podremos encontrar en el laboratorio.



Fig. 1. Osciloscopio serie TPS 2000B

Para hallar las componentes armónicas de la señal utilizaremos una función que incorpora esta serie de osciloscopios conocida como **FFT** del cual hablaremos más adelante.

8.9.2. Procedimientos iniciales

8.9.2.1. Comprobación del correcto funcionamiento de las sondas

Lo primero que se ha de realizar antes de hacer mediciones etc, es asegurarse del correcto funcionamiento de la sonda que vamos a utilizar.

Para ello, conecte la sonda a cualesquiera de los canales que dispone. Una vez conectada, conecte a los terminales **PROBE COMP.**

Una vez conectado, en el caso de que la sonda funcione correctamente, aparecerá en pantalla una onda cuadrada de 1KHz de frecuencia y 5 V de pico a pico. En caso de que no aparezca una señal, pulsar la opción **AUTOSET**.

Fig. 2. Sondas atenuadoras usadas en laboratorio

Si una vez realizados los pasos anteriores no se mostrase en pantalla la señal, probamos en el otro canal y en caso de que no funcionase tampoco, puede que nuestra sonda esté defectuosa.

Tener en cuenta la atenuación elegida para las mediciones tanto en la sonda como en el osciloscopio. En nuestro caso, la mas normal a usar será la atenuación x10.

8.9.2.2. Conexionado al circuito

Una vez han sido comprobadas las sondas, conectamos las mismas a la parte del circuito en la que se desee medir las componentes armónicas de la señal resultante.

Ya conectada a nuestro circuito, comprobamos en el osciloscopio que se muestre la señal requerida. Para ello, ya conectado el circuito seleccionamos la opción **AUTOSET** con la que obtendremos una presentación estable de forma de onda. En el caso de que no aparezca ninguna señal, comprobar que el circuito está siendo alimentado, que la sonda del osciloscopio está correctamente conectada, que estamos mostrando el canal en que se encuentra conectada la sonda.

En caso de que, al realizar las observaciones anteriores, y nos aseguremos de que todo está correcto y continúe el osciloscopio sin mostrar la señal, revisar el apartado 2.1.

8.9.3. Medida de componentes armónicos de señal

Este capítulo contiene información detallada sobre el uso de la función matemática **FFT (Fast Fourier Transform)**. Esta función matemática contenida en el modo matemático del osciloscopio, se encargará de convertir una señal en el dominio

del tiempo (YT) en sus componentes de frecuencia. Para utilizar este método, se deben llevar a cabo las siguientes tareas.

8.9.3.1. Configuración de la forma de onda en el dominio del tiempo

Antes de nada, necesitamos una forma de onda configurada en el dominio del tiempo (YT). Para ello, seguimos los siguientes pasos:

1. Pulse **AUTOSET** para mostrar la forma de onda YT.
2. Gire el mando **POSICIÓN VERTICAL** para centrar la forma de onda verticalmente la forma de onda hasta que tengamos 0 divisiones.

De este modo, nos aseguramos que la FFT muestre un valor correcto de componente continua.

3. A continuación, realice el mismo procedimiento que en punto 2 pero con el mando **POSICIÓN HORIZONTAL** hasta situar la parte de la forma de onda que se desee analizar en las 8 divisiones centrales de la pantalla.
4. Asegúrese, con el mando **VOLTS/DIV**, que la forma de onda queda totalmente visible en, si no, puede que se ofrezcan resultados erróneos de FFT.
5. Gire el mando **SEC/DIV** para proporcionar la resolución deseada en las componentes de frecuencia (espectro).

Una vez ha realizado los pasos declarados anteriormente, seleccione la opción de análisis de FFT. Para ello, primero ha de pulsar el botón **MATH**, en pantalla, nos ha de aparecer una opción llamada **OPERACIÓN**, dentro de esta, ha de seleccionar **FFT**. Por último, seleccione el canal al que desee realizar el análisis.

A la hora de realizar el análisis, se ha de tener en cuenta la **Frecuencia de Nyquist** dado que una vez se supera este valor, se mostrarán representaciones falsas

de FFT. Este valor de frecuencia, se traduce como la frecuencia máxima en que cualquier aparato de medida digitalizador en tiempo real puede medir sin errores. Este valor de frecuencia máxima, corresponde con la mitad de la velocidad de muestreo.

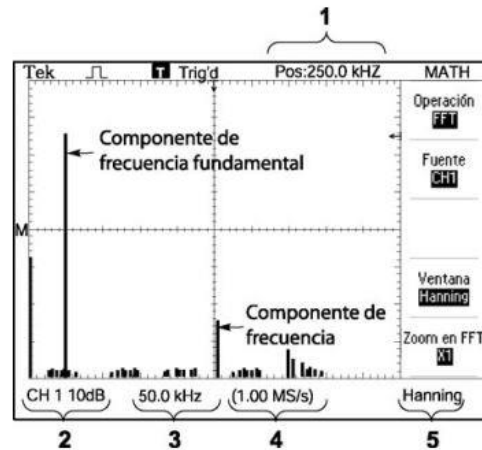
8.9.3.2. Presentación del espectro de FFT

Una vez se encuentre en la operación FFT, podrá seleccionar tanto la fuente (ha de tener en cuenta que solo se podrá mostrar un espectro de FFT al mismo tiempo), el algoritmo de ventana (del cual se habla más adelante) y el factor de ampliación de FFT:

Opción FFT matemática	Parámetros	Comentarios
Fuente	CH1 CH2	Selecciona el canal utilizado como fuente de FFT
Ventana	Hanning Superior plana Rectangular	Selecciona el tipo de ventana de FFT;
Ampliar FFT	X1 X2 X5 X10	Cambia la ampliación horizontal de la pantalla de FFT

Fig. 3. Opciones función matemática FFT [1]

Una vez haya adecuado su análisis para sus requerimientos, se mostrará en pantalla una representación como la siguiente:



1. Frecuencia de la línea central de la retícula
2. Escala vertical en dB por división (0 dB = 1 V_{RMS})
3. Escala horizontal en frecuencia por división
4. Velocidad de muestra en número de muestras por segundo
5. Tipo de ventana FFT

Fig. 4. Muestra de pantalla en osciloscopio de la función matemática FFT [1]

8.9.3.3. Selección de ventanas FFT

Este es uno de los apartados más importantes a la hora de obtener nuestro análisis FFT. El uso de las ventanas, reducirán la fuga espectral del espectro de FFT.

El análisis que estamos estudiando, presupone una forma de onda que se repite indefinidamente en el tiempo, que comienza y finaliza en la misma amplitud y que no representa discontinuidades en toda su forma.

En el caso de un análisis FFT sin ventanas, puede incurrir en la introducción de señales transitorias de alta frecuencia ya que el comienzo y al final de la representación pueden encontrarse a amplitudes diferentes [2].

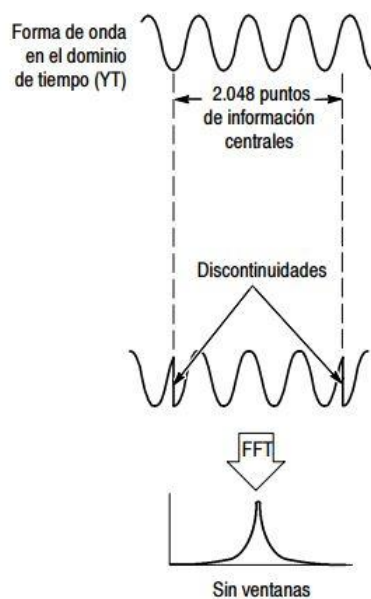


Fig. 5. Función FFT sin aplicación de ventanas [1]

Sin embargo, aplicando una ventana provocaremos que los valores del inicio y final de la representación sean próximos entre sí, reduciendo así las discontinuidades.

Por lo tanto, la ventana provocará que los extremos de la representación de la señal (inicio y final) sean más próximos.

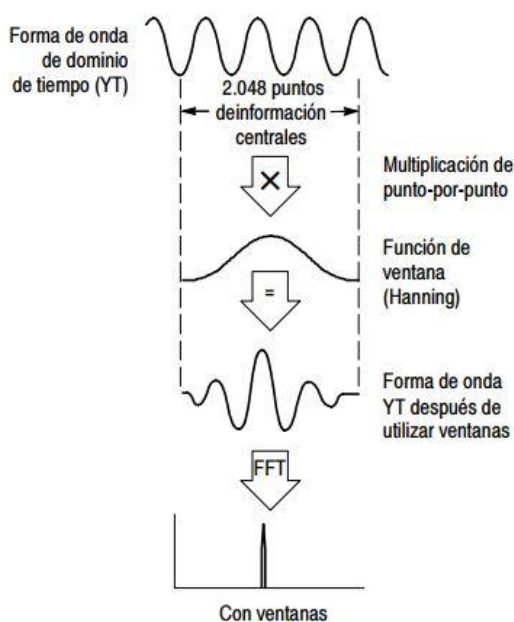


Fig. 6. Función FFT con aplicación de ventana [1]

La función FFT que incluye el osciloscopio TPS 2000B incluirá tres opciones de ventana: **Hanning**, **Superior Plana (Flat Top)** y **Rectangular**.

Cada ventana tendrá unas características diferentes y el usuario será el que determine cual usará en función de las características de señal y lo que desee medir. A continuación, se muestra las características de cada una de las ventanas que dispone el osciloscopio TPS 2000B.

Ventana	Medidas	Características
Hanning	Formas de onda periódicas	Mejor frecuencia y peor precisión en la magnitud que Superior plana
Superior plana	Formas de onda periódicas	Mejor magnitud y peor precisión en la frecuencia que Hanning
Rectangular	Pulsos o transitorias	Ventana específica para formas de onda que no presentan discontinuidades. En esencia es lo mismo que si no hubiese ventanas

Fig. 7. Tipos de ventana disponibles en Osciloscopios de la serie TPS 2000 [1]

Aun aplicando ventanas se puede dar lugar a representaciones falsas de FFT de frecuencias superiores a la de Nyquist y las inframuestran, es decir, aparecerán representadas como componentes de frecuencia menor.

Existen diferentes formas de eliminar dichas representaciones falseadas.

La más intuitiva es aumentar el valor de **SEC/DIV** girando el mando, lo que provocará que tengamos un valor mayor de velocidad de muestreo.

Si no es necesario obtener datos de frecuencias superiores a 20 MHz, se puede limitar el ancho de banda de la señal.

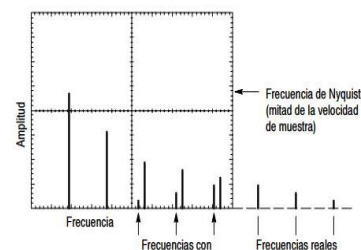


Fig. 8. Representaciones falsas para frecuencias superiores a la de Nyquist [1]

También, y siendo este el recomendado, hacer caso omiso a estas representaciones.

8.9.3.4. Ampliación y posicionamiento de un espectro FFT

En general, cuando se realiza el análisis obtendremos un espectro muy amplio, por lo que realizar mediciones será tedioso. La solución para que esto no ocurra se basa en adecuar nuestro espectro ampliando y desplazando las componentes armónicas para medir las que nos sean de utilidad.

El mismo análisis, ofrece la opción de ampliar para aumentar horizontalmente, para ampliar verticalmente, se utilizarán los controles verticales.

La opción ampliar, solo permite aumentar horizontalmente sin modificar la velocidad de muestra. La función ampliar se caracteriza por ampliar el espectro X1 (predeterminado), X2, X5 y X10. Una vez se amplíe, con el cursor **POSICIÓN HORIZONTAL** se puede desplazar el espectro FFT hasta

Para ampliar verticalmente, usando el mando VOLTS/DIV que ampliará X0.5 X1 (predeterminado), X2, X5 y X10. Con el mando POSICIÓN VERTICAL tendremos la opción de desplazar el espectro hacia arriba.

8.9.3.5. Medida de un espectro FFT con cursores

No solo se mostrará en pantalla el espectro de frecuencias de una señal si no que también puede realizar mediciones.

En un espectro FFT puede realizar dos mediciones: magnitud (dB) y frecuencia (Hz). Los dB (decibelios) son una magnitud de medida de la tensión siendo equivalente 0 dB a 1 Vrms.

Para la conversión de medidas absolutas en dBs use la siguiente expresión:

$$dB = 20 \log \left(\frac{V_{RMS}}{1V_{RMS}} \right)$$

Para realizar las mediciones, ha de pulsar el botón **CURSOR** y entraremos en el menú de esta opción. Una vez se encuentre dentro, en el apartado Fuente seleccione FFT. En la opción Tipo, podrá seleccionar que es lo que quiere medir si magnitud o frecuencia. Por último, con los mandos desplácese por el espectro para realizar las mediciones pertinentes.

Para las mediciones, los cursores horizontales corresponderán a la medida de magnitud y los verticales corresponderán a la medida de frecuencia.

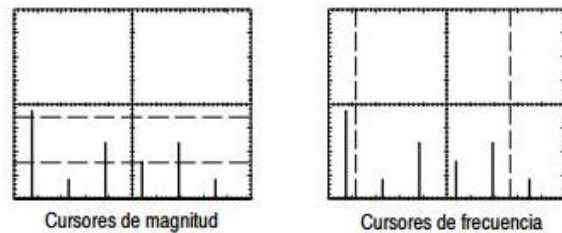


Fig. 9. Cursores para medición de magnitud y frecuencia [1]

8.10. Anexo 1: Medida de armónicos en osciloscopio AGILENT SERIES 6000.

8.10.1. Introducción

En este anexo, se procederá a explicar cómo se ha de proceder para medir las componentes armónicas de una señal conectada en cualesquiera de los canales disponibles para un osciloscopio Agilent serie 6000 como los que podremos encontrar en el laboratorio.

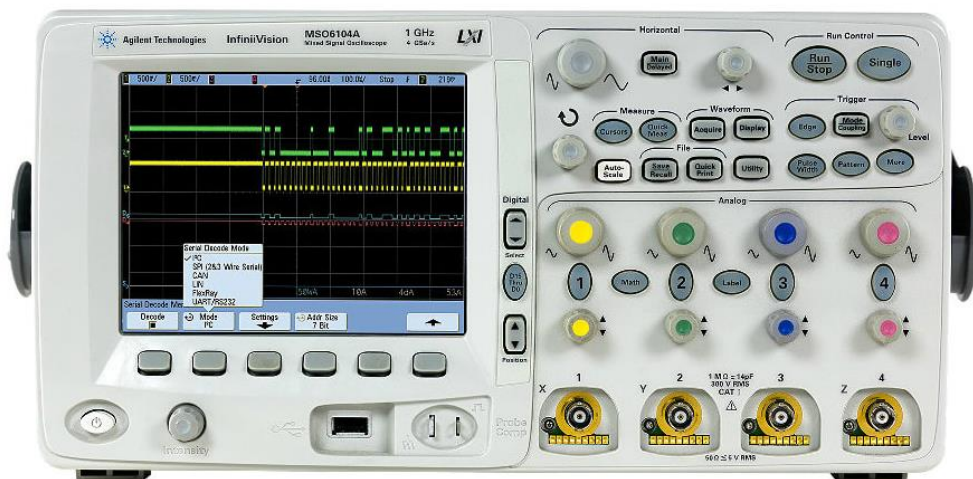


Fig. 10. Osciloscopio Agilent serie 6000

Para hallar las componentes armónicas de la señal utilizaremos una función que incorpora esta serie de osciloscopios conocida como **FFT** del cual hablaremos más adelante.

8.10.2. Procedimientos iniciales

8.10.2.1. Comprobación del correcto funcionamiento de las sondas

Lo primero que se ha de realizar antes de hacer mediciones etc, es asegurarse del correcto funcionamiento de la sonda que vamos a utilizar.

Para ello, conecte la sonda a cualesquiera de los canales que dispone. Una vez conectada, conecte a los terminales **PROBE COMP.**

Una vez conectado, en el caso de que la sonda funcione correctamente, aparecerá en pantalla una onda cuadrada de 1KHz de frecuencia y 5 V de pico a pico. En caso de que no aparezca una señal, pulsar la opción **AUTOSCALE**.



Fig. 11. Sondas atenuadoras usadas en laboratorio

Si una vez realizados los pasos anteriores aparece representada una onda como la que se muestra en la figura 3, nuestra sonda se encuentra en buen estado.



Fig. 12. Onda resultante al conectar a PROBE COMP [3]

Tener en cuenta la atenuación elegida para las mediciones tanto en la sonda como en el osciloscopio. En nuestro caso, la más normal a usar será la atenuación x10.

8.10.2.2. Conexionado al circuito

Una vez han sido comprobadas las sondas, conectamos las mismas a la parte del circuito en la que se desee medir las componentes armónicas de la señal resultante.

Ya conectada a nuestro circuito, comprobamos en el osciloscopio que se muestre la señal requerida. Para ello, ya conectado el circuito seleccionamos la opción **AUTOSCALE** con la que obtendremos una presentación estable de forma de onda. En el caso de que no aparezca ninguna señal, comprobar que el circuito está siendo alimentado, que la sonda del osciloscopio está correctamente conectada, que estamos mostrando el canal en que se encuentra conectada la sonda.

En caso de que, al realizar las observaciones anteriores, y nos aseguremos de que todo está correcto y continúe el osciloscopio sin mostrar la señal, revisar el apartado 2.1.

8.10.3. Medida de componentes armónicos de señal

Este capítulo contiene información detallada sobre el uso de la función matemática **FFT (Fast Fourier Transform)**. Esta función matemática contenida en el modo matemático del osciloscopio, se encargará de convertir una señal en el dominio del tiempo (YT) en sus componentes de frecuencia.

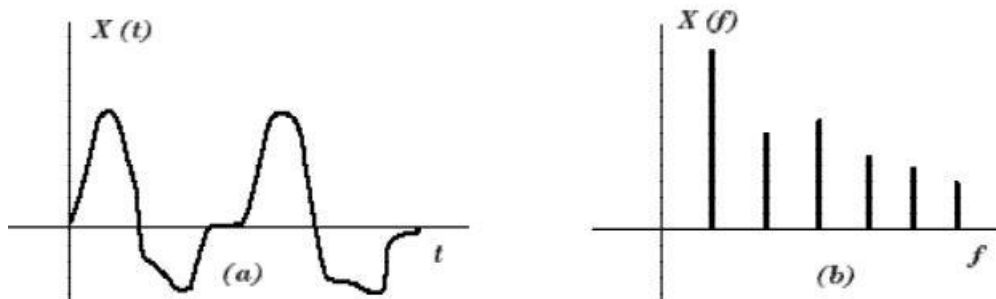


Fig. 13. a) señal en dominio del tiempo b) dominio de la frecuencia [1]

Antes de comenzar a describir los pasos que se han de seguir para realizar un análisis FFT, cabe destacar, que a diferencia del osciloscopio TEKTRONIK TPS 2000B, la medida de cada componente armónica no la ofrece en Vrms si no que la ofrece en decibelios (DB), para realizar la conversión usamos la siguiente ecuación que relaciona decibelios con tensión eficaz.

$$dB V = 20 * \log(V_{rms}) \quad [\text{Ec. 1}]$$

0 dBV es la amplitud de 1 Vrms [3].

Sin más, a continuación, se muestran los pasos a seguir para realizar las mediciones de FFT.

8.10.3.1. Consideraciones a tener en cuenta

Existen dos funciones matemáticas disponibles (F1 y F2), la función FFT se encuentra en F2. Por lo tanto, la función F2 puede usarse como operando la función F1, es decir, que a diferencia del osciloscopio TEKTRONIK, en este se puede realizar un análisis FFT a una operación sobre una señal y no solo a la señal en cuestión [2].

Un aspecto importante a tener en cuenta a la hora de realizar una medición de componentes armónicas de una señal, es el efecto del **Aliasing**. Este se produce cuando la frecuencia supera el valor de la frecuencia de Nyquist ($F_{eff}/2$). Los valores de los armónicos correspondientes a frecuencias superiores a este valor, se representarán reincorporados en valores de frecuencia que no les corresponden [1].

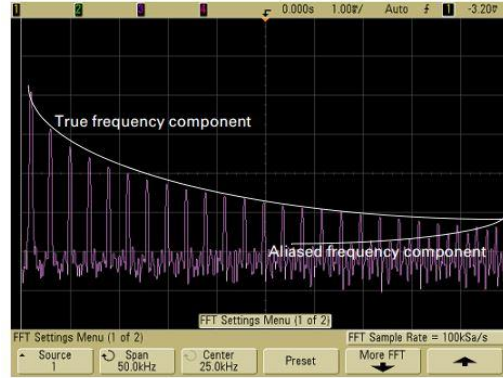


Fig. 14. Representación gráfica del Aliasing [3]

Algunas herramientas útiles para eliminar estas representaciones indeseadas se basan en, o bien limitar la señal en ancho de banda, o aumentar el número de tiempo/división para que se puedan representar un espectro de frecuencias mayor y así evitamos aliasing de frecuencias más bajas que son las que mayores problemas suelen dar. Sin embargo, esta última solución presenta el inconveniente de que al aumentar el tiempo/división, se degradará la resolución de frecuencia en el FFT [1].

8.10.3.2. Pasos a seguir

8.10.3.2.1. Configuración del análisis FFT

Comience pulsando la tecla **MATH** seguidamente, presione **FFT** y por último acceda a **ajustes** para mostrar en pantalla el menú de FFT.

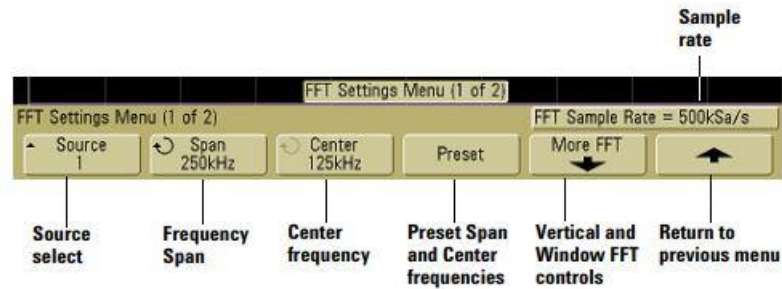


Fig. 15. Menú FFT parte 1 [3]

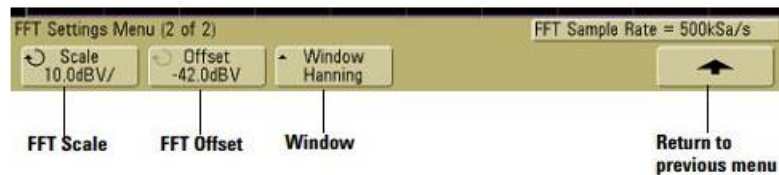


Fig. 16. Menú FFT parte 2 [3]

Como podemos observar en las figuras 6 y 7, tenemos multitud de opciones para configurar el análisis.

- **Source:** selecciona el canal al que se le requiere el análisis (también se pueden realizar análisis a funciones matemáticas realizadas a un canal como se explica en el apartado 3.1)
- **Span:** selecciona el rango en el que se va a representar el análisis FFT.
- **Center:** selecciona la frecuencia que va a corresponder al centro de la representación en pantalla.
- **Preset:** modifica los valores de SPAN y CENTER para mostrar todo el espectro de frecuencias en pantalla.
- **Scale:** asigna la escala vertical en dB/div conveniente por el usuario.
- **Offset:** permite asignar el offset deseado por el usuario al FFT.
- **Window:** Permite la selección de la ventana que se aplicará al análisis.

Antes de continuar diciendo los tipos de ventanas que pueden ser seleccionados en esta opción de ajuste de señal FFT, es conveniente realizar una breve explicación de en qué consiste una ventana y por qué es necesario agregarla a un análisis FFT.

Cuando se efectúa un análisis FFT, el osciloscopio, presupone que el inicio y el final de la onda es el mismo, es decir, toma que la señal a la que le realiza el análisis

es una señal infinita en el tiempo que se compondrá como pueden observar en la figura 8.

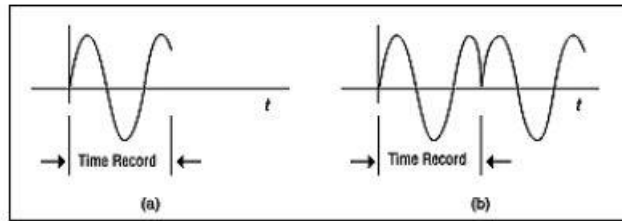


Fig. 17. Representación de la señal a la cual se realiza el análisis [1]

Si se multiplica la señal por una función ventana, provocará que las discontinuidades que existen entre el inicio y el final de la función, sean más próximos entre sí.

El osciloscopio agilent 6000 series, tiene la posibilidad de aplicar 3 funciones ventana distintas:

- **Hanning:** realiza medidas precisas de frecuencia.
- **Flat Top:** usada para mediciones precisas de amplitud para picos de frecuencia
- **Rectangular:** ofrece buenos resultados a la hora de medir frecuencia y amplitud.

8.10.3.2.2. Realización de medidas

Para realizar mediciones, presionamos el botón CURSORS y en el apartado SOURCE seleccione la opción MATH para medir sobre el análisis FFT

Use los cursores X1 y X2 podremos medir valores de frecuencia y la diferencia entre ambos (ΔX). Para medir los valores de amplitud en dB, use los cursores Y1 e Y2 y la diferencia de amplitud (ΔY).

Si desea realizar más mediciones, presione el botón QUICK MEAS y en el apartado SOURCE seleccione la opción MATH. En esta opción, tendrá la posibilidad de realizar medidas pico a pico, máximo, mínimo y media de la representación FFT.

Bibliografía

- [1] D. W. Hart, Power Electronics, Valparaíso: Valparaíso University, 2001.
- [2] R. Cereceda Guerrero , «Aplicación didáctica de modulación PWM: Montajes experimentales, ayuda por ordenador a su análisis teórico y simulación con PSpice,» Trabajo fin de grado. Universidad de Jaén, Jaén, 2017.
- [3] N. Mohan, Electrónica de potencia. Convertidores, aplicaciones y diseño, McGraw-Hill, 2019.
- [4] Agilent Technologies, Inc, «Agilent 6000 Series Oscilloscope: User's Guide,» 2006. [En línea]. Available: https://engineering.case.edu/lab/circuitlab/sites/engineering.case.edu/lab/circuitlab/files/docs/Agilent_6000_Series_Oscilloscope_Users_Guide.pdf.
- [5] National instruments CORP, «Comprender FFTs y Funciones Ventana,» 05 Marzo 2019. [En línea]. Available: <https://www.ni.com/es-es/innovations/white-papers/06/understanding-ffts-and-windowing.html>.
- [6] Tektronix, Inc., «Osciloscopio de almacenamiento digital de la serie TPS2000 071-1445-00 Manual de usuario,» 2017. [En línea]. Available: <http://www.isotest.es/web/Soporte/manuales/TEKTRONIX/TEK%20TPS2000-Manual%20usuario.pdf>.
- [7] M. H. Rashid, Electrónica de Potencia. Circuitos, dispositivos y aplicaciones, Pearson , 2013.
- [8] F. Jiménez Molinos, «Simulación de circuitos con ordenador. Introducción a PSPICE y OrCad-CAPTURE,» [En línea]. Available: <https://docplayer.es/10028839-Simulacion-de-circuitos-con-ordenador-introduccion-a-pspice-y-orcad-capture.html>.
- [9] T. Floyd, Dispositivos electrónicos, México: Pearson Educación, 2008.
- [10] R. Witte, «Fourier Theory & Practice, Part 2: Practice,» [En línea]. Available: <http://materias.fi.uba.ar/6644/info/varios/fft/fourier-theory-and-practice-part2.pdf>.
- [11] R. Witte, «Fourier Theory & Practice, Part 1: Theory,» [En línea]. Available: https://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/Exp53a.pdf.

- [12] Cadence Design Systems, Inc., «PSpice Reference Guide,» 1985-2000. [En línea]. Available: https://www.seas.upenn.edu/~jan/spice/PSpice_ReferenceguideOrCAD.pdf.
- [13] F. M. Gonzalez-Longatt, «Modulación de ancho de pulso -Una introducción-,» 2014. [En línea]. Available: <https://fglongatt.org/OLD/Reportes/PRT2004-02.pdf>.
- [14] S. W. Smith, The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing, California: California Technical Publishing, 2011.
- [15] Universidad de Vigo, «Tema III : Análisis de circuitos mediante la transformada de Fourier,» [En línea]. Available: http://enrique.sanchez.webs.uvigo.es/PDFs/127_TemaIII-Fourier.pdf.
- [16] Circutor, «Procedimiento para el estudio y Análisis de perturbaciones armónicas,» 2014. [En línea]. Available: http://circutor.com/docs/procedimientos_sp.pdf.
- [17] Proyecto Arduino, «Arduino y la modulación por ancho de pulsos PWM,» Proyecto Arduino, [En línea]. Available: <https://proyectoarduino.com/pwm-arduino/#:~:text=Mediante%20el%20uso%20de%20la,para%20emitir%20una%20se%C3%B1al%20PWM..>
- [18] Texas Instruments incorporated, «xx555 Precision Timers,» 2014. [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/se555.pdf?ts=1599640701810&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F.
- [19] ProLight Opto Technology Corporation, «ProLight PM2B-1LxE 1W Power LED Techincal Datasheet,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.tme.eu/Document/e4ef61782c1ac56df56f20744484a7cc/PM2B-1LxE.pdf>.
- [20] A. H. Nurul Farhana, «Design and simulation of single phase inverter using SPWM unipolar technique,» 2019. [En línea]. Available: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1432/1/012021/pdf#:~:text=Simulation%20model%20of%20single%20phase%20unipolar%20SPWM%20inverter&text=The%20system%20consists%20of%20control,sine%20wave%20signal%20%5B5%5D..>