



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA MATANZA

Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas

**Ingeniería en Electrónica**

## **Técnicas digitales III**

### **Generador de funciones y ondas arbitrarias**

**Integrantes:** Federico A. Noto

**Profesores:** Lic. Carlos Maidana  
Ing. Guillermo Buranits  
Ing. Lucas M. Guerrero  
Ing. Mauro Cipollone

**2021**

# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>DESCRIPCIÓN GENERAL .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>INTRODUCCIÓN TEÓRICA .....</b>	<b>4</b>
2.1	FORMA DE ONDA.....	4
2.1.1	Amplitud .....	4
2.1.2	Frecuencia.....	4
2.1.3	Fase .....	4
2.1.4	Tiempo de subida y de bajada .....	4
2.1.5	Ancho de pulso.....	5
2.1.6	Offset.....	5
2.2	CONVERSOR DIGITAL A ANALÓGICO (DAC) .....	5
2.2.1	Profundidad de memoria (longitud de registro).....	6
2.2.2	Frecuencia de muestreo .....	6
2.2.3	Resolución Vertical.....	6
2.2.4	Resolución Horizontal.....	7
2.3	MODULACIÓN POR ANCHO DE PULSO (PWM) .....	7
<b>3</b>	<b>DESCRIPCIÓN TÉCNICA DEL PROYECTO.....</b>	<b>7</b>
3.1	HARDWARE .....	7
3.1.1	Diagrama en bloques .....	8
3.1.2	Esquemático.....	9
3.1.3	Circuito impreso .....	20
3.1.4	Fotos.....	21
3.2	SOFTWARE.....	22
3.2.1	Enumeración de rutinas.....	22
3.2.2	Descripción del funcionamiento de cada rutina .....	24
3.3	SOFTWARE PROPIETARIO .....	31
3.3.1	AFG Arbitrary Waveform Software de GwInstek.....	31
<b>4</b>	<b>MODO DE OPERACIÓN .....</b>	<b>34</b>
4.1	MENÚ .....	34
4.2	SITIO WEB.....	36
<b>5</b>	<b>ENSAYOS.....</b>	<b>37</b>
5.1	ENSAYO DE FRECUENCIAS .....	37
5.1.1	Ensayo de frecuencia a 1Hz y 20kHz .....	37
5.2	ENSAYO DE AMPLITUDES .....	40
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>40</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>41</b>
<b>8</b>	<b>ANEXO .....</b>	<b>42</b>
8.1.1	Esquemáticos.....	42
8.1.2	Circuitos impresos .....	44

# 1 Descripción general

El presente proyecto tiene por objetivo desarrollar un generador de funciones, que es exactamente lo que su nombre implica: un equipo de testeo que genera señales eléctricas en forma de ondas que se utilizan como estímulo para mediciones electrónicas.

La mayoría de los circuitos requieren algún tipo de señal de entrada cuya amplitud varía con el tiempo. La señal puede ser una señal de corriente alterna (con picos que oscilan por encima y por debajo de una referencia) o puede variar en un rango de tensiones de offset de corriente continua, ya sea positivo o negativo. Puede ser una onda sinusoidal u otra función analógica, un pulso digital, un patrón binario o una forma de onda puramente arbitraria.

El generador de señales, o de funciones, es la fuente de estímulo. Se empareja con un instrumento de adquisición de datos para obtener una solución de medición completa. Las dos herramientas se conectan en los terminales de entrada y salida del dispositivo bajo prueba (DUT).

El generador de señales puede proporcionar formas de onda "ideales" o puede agregar cantidades conocidas y repetibles y tipos de distorsión (o errores) a la señal que entrega. Esta característica es una de las mayores virtudes del generador de señales, ya que a menudo es imposible crear una distorsión predecible, exactamente cuando y donde es necesario, utilizando solo el circuito en sí. La respuesta del dispositivo bajo prueba (DUT) en la presencia de estas señales distorsionadas revela su capacidad para manejar tensiones que caen fuera de la envolvente del rendimiento normal.

Existen cientos de aplicaciones diferentes para esta clase de equipos, pero colocado en un contexto de mediciones electrónicas, se pueden divisar tres categorías:

Verificación: los diseñadores de equipos inalámbricos que desarrollan nuevo hardware de transmisión y recepción deben simular señales I&Q de banda base, con y sin deficiencias, para verificar la conformidad con los estándares inalámbricos patentados y para ello se usan funciones arbitrarias de baja distorsión.

Caracterización: los convertidores digital a analógico (DAC) y los convertidores analógico a digital (ADC) recientemente desarrollados deben probarse exhaustivamente para determinar sus límites de linealidad y distorsión. Se aplican señales analógicas y digitales en fase para llevar las velocidades de estos dispositivos hasta 1Gbps.

Test de estrés o margen: los ingenieros que trabajan con arquitecturas de flujo de datos en serie (comúnmente utilizadas en buses de comunicaciones digitales) necesitan estresar sus dispositivos con deficiencias, particularmente fluctuaciones y violaciones de sincronización

En el proyecto en cuestión, se podrán generar señales conocidas: como seno, semiverseno, cuadrada, rectangular, triangular, diente de sierra y ruido blanco y señales arbitrarias, que son aquellas señales de origen complejo que no siguen una expresión matemática regular y que podrán ser generadas por el usuario mediante un software especializado y posteriormente enviadas a través de WiFi, gracias a un sitio web dedicado. Dichas señales podrán ser elegidas a través de un menú y sus parámetros, tales como duty, offset y amplitud, son modificables y serán monitoreados en tiempo real en un display.

## 2 Introducción teórica

### 2.1 Forma de onda

El término "onda" se puede definir como un patrón de valores cuantitativos variables que se repite durante algún intervalo de tiempo. Las ondas son comunes en la naturaleza: ondas sonoras, ondas cerebrales, ondas oceánicas, ondas de luz, ondas de tensión y muchas más. Todos son fenómenos que se repiten periódicamente. Los generadores de señales generalmente se preocupan por producir ondas eléctricas (típicamente de voltaje) que se repiten de manera controlable.

Cada repetición completa de una onda se conoce como un "ciclo". Una forma de onda es una representación gráfica de la actividad de la onda: su variación en el tiempo. Una forma de onda de tensión es un gráfico cartesiano clásico con tiempo en el eje horizontal y tensión en el eje vertical.

#### 2.1.1 Amplitud

Una medida de la "fuerza" de la tensión de la forma de onda. La amplitud cambia constantemente en una señal de corriente alterna. Los generadores de señales le permiten establecer un rango de tensión, por ejemplo,  $-5V$  a  $+5V$ . Esto producirá una señal que fluctuará entre los dos valores de tensión, y la tasa de cambio dependerá tanto de la forma de onda como de la frecuencia.

#### 2.1.2 Frecuencia

La velocidad a la que ocurren los ciclos completos de formas de onda. La frecuencia se mide en Hertz (Hz), antes conocida como ciclos por segundo. La frecuencia está inversamente relacionada con el período de la forma de onda, que es una medida de la distancia entre dos picos similares en ondas adyacentes. Las frecuencias más altas tienen períodos más cortos y viceversa.

#### 2.1.3 Fase

En teoría, es la ubicación de un ciclo de una forma de onda en relación con un punto de 0 grados. En la práctica, la fase es la ubicación temporal de un ciclo en relación con una forma de onda de referencia o de un punto en el tiempo.

#### 2.1.4 Tiempo de subida y de bajada

Más conocido como rise time y fall time respectivamente. Son medidas del tiempo que tarda el flanco de la señal en realizar una transición de un estado a otro. En los circuitos digitales modernos, estos valores suelen estar en el rango de nanosegundos o menor.

Los tiempos de subida y bajada se miden entre los puntos del 10% y el 90% de los niveles de tensión estático antes y después de la transición (a veces se utilizan puntos del 20% y del 80% como alternativas).

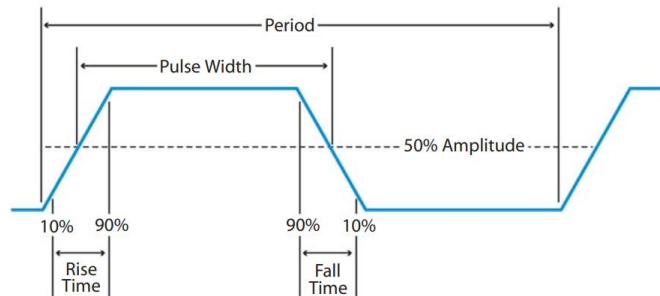


Figura 1 - <Características básicas de un pulso>

### 2.1.5 Ancho de pulso

El ancho de pulso es el tiempo que transcurre entre los flancos inicial y final de un pulso. Para tener en cuenta que el término "inicial" se aplica a los flancos positivos o negativos, al igual que el término "final". En otras palabras, estos términos denotan el orden en que ocurren los eventos durante un ciclo dado. La polaridad de un pulso no afecta su estado como flanco inicial o final.

Otro término, "ciclo de trabajo" (duty cycle), se usa para describir los intervalos de tiempo alto y bajo (encendido / apagado) de un pulso. Por ejemplo, un actuador que descansa 3 segundos luego de 1 segundo de actividad representa un duty cycle del 25% en un periodo de 4 segundos.

### 2.1.6 Offset

No siempre las señales tienen sus variaciones de amplitud centradas en una referencia de tierra (0V). La tensión de "offset" es la tensión entre la tierra del circuito y el centro de la amplitud de la señal. La tensión de offset expresa la componente de corriente continua de una señal que contiene valores tanto de corriente alterna como de corriente continua.

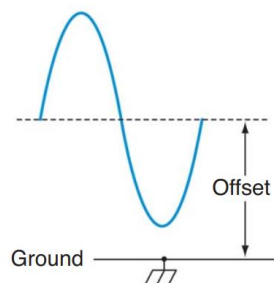


Figura 2 - <Tensión de offset sobre una señal alterna>

## 2.2 Conversor digital a analógico (DAC)

Un convertidor digital a analógico (DAC) es un dispositivo que convierte un código digital en una señal analógica. Los convertidores digitales a analógico son la interfaz entre el mundo digital abstracto y la vida real.

En la siguiente imagen puede apreciarse que N palabras digitales de n bits son aplicadas a la entrada del DAC, que luego se convierten en una señal analógica a la frecuencia de muestreo ( $F_s$ ) aplicada al clock del DAC.

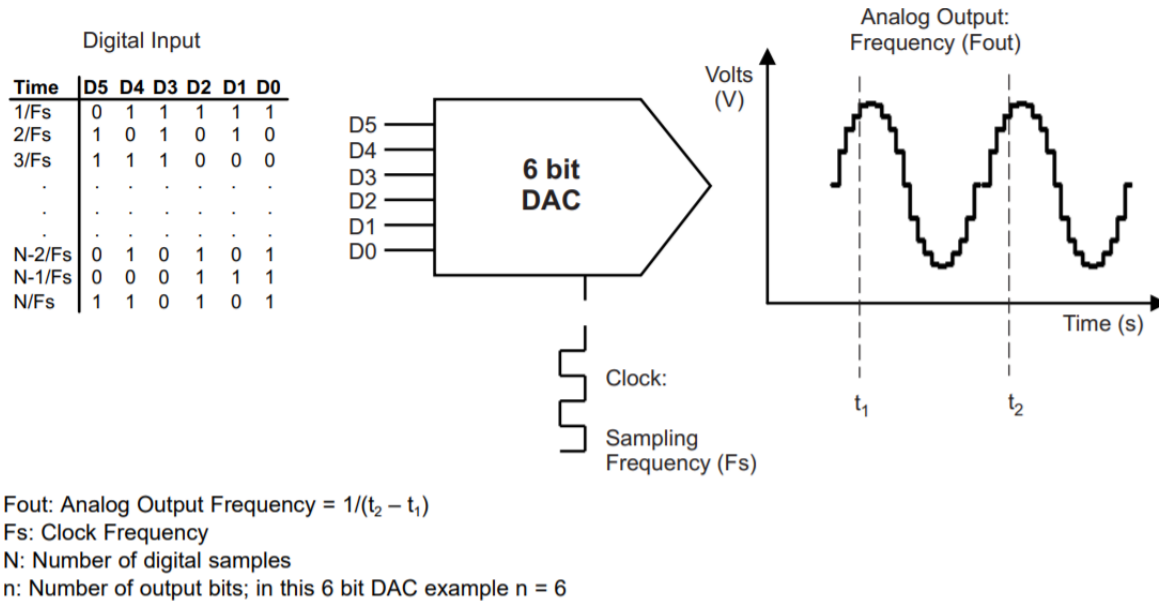


Figura 3 - <Características básicas del DAC>

## 2.2.1 Profundidad de memoria (longitud de registro)

La profundidad de la memoria, o la longitud del registro, está íntimamente ligada con la frecuencia del clock. La profundidad de la memoria determina el número máximo de muestras que se pueden almacenar. Cada punto de muestra de forma de onda ocupa una ubicación de memoria. Cada ubicación equivale al valor de un intervalo de muestra de tiempo a la frecuencia del clock actual. Si el clock funciona a 100 MHz, por ejemplo, las muestras almacenadas están separadas por 10 ns.

## 2.2.2 Frecuencia de muestreo

La frecuencia de muestreo, generalmente especificada en términos de MS/s o GS/s, denota el clock máximo o la frecuencia de muestreo a la que puede funcionar el instrumento. La frecuencia de muestreo afecta la frecuencia y fidelidad de la señal de salida. El teorema de muestreo de Nyquist establece que la frecuencia de muestreo debe ser más del doble que la componente de frecuencia espectral más alta de la señal generada, para garantizar una reproducción precisa de la señal. Para generar una señal de onda sinusoidal de 1 MHz, por ejemplo, es necesario producir puntos de muestra a una frecuencia de más de 2 MS/s.

## 2.2.3 Resolución Vertical

La resolución vertical se refiere al tamaño de la palabra binaria en bits del DAC del instrumento. Más bits equivalen a una resolución más alta. La resolución vertical del DAC define la precisión de amplitud.

(tensión) y la distorsión de la forma de onda reproducida. Un DAC con resolución inadecuada contribuye a errores de cuantificación, provocando una generación de forma de onda imperfecta.

### 2.2.4 Resolución Horizontal

La resolución horizontal expresa el incremento de tiempo más pequeño que se puede utilizar para crear formas de onda. Normalmente, esta cifra es simplemente el resultado del cálculo:

$T = 1 / F$  donde T es la resolución de tiempo en segundos y F es la frecuencia de muestreo.

## 2.3 Modulación por ancho de pulso (PWM)

La modulación por ancho de pulsos (PWM, de sus siglas en inglés) de una señal o fuente de energía es una técnica en la que se modifica el ciclo útil de una señal periódica (pudiendo ser una senoidal o una cuadrada), para transmitir información a través de un canal de comunicaciones o para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga.

El ciclo de trabajo de una señal periódica es el ancho relativo de su parte positiva en relación con el período. Expresado matemáticamente:

$$\text{Ciclo útil} = \frac{\text{Tiempo de la señal en esta alto}}{\text{Tiempo total del período}}$$

En la actualidad existen muchos circuitos integrados en los que se implementa la modulación PWM, además de otros muy particulares para lograr circuitos funcionales que puedan controlar fuentes conmutadas, controles de motores, controles de elementos termoeléctricos, etc.

## 3 Descripción técnica del proyecto

### 3.1 Hardware

Las prestaciones del equipo son las siguientes:

- Formas de onda: senoidal, semiverseno, diente de sierra, triangular, cuadrada, rectangular, ruido blanco y ondas arbitrarias.
- Para la forma de onda rectangular se puede elegir un ciclo de trabajo del 1% al 99% con una resolución de 8 bits.
- Rango de frecuencia: 1Hz a 20kHz
- Resolución de frecuencia: +/- 1Hz para frecuencias bajas; +/- 100Hz para frecuencias altas
- Amplitud: 0Vpp a 20Vpp
- Resolución de amplitud: 200mV
- Offset: +/- 5V
- Resolución del offset: 20mV
- Cantidad de muestras: 4000

### 3.1.1 Diagrama en bloques

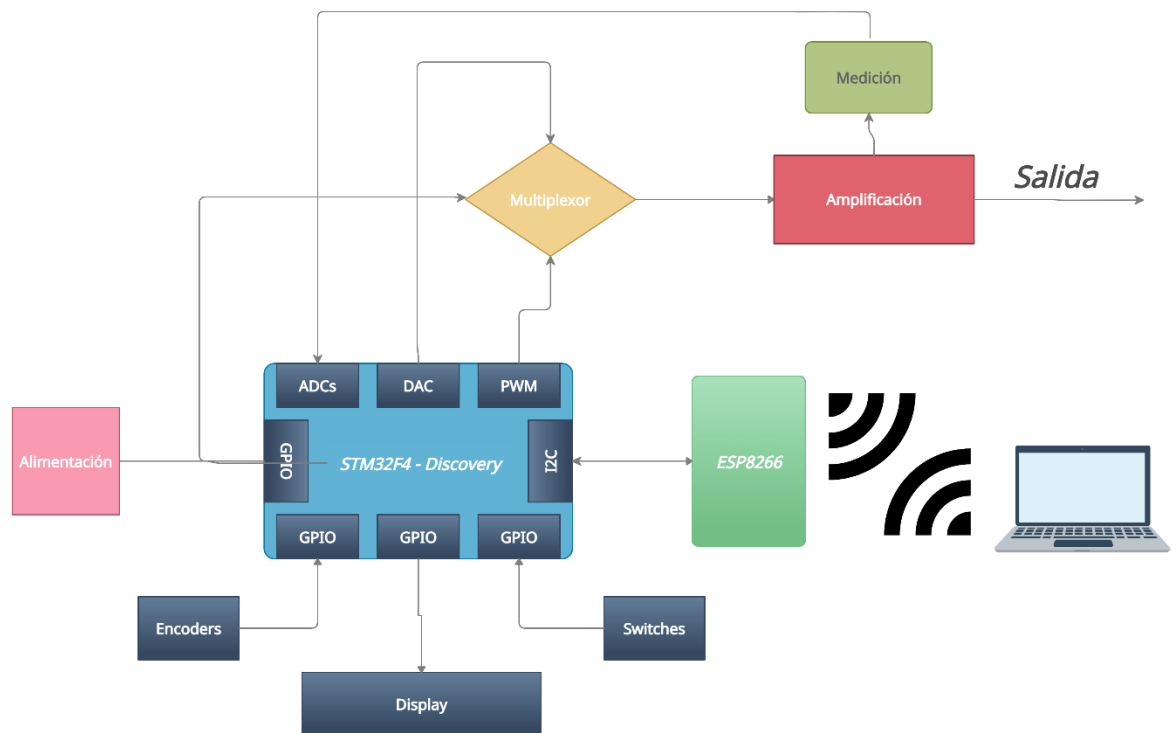


Figura 4 - <Diagrama en bloques del proyecto>

A partir de una fuente de 24V se alimenta al equipo, donde se derivan los niveles de tensión necesarios para cada bloque. Los diferentes periféricos de los que se hablará a continuación forman parte del kit de desarrollo STM32F4 – Discovery.

Dentro de los GPIO (periféricos generales de entrada/salida) de entrada, nos encontramos con encoders rotativos y switches que nos permiten interactuar con un simple menú que nos permiten elegir distintas pantallas, elegir formas de onda y seleccionar valores de magnitudes unidad por unidad. El menú puede visualizarse en un display de 20x4 caracteres (periférico general de salida).

La forma de onda elegida puede ser generada a través del DAC (convertor digital a analógico) para formas de onda clásicas como seno, semiverseno, triangular, diente de sierra y ruido blanco y otras especiales como las ondas arbitrarias. Luego con el PWM puede generarse formas de onda tal como cuadrada y rectangular. Tanto la salida del DAC como PWM están conectadas a un multiplexor que selecciona solo una sola señal, dicha selección está controlada por un GPIO proveniente del microcontrolador. Posteriormente, la señal elegida es amplificada y acondicionada para ser leída por un ADC, dichas magnitudes pueden ser consultadas en cualquier momento en el display.

El bloque perteneciente al ESP8266, levanta un servidor que permite la gestión de ondas arbitrarias a través de WiFi y se comunica con el microcontrolador utilizando el protocolo I2C. Las ondas arbitrarias deberán ser generadas previamente con un software especializado para dicha actividad y luego cargadas al sitio web en LAN para que el usuario gestione las formas de onda cargadas en el servidor.



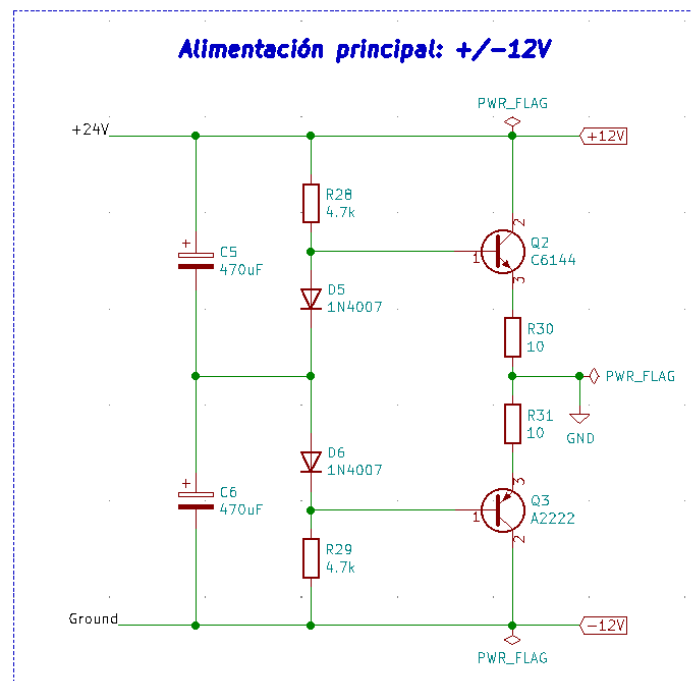
### 3.1.2 Esquemático

#### 3.1.2.1 Bornera de fuente de alimentación

Una simple bornera de dos pines alimenta a todo el circuito con una fuente de 24V.

### 3.1.2.2 Alimentación principal +/-12V

La fuente de 24V es dividida en +/-12V con una tierra virtual.



**Figura 5 - <Esquemático de alimentación +/-12V>**

### 3.1.2.3 Alimentación principal +5V y 3.3V

Las tensiones de alimentación de +5 y +3.3V se logran con circuitos integrados de reguladores, LM7805 y LM7833 respectivamente. La tensión de entrada en cada caso es de +12V y se colocan capacitores tanto en la entrada como en la salida tal como especifica la hoja de datos. En la entrada un capacitor electrolítico de 0.22uF con referencia a GND por si el filtro de fuente se encuentra lejos del regulador y en la salida un capacitor cerámico de 100nF con referencia a GND para mayor estabilidad.

#### 3.1.2.4 STM32F4-Discovery Kit

Se utiliza a la placa de desarrollo como eje central de este proyecto. Se encarga de generar las formas de onda, aplica el algoritmo matemático necesario para la obtención de cada señal y también el algoritmo

para determinar la cantidad de muestras y la frecuencia de muestreo, tanto para las formas de onda que correspondan al DAC o al PWM. También es el responsable de enviar las cadenas de caracteres que se desean imprimir en el display (enable (E), reset (RS), DB4-DB7), de colocar el valor lógico correspondiente en ChSelect para conmutar la salida del multiplexor, de interpretar la posición de los dos encoders (CLKx, DTx y SWx), de atender las interrupciones de hardware de los dos pulsadores (SW3 y SW4), de recibir la información correspondiente de las ondas arbitrarias mediante el protocolo I2C (SDA y SCL) que actúa como esclavo y de interpretar los valores de tensión recibidos a las entradas de los tres ADCs: tensión de salida amplificada de la señal (AmpDac), tensión de salida del offset (OffsetDac) y signo del offset (PolarityDac). Es alimentada con +5V provenientes de una conexión USB.

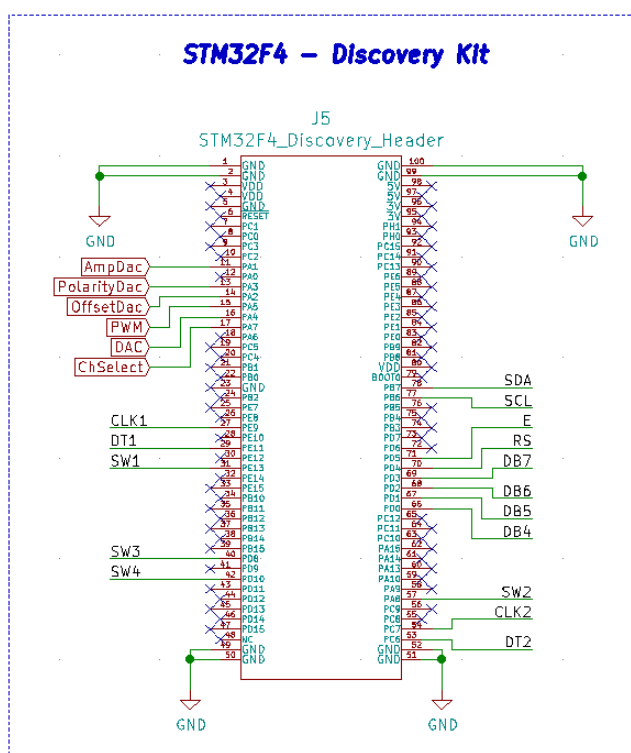


Figura 6 - <Esquemático del kit STM32F4 - Discovery>

### 3.1.2.5 ESP8266 – NODEMCU – 1.0

El ESP8266 NODEMCU es un kit de desarrollo que ofrece una solución completa con conectividad WiFi, lo que le permite alojar la aplicación o servir como puente entre internet y un microcontrolador.

Se eligió este kit por su practicidad en cuanto aspectos de alimentación vía puerto micro USB, facilidad de programación, tamaño de memoria y la posibilidad de expansión del proyecto, dado que hay muchos periféricos aún disponibles.

Esta versión en particular cuenta con 30 pines disponibles para el usuario de los cuales nos son de interés los pines de +3.3V de alimentación y los de comunicación I2C (SCL y SDA), con los cuales el ESP8266 establece una comunicación como maestro, con el microcontrolador. El fin de este dispositivo en el

proyecto es levantar un servidor (WebSocket) que aloja una página web (HTML, CSS, JS) en la red de área local (utilizando DHCP) para listar, subir, enviar (I2C) y borrar archivos que almacenen conjuntos de muestras de formas de ondas arbitrarias (.csv).

#### 3.1.2.6 Display 2004A

Es un display de 20x4 caracteres, que se alimenta con +5V y lleva un capacitor de 100nF como protección contra sobretensiones. El ánodo se conecta a +5V y el cátodo a GND (para encender el display). Luego el brillo de los caracteres se regula con un trimpot de 10k conectado al pin VO del display, como recomienda la hoja de datos del fabricante. Se conecta de tal manera para que funcione como divisor resistivo, con la alimentación en los extremos y el punto medio conectado a VO. Luego los pines de información solo se utilizan de DB4-DB7 y los de control como Reset (RS), Enable (E) y Read/Write(RW) a GND para realizar escrituras.

La función del display en el proyecto es mostrar las diferentes “pantallas” del menú, para una fácil interacción entre el usuario y el equipo. Se eligió por su practicidad, bajo precio y experiencia previa con esta clase de display.

#### 3.1.2.7 Switches

Dos simples switches conectados entre GND y los GPIO del microcontrolador, funcionan como interrupciones externas de hardware para desplazarse por las distintas pantallas del menú, de arriba hacia abajo y viceversa.

#### 3.1.2.8 Encoders

Dos encoders rotativos KY-040 se utilizan para que el usuario interactúe en cada “pantalla” del menú, permitiendo seleccionar unidades y números referentes a magnitudes tales como frecuencia y duty cycle y seleccionar la forma de onda de salida. Uno de los encoders se encarga siempre de los desplazamientos en el eje horizontal y el otro de los encoders se encarga siempre de los desplazamientos en el eje vertical.

Cada encoder tiene 5 pines, DT, SW, CLK, +5V y GND. Los primeros tres son conectados al microcontrolador principal y controlados por un timer en modo encoder y los otros dos pines a alimentación. Se eligieron pensando en una experiencia de usuario diferente a utilizar un teclado matricial y porque el microcontrolador ofrece un modo de configuración idóneo para este tipo de periférico.

#### 3.1.2.9 Selección de señal

En este apartado se logra que con un estado o alto o bajo proveniente de ChSelect pueda elegirse que la señal del DAC o del PWM pase a una instancia de amplificación. Para ello se utilizó un integrado multiplexor/demultiplexor, el CD4051. Este posee, ocho entradas, una salida, tres pines de control y un pin de habilitación. Este integrado es alimentado con +5V y lleva un capacitor de 100nF como protección contra sobretensiones. De las ocho entradas utilizamos solo dos, cableadas a DAC y PWM, X0 y X1 respectivamente. Con solo el pin de control A se logra controlar la selección entre ambas entradas (X0 y X1), mientras que los pines B, C y INHIBIT permanecen conectados a GND (*ver tabla de verdad*).

Según la hoja de datos, con una alimentación de +5V, se necesita una tensión de hasta 1.5V para que el integrado interprete un "0" lógico y más de 3.5V para un "1" lógico. Dado que la tensión de salida de los pines del microcontrolador principal excursionan entre 0V y 3.3V necesitamos shiftear o adaptar los niveles de tensión. Como solución a este problema se implementó un circuito level shifter con un JFET BF245B. El gate del mismo está conectado a GND, el source a ChSelect y el drain a la salida del pin del control A y a +5V a través de un resistor de 10kΩ. Cuando ChSelect es 0V la tensión entre gate y source es también 0V, por lo tanto, la VGS del transistor es 0V, entonces no fluye corriente a través del drain y la tensión en A, es de alrededor de 0V. Si ahora en ChSelect se aplica una tensión de 3.3V, la VGS será de 3.3V y logramos que la tensión en el drain y por lo tanto en A, sea de 5V.

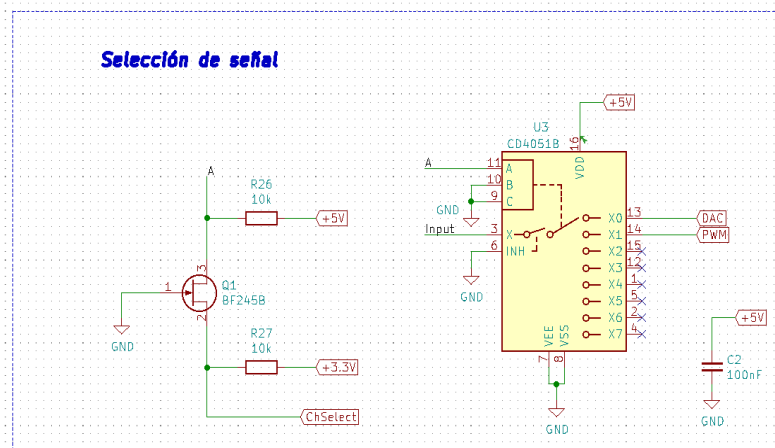


Figura 8 - <Esquema de selección de señal>

TRUTH TABLES				
INPUT STATES				"ON" CHANNEL(S)
INHIBIT	C	B	A	
CD4051B				
0	0	0	0	0
0	0	0	1	1
0	0	1	0	2
0	0	1	1	3
0	1	0	0	4
0	1	0	1	5
0	1	1	0	6
0	1	1	1	7
1	X	X	X	None

Figura 7 - <Tabla de verdad de selección de canal del CD4051>

### 3.1.2.10 Amplificación y acondicionamiento de la señal de amplificación

Posterior a la selección de la señal, la etapa que siguiente es la de amplificación. Primeramente, se desacopla de su componente de continua, dado que la señal que genera el DAC tiene una tensión mínima de 0V y una máxima de 2.92V (limitada para no deformar la forma de onda), lo que implicaría que ya tiene un offset de 1.46V aproximadamente. De esta manera, montamos el centro de la señal sobre 0V. Se utilizan dos capacitores en paralelo de 133uF en total (100uF + 33uF). Realizamos esta configuración con valores experimentales ya que en la práctica se observó que la señal de salida estaba derivándose para bajas frecuencias (< 20Hz), dado que el capacitor de desacople seguido por un amplificador inversor toma la topología de un amplificador derivador. Según una simulación en LTSpice, se comprobó que para valores de  $R_{10} = 33k\Omega$  y  $R_7 = 5.6k\Omega$ , a pesar de obtener una ganancia cercana a la deseada ( $G = -R_{10}/R_7$ ) el efecto del derivador actuaba para frecuencias menores a 20 Hz.

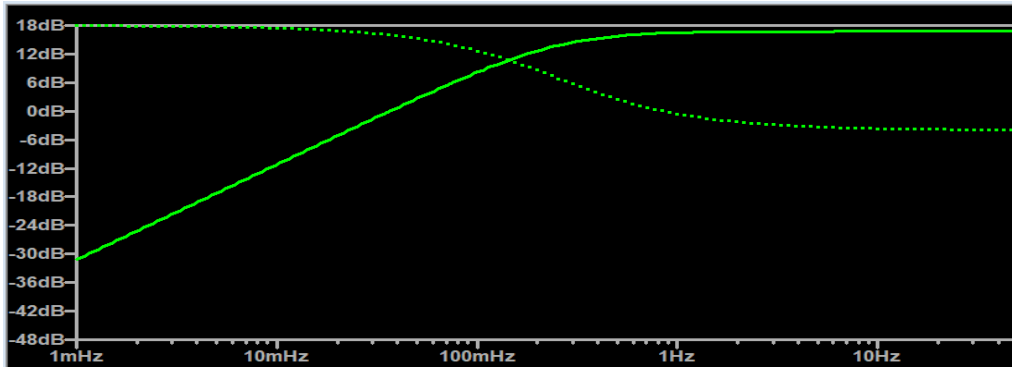


Figura 9 - <Respuesta en frecuencia con  $R_{10} = 33k\Omega$  y  $R_7 = 5.6k\Omega$  >

Del gráfico observamos que  $f_{-3db} = \sim 3\text{ Hz}$  y  $f_{0db} = 36\text{mHz}$

Como solución se elevaron los valores de  $R_{10}$  y  $R_7$  para que el efecto de derivación no ocurra en el rango de frecuencias de este generador. Los nuevos valores de resistores propuestos son  $R_{10} = 680k\Omega$  y  $R_7 = 100k\Omega$ .

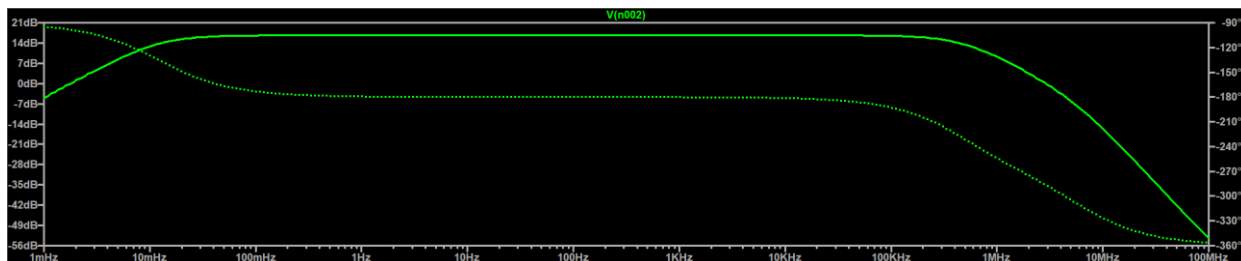


Figura 10 - <Respuesta en frecuencia con  $R_{10} = 680k\Omega$  y  $R_7 = 100k\Omega$ .>

Del gráfico observamos que  $f_{-3db} = \sim 160\text{ mHz}$  y  $f_{0db} = 1.76\text{mHz}$

La ganancia es constante entre 1Hz y 20kHz. El efecto del derivador ocurre entre 1.76mHz y 160mHz. También ocurre que la señal es integrada para señales a partir de 1MHz.

Una vez desacoplada la señal la señal es amplificada con un amplificador operacional (TL072, doble AOP de propósito general) en configuración inversora y alimentado con  $\pm 12\text{V}$ , que se rige por la siguiente ecuación:

$$V_i * \frac{680k\Omega}{100k\Omega} = V_o \rightarrow V_i * 6.8 = 2.92V * 6.8 = 19.85V_{pp}$$

Cumpliendo con el requerimiento de entregar alrededor de 20Vpp. Ahora bien, lo que hemos conseguido hasta aquí es que la señal alcance su valor máximo, aunque sin regulación. Entonces utilizamos un potenciómetro de 100kΩ para atenuar la señal hasta un valor mínimo de  $19.85V_{pp} * \frac{1\Omega}{100k\Omega} = 0.19\text{mV}_{pp}$

y un máximo de 20Vpp. Finalmente se emplea el otro AOP de la pastilla como buffer y entregar una señal con muy baja impedancia de salida.

Un detalle no menor, es que el potenciómetro empleado es un potenciómetro doble, si se observa en el esquemático se observa que los pines del segundo potenciómetro están conectados a GND y +3.3V y el pin AmpDac que se cablea al ADC1 del microcontrolador principal. Es decir que por la salida AmpDac, la tensión puede pivotar entre 0V y 3.3V, comportándose como un acondicionador de la señal amplificada, mientras que la tensión en el primer potenciómetro excursiona entre 0.20mVpp y 20Vpp. Esto es posible de lograr dado que ambos potenciómetros están ligados mecánicamente y no eléctricamente.

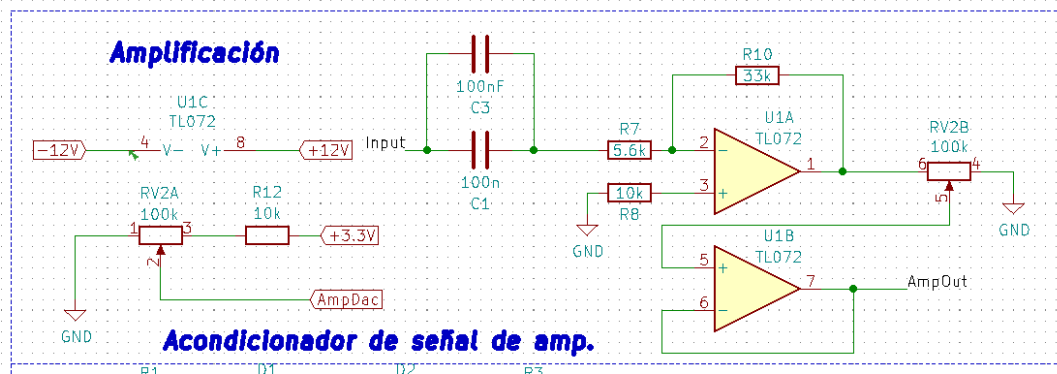


Figura 11 - <Esquemático del amplificador de la señal>

### 3.1.2.11 Generación de la tensión de offset

Para generar un valor de tensión continua (offset) que pudiese excursionar entre -5V y +5V y limitar la corriente en 1mA se planteó el circuito de la figura. Donde se utilizan, en un principio, dos diodos Zener y tres resistores conectados en sus extremos a -12V y +12V. La ecuación matemática es la siguiente:

$$-12V - (R2 + RV1 + R4) * I + 12V = 0V$$

Supongamos que limitamos la corriente  $I$  a 1mA. Si despejamos la suma de  $R2$ ,  $RV1$  y  $R4$ , obtendríamos que se necesitan 24kΩ en total. Podríamos entonces elegir dos resistores de 7kΩ y uno de 10kΩ, pues la suma es 24kΩ. Ahora bien, no existen resistores de 7kΩ y lo más próximo a ello es poner en paralelo dos resistores, uno de 8.2kΩ y otro de 47kΩ, resultando en una resistencia equivalente de 7kΩ. y un potenciómetro de 10kΩ para lograr una variación entre -5V y +5V.

De aquí nos encontramos con dos problemas. El primero es que la tensión en los zeners nunca llegaba a ±5V y el segundo problema, que girar la perilla del potenciómetro provocaba saltos de tensión aleatorios.

Si observamos el primer problema, tendríamos que analizar que ocurre con el potencial en  $R2$ ;  $RV1$  y  $R4$ ;  $RV1$ . Tomamos el nodo  $R2$ ;  $RV1$ , el potencial allí es:

$$-12V - 7k\Omega * -1mA = -5V$$

Análogamente para  $R4$ ;  $RV1$ , la tensión en el nodo será de +5V. A primera vista se creía que eso era lo que se buscaba, pero al mismo tiempo ese era el problema. Los pares de zeners de 5.1V y 5.6V probados no

estaban operando dado que la tensión estaba por debajo del umbral de su funcionamiento (10V de diferencia de potencial en el potenciómetro). Como solución se reemplazó el potenciómetro de 10kΩ por otro de 100kΩ. Si volvemos a plantear las ecuaciones anteriores:

$$-12V - (7k\Omega + 100k\Omega + 7k\Omega) * I + 12V = 0V$$

Despejando I, obtenemos que  $I = 210\mu A$ . Luego comprobamos el potencial en R2;RV1,

$$-12V - 7k\Omega * -210\mu A = -10.53V$$

Es decir que ahora sobre el potenciómetro hay una diferencia de potencial de alrededor de 21V y los zeners pueden actuar. En la práctica se midieron  $\pm 5.20V$  con diodos zeners de 5.6V. El segundo problema fue solucionado reemplazando el potenciómetro de 100kΩ por un trimpot de 100kΩ.

Por último, se empleó un amplificador operacional TL072 como buffer por cuestiones de impedancia.

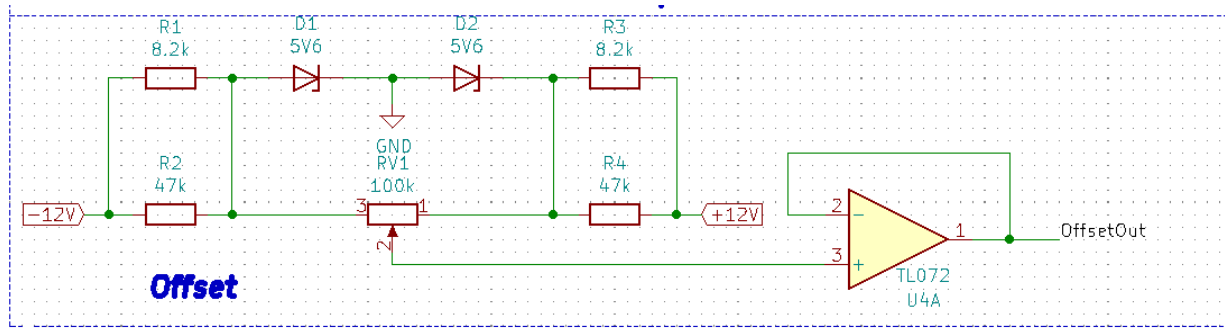


Figura 12 - <Esquemático del generador de offset>

### 3.1.2.12 Suma de la señal amplificada y la tensión de offset

La señal de offset y la señal amplificada son sumadas en un amplificador operacional (TL072, alimentado con  $\pm 12V$ ) en configuración sumador inversor con ganancia unitaria. Si analizamos utilizando el principio de superposición, comprobaremos que la ganancia es unitaria.

Por ej.: si pasivamos la entrada OffsetOut nos queda que:

- $AmpOut - R5 * I = 0 \Rightarrow I = \frac{AmpOut}{R5}$
- $-R11 * I = Output \Rightarrow -R11 * \frac{AmpOut}{R5} = Output$
- Y como R11 y R5 son iguales (10kΩ)  $\Rightarrow AmpOut = -Output$

Análogamente  $OffsetOut = -Output$ , entonces,  $AmpOut + OffsetOut = -Output$

Todos los resistores son de 10kΩ por cuestiones de estabilización.

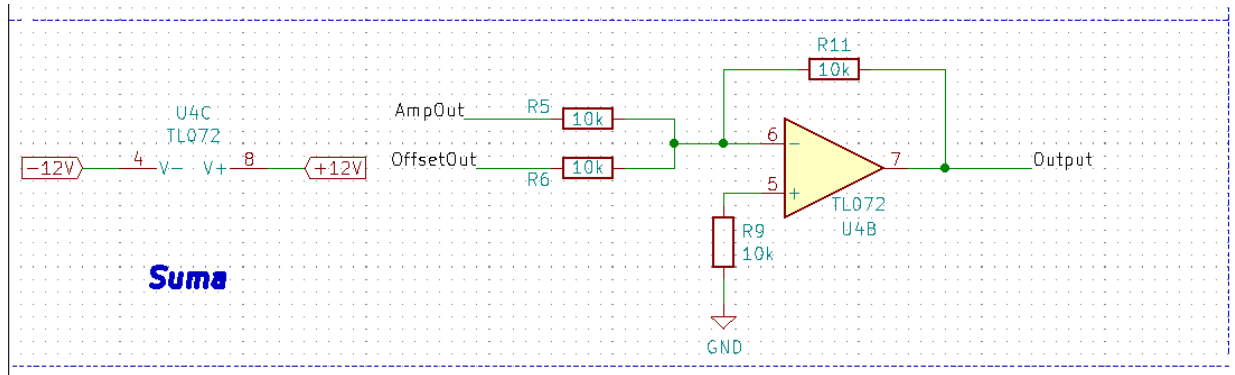


Figura 13 - &lt;Esquemático de la suma de señal CC y AC&gt;

### 3.1.2.13 Acondicionador de señal de la señal de offset

Si se desea medir el valor de la tensión de offset con un microcontrolador el problema más aparente que nos encontramos son los niveles de tensión. Ya que, a una entrada, y particularmente, a una entrada configurada como ADC, no es posible enviarle valores negativos o mayores a los de su tensión de referencia sin dañarlo. Por ello, se planteó la siguiente red, que nuevamente utiliza amplificadores operacionales TL072, alimentados con  $\pm 12V$ . Esta red cumple la función de traducir valores de 0V a 3V para el rango de 0V a -5V y de la misma manera, de 0V a 3V para el rango de 0V a +5V de offset.

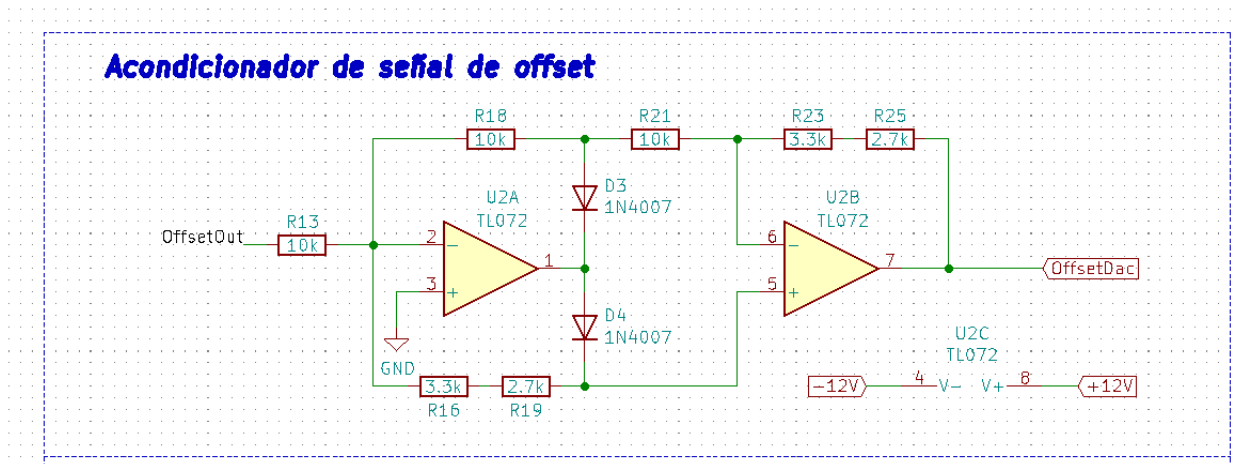


Figura 14 - &lt;Esquemático del acondicionador de la señal de offset&gt;

Este circuito debe ser analizado en dos partes. Una cuando la tensión OffsetOut > 0 y otra cuando es < 0.

#### 3.1.2.13.1 Caso I – OffsetOut positivo

- D4 resulta polarizado en inversa, no es considerado en el análisis

$$1. \text{OffsetOut} - R_{13} * I_{R1} = 0 \rightarrow I_{R1} = \frac{\text{OffsetOut}}{R_{13}}$$



2.  $I_{R1} = I_{R18} = I_1$
3.  $V_{o'} = V_{R18,R21}$
4.  $-R18 * I_1 = V_{o'} \Rightarrow -R18 * \frac{OffsetOut}{R13} = V_{o'} ; (1), (2) \text{ y } (3) \text{ en } (4)$
5.  $I_{R21} = I_2$
6.  $I_{R23,25} = I_2$
7.  $\frac{V_{o'}}{R21} = I_2 ; (3), (5) \text{ en } (6)$
8.  $-(R23 + R25) * \frac{V_{o'}}{R21} = OffsetDac ; (7) \text{ en } (8)$
9.  $(R23 + R25) * R18 * \frac{OffsetOut}{R13 * R21} = OffsetDac ; (4) \text{ en } (8)$

De la expresión (9) podemos determinar que ante un valor positivo de OffsetOut el circuito se comporta como un amplificador no inversor. Si fijamos R18, R13 y R21 en 10kΩ y despejamos R23+R25 tomando como OffsetOut = +5V y OffsetDac = +3V, obtenemos que R23+R25 = 6kΩ = 3.3kΩ + 2.7kΩ respectivamente.

### 3.1.2.13.2 Caso II – OffsetOut negativo

- D3 resulta polarizado en inversa, no es considerado en el análisis

1.  $OffsetOut + R13 * I_{R1} = 0 \rightarrow I_{R1} = -\frac{OffsetOut}{R13}$
2.  $I_{R16,19} = I_{R13} + I_{R18,21}$
3.  $V_x = V_{R18,R21,D4}$
4.  $(R18 + R21) * I_{R18,21} = V_x$
5.  $V_x - I_{R18,21} * (R23 + R25) = OffsetDac$
6.  $(R16 + R19) * I_{R16,19} = -(R18 + R21) * I_{R18,21}$
7.  $(R16 + R19) * \left( -\frac{OffsetOut}{R13} + I_{R18,21} \right) = -(R18 + R21) * I_{R18,21}$ 
  - $(R16 + R19) * I_{R18,21} - \frac{OffsetOut}{R13} * (R16 + R19) = -(R18 + R21) * I_{R18,21}$
  - $-\frac{(R16+R19)}{R13} * OffsetOut = -I_{R18,21} * (R16 + R19 + R18 + R21)$

$$\begin{aligned} & \circ \text{OffsetOut} * \frac{(R16+R19)}{R13*(R16+R19+R18+R21)} = I_{R18,21} \\ 8. & -(R18 + R21) * \text{OffsetOut} * \frac{(R16+R19)}{R13*(R16+R19+R18+R21)} - \text{OffsetOut} * \frac{(R16+R19)}{R13*(R16+R19+R18+R21)} * \\ & (R23 + R25) = \text{OffsetDac} \\ 9. & -\text{OffsetOut} * \frac{(R16+R19)}{R13*(R16+R19+R18+R21)} * (R18 + R21 + R23 + R25) = \text{OffsetDac} \end{aligned}$$

De la expresión (9) podemos determinar que ante un valor negativo de OffsetOut el circuito se comporta como un amplificador inversor. Ya sabíamos que:

- $R13 = R18 = R21 = 10k\Omega$
- $R23 = 3.3k\Omega$
- $R25 = 2.7k\Omega$

De aquí nos queda de incógnita  $R16$  y  $R19$ , si los despejamos de (9) tomando a  $\text{OffsetOut} = -5V$  y a  $\text{OffsetDac} = +3V$ . Obtenemos que  $R16 + R19 = 6k\Omega = 3.3k\Omega + 2.7k\Omega$  respectivamente.

De esta manera nos aseguramos en ambos casos que la tensión de salida sea positiva y acotada en el rango de 0V a 3V cableada al DAC2 del microcontrolador

### 3.1.2.14 Signo de la señal de offset

Anteriormente obtuvimos la magnitud del offset escalada a una tensión compatible con el microcontrolador. El detalle que ha sido pasado por alto es el signo de tal magnitud, por ello, el siguiente circuito cumple el rol de entregar valores positivos de 0V a 1.5V para una tensión de entrada de 0V a -5V y de 1.5V a 3V para una tensión de entrada de 0V a +5V.

Se utilizan dos amplificadores operacionales de un integrado TL072, alimentados con  $\pm 12V$ . El primer operacional se comporta como un sumador inversor y el segundo como un inversor de ganancia unitaria.

Aplicando el principio de superposición:

Para la entrada: OffsetOut

$$\begin{aligned} \text{OffsetOut} - R14 * I &= 0 \rightarrow I = \frac{\text{OffsetOut}}{R14} \\ -R20 * I &= V_{R20,R22} = Vx \\ Vx &= -R20 * \frac{\text{OffsetOut}}{R14} \end{aligned}$$

Para la entrada: +5V

$$+5V - R14 * I = 0 \rightarrow I = \frac{+5V}{R15}$$

$$-R20 * I = V_{R20,R22} = Vx$$

$$Vx = -R20 * \frac{+5V}{R15}$$

La suma de ambas Vx resulta  $Vx = -R20 * \left( \frac{+5V}{R15} + \frac{OffsetOut}{R14} \right)$

Como habíamos aclarado previamente, el segundo amplificador invierte la señal y tiene ganancia unitaria, entonces, la tensión PolarityDac resulta:

$$PolarityDac = R20 * \left[ \frac{+5V}{R15} + \frac{OffsetOut}{R14} \right]$$

Si fijamos  $R20 = 10k\Omega$ , debemos hallar  $R14$  y  $R15$  de tal manera que cumpla con nuestros requisitos. Plantearemos el siguiente sistema de ecuaciones:

$$1.5V = 10k\Omega * \left[ \frac{+5V}{R15} + \frac{-5}{R14} \right]$$

$$3V = 10k\Omega * \left[ \frac{+5V}{R15} + \frac{+5}{R14} \right]$$

Despejando y sustituyendo, obtenemos que los valores de  $R14 = R15 = 33k\Omega$

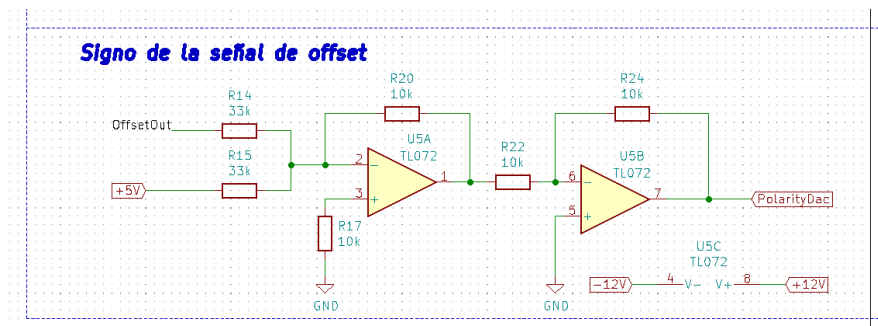


Figura 15 - <Esquemático de la obtención del signo de la señal de offset>

### 3.1.2.15 Bornera de alimentación y pines de entrada y salida

Se emplea una bornera de 5 pines para los distintos valores de alimentación, +12V, -12V, +5V, 3.3V y GND.

Una pinera de tres pines para las salidas del microcontrolador: DAC, PWM y ChSelect.

Una pinera de tres pines para las salidas de la sección de electrónica analógica: AmpDac, OffsetDac y PolarityDac.

Una pinera de dos pines para la salida de amplificación: Output, GND.

### 3.1.3 Circuito impreso

En esta sección se pueden hacer los comentarios que se consideren necesarios sobre el diseño del circuito impreso. La imagen de este completo se debe colocar en el anexo (no en el medio del desarrollo de esta sección).

Al momento de la entrega de este informe hay presentes tres circuitos impresos:

PCB de alimentación principal que involucra a los siguientes bloques:

- Bornera de fuente de alimentación,
- La alimentación principal de +/- 12V, +5V, 3.3V y GND virtual.

PCB de electrónica analógica que involucra a los siguientes bloques:

- Selección de la forma de onda
- Amplificación de la forma de onda
- Generación de la señal de offset
- La suma de la forma de onda y la señal de offset
- El acondicionamiento de la señal amplificada, la señal de offset y el signo de la señal de offset.
- Bornes de alimentación

PCB de interacción con que involucra a los siguientes bloques:

- Kit de desarrollo STM32F4- Discovery
- Módulo WiFi: ESP8266 NodeMCU 1.0
- Los dos encoders rotativos
- Los dos switches
- El display
- Bornes de alimentación

### 3.1.4 Fotos

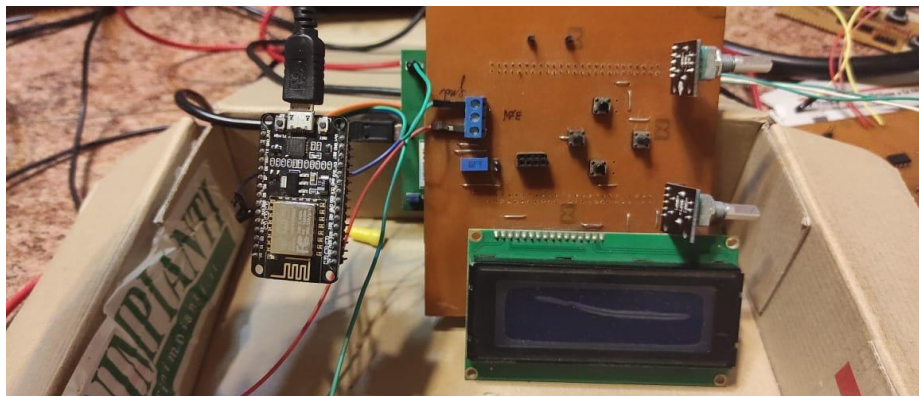


Figura 16 - <Foto de la placa microcontrolador>

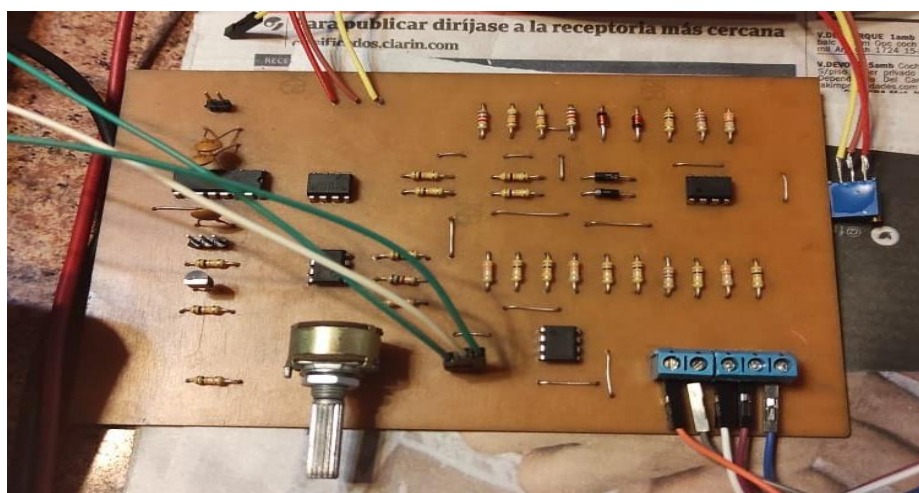


Figura 17 - <Foto de la placa de amplificación y acondicionamiento de señal>

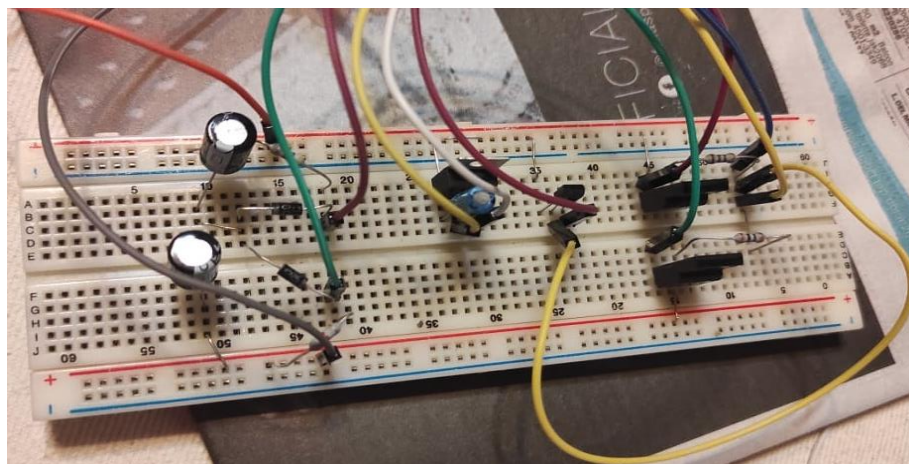


Figura 18 - <Montaje experimental de la fuente de alimentación del proyecto>

## 3.2 Software

### 3.2.1 Enumeración de rutinas

- Rutina “main”: <Bucle principal >
  - Subrutina “HAL\_Init” :<Reset de periféricos, inicialización de la interfaz Flash y del SysTick>
  - Subrutina “SystemClock\_Config” :<Configura el clock del sistema>
  - Subrutina “MX\_GPIO\_Init” : <Inicializa los GPIO>
  - Subrutina “MX\_DMA\_Init” : <Inicializa el DMA>
  - Subrutina “MX\_I2C1\_Init” : <Inicializa el I2C>
  - Subrutina “MX\_ADC3\_Init” : <Inicializa el ADC3>
  - Subrutina “MX\_DAC\_Init” : < Inicializa el DAC>
  - Subrutina “MX\_TIM1\_Init” : < Inicializa el timer 1, utilizado en modo encoder>
  - Subrutina “MX\_TIM2\_Init” : < Inicializa el timer 2, utilizado como base de tiempo para el PWM>
  - Subrutina “MX\_TIM3\_Init” : < Inicializa el timer 3 como base de tiempo en us para las rutinas del display>
  - Subrutina “MX\_TIM6\_Init” : < Inicializa el timer 6, utilizado como base de tiempo para el DAC>
  - Subrutina “MX\_TIM8\_Init” : < Inicializa el timer 8, utilizado en modo encoder>
  - Subrutina “MX\_ADC2\_Init” : <Inicializa el ADC2>
  - Subrutina “MX\_ADC3\_Init” : <Inicializa el ADC3>
  - Subrutina “HAL\_TIM\_Base\_Start” :<Arranca la base de tiempo del timer>
  - Subrutina “HAL\_TIM\_PWM\_Start” :<Arranca el PWM en la configuración dada>
  - Subrutina “HAL\_TIM\_Encoder\_Start ” :<Arranca el timer en modo encoder>
  - Subrutina “HAL\_GPIO\_WritePin ”:<Escribe el estado del pin>
  - Subrutina “welcome” :<Imprime un mensaje de bienvenida>
  - Subrutina “button\_check” :<Comprueba si un pulsador fue pulsado y que acción realizar>
  - Subrutina “menu” :<Ejecuta el menú>
- Rutina “menú” : <Determina la pantalla a mostrar>
  - Subrutina “HAL\_ADC\_Stop\_DMA”:<Detiene el ADC DMA>
  - Subrutina “selector” :<Determina la dirección de desplazamiento en el menú>
  - Subrutina “cls\_lcd” : <Limpia la pantalla del display>
  - Subrutina “print\_shifted” : <Imprime un string en una línea y posición particular en el display>
  - Subrutina “main\_screen” : <Muestra la pantalla principal>
  - Subrutina “waveforms\_menu” : <Menú de selección de la forma de onda a generar>
  - Subrutina “frequency\_menu ” :<Menú de selección de la frecuencia>
  - Subrutina “arbwave\_menu” :<Menú de obtención de la forma de onda arbitraria>
  - Subrutina “duty\_cycle\_menu” :<Menú de selección del duty cycle>
- Rutina “main\_screen” : <Imprime en el display todos los parámetros de la onda seleccionada>
  - Subrutina “print\_labels” :<Imprime los títulos>

- Subrutina “print\_params” :<Imprime forma de onda seleccionada, frecuencia y duty>
- Subrutina “print\_offset” :<Imprime el signo y la tensión de offset>
- Subrutina “print\_amplitude” :<Imprime la tensión de la forma de onda>
- Rutina “waveforms\_menu”: <Carga la pantalla donde se selecciona y genera la forma de onda>
  - Subrutina “recover\_view” :<Imprime un menú circular de formas de onda según la selección previa>
  - Subrutina “waveforms\_circularmenu” :<Desplaza circularmente el menú con una flecha que indica la onda seleccionada>
  - Subrutina “timer2\_init” :<Reinicia el timer 2 (ante problemas por el cambio del valor de un registro asociado al PWM en tiempo de ejecución) >
  - Subrutina “SampleRate\_Algorithm” :<Determina la cantidad de muestras y el sample rate>
  - Subrutina “Load\_Square” :<Genera la forma de onda cuadrada>
  - Subrutina “Load\_Rectangular” :<Genera la forma de onda rectangular>
  - Subrutina “Load\_Sine”:<Genera la forma de onda senoidal>
  - Subrutina “Load\_Hav” :<Genera la forma de onda semiverseno>
  - Subrutina “Load\_Triangular” :<Genera la forma de onda triangular>
  - Subrutina “Load\_Sawtooth” :<Genera la forma de onda diente de sierra>
  - Subrutina “Load\_White” :<Genera la forma de onda de ruido blanco>
  - Subrutina “HAL\_DAC\_Stop\_DMA” :<Detiene el DAC>
  - Subrutina “HAL\_DAC\_Start\_DMA” :<Arranca el DAC>
- Rutina “frequency\_menu” : <Carga la pantalla donde se determina la frecuencia>
  - Subrutina “print\_freqvalues”:<Imprime en pantalla las etiquetas y el valor de la frecuencia en Hz>
  - Subrutina “print\_arrowup”:<Imprime una flecha apuntando hacia arriba>
  - Subrutina “waveforms\_menu”:< Carga la pantalla donde se selecciona y genera la forma de onda >
  - Subrutina “refresh”:<Recalcula la frecuencia a partir de la variación de los encoders >
- Rutina “duty\_cycle\_menu” :<Carga la pantalla donde se determina el duty cycle>
  - Subrutina “print\_dutyvalues” :< Imprime en pantalla las etiquetas y el valor del duty cycle de manera porcentual >
  - Subrutina “print\_freqvalue” :< Imprime en pantalla las etiquetas y el valor de la frecuencia >
  - Subrutina “print\_arrowup” :< Imprime una flecha apuntando hacia arriba >
  - Subrutina “refresh” :< Recalcula el duty cycle a partir de la variación de los encoders >
  - Subrutina “print\_hltime” :<Imprime el duty cycle expresado en tiempos de actividad e inactividad>
  - Subrutina “Load\_Rectangular” :<Genera la fonda de onda rectangular>
- Rutina “arbwave\_menu”: <Recibe y parsea los datos de la onda arbitraria>
  - Subrutina “print\_shifted” : <Imprime un string en una línea y posición particular en el display>
  - Subrutina “HAL\_I2C\_Slave\_Receive\_IT” :<Recibe bytes por I2C de manera no bloqueante y los guarda en un buffer>

- Subrutina "params\_parser" :<Obtiene la cantidad de muestras y sample rate del stream de información recibida por I2C>
- Subrutina "flush\_buffer" :<limpia el buffer>
- Subrutina "load\_percentage" :<imprime el porcentaje de carga de la onda arbitraria>
- Subrutina "HAL\_DAC\_Stop\_DMA" :<Detiene el DAC>
- Subrutina "HAL\_DAC\_Start\_DMA" :<Arranca el DAC>

### 3.2.2 Descripción del funcionamiento de cada rutina

#### 3.2.2.1 Función: main

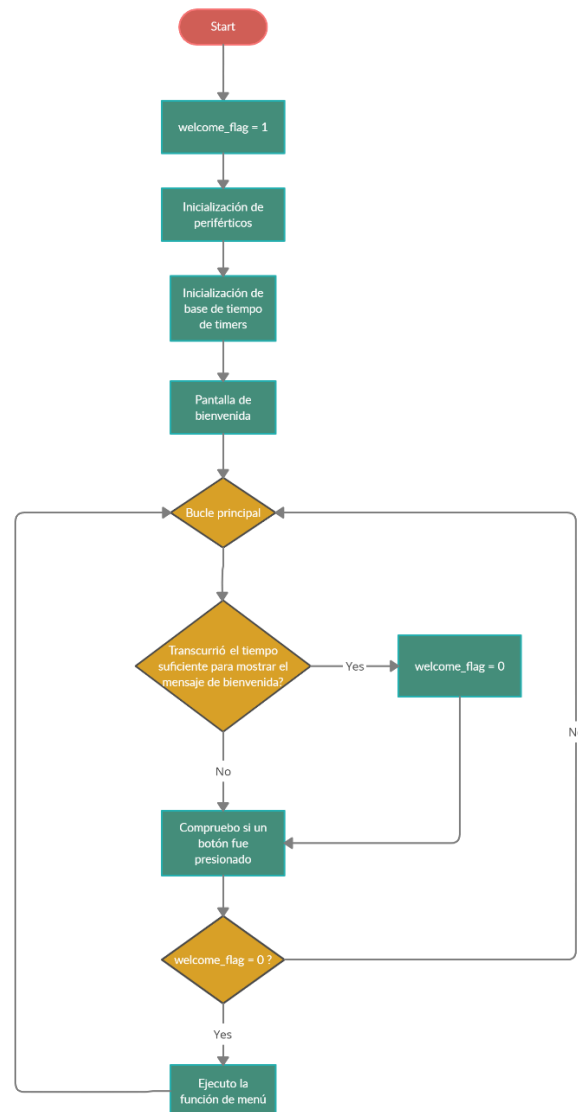


Figura 19 - <Diagrama de flujo de la función main>

La función menú devuelve un puntero a uint16\_t que es implementado como un vector dinámico donde se almacenan las muestras del DAC.



### 3.2.2.2 Función: menu

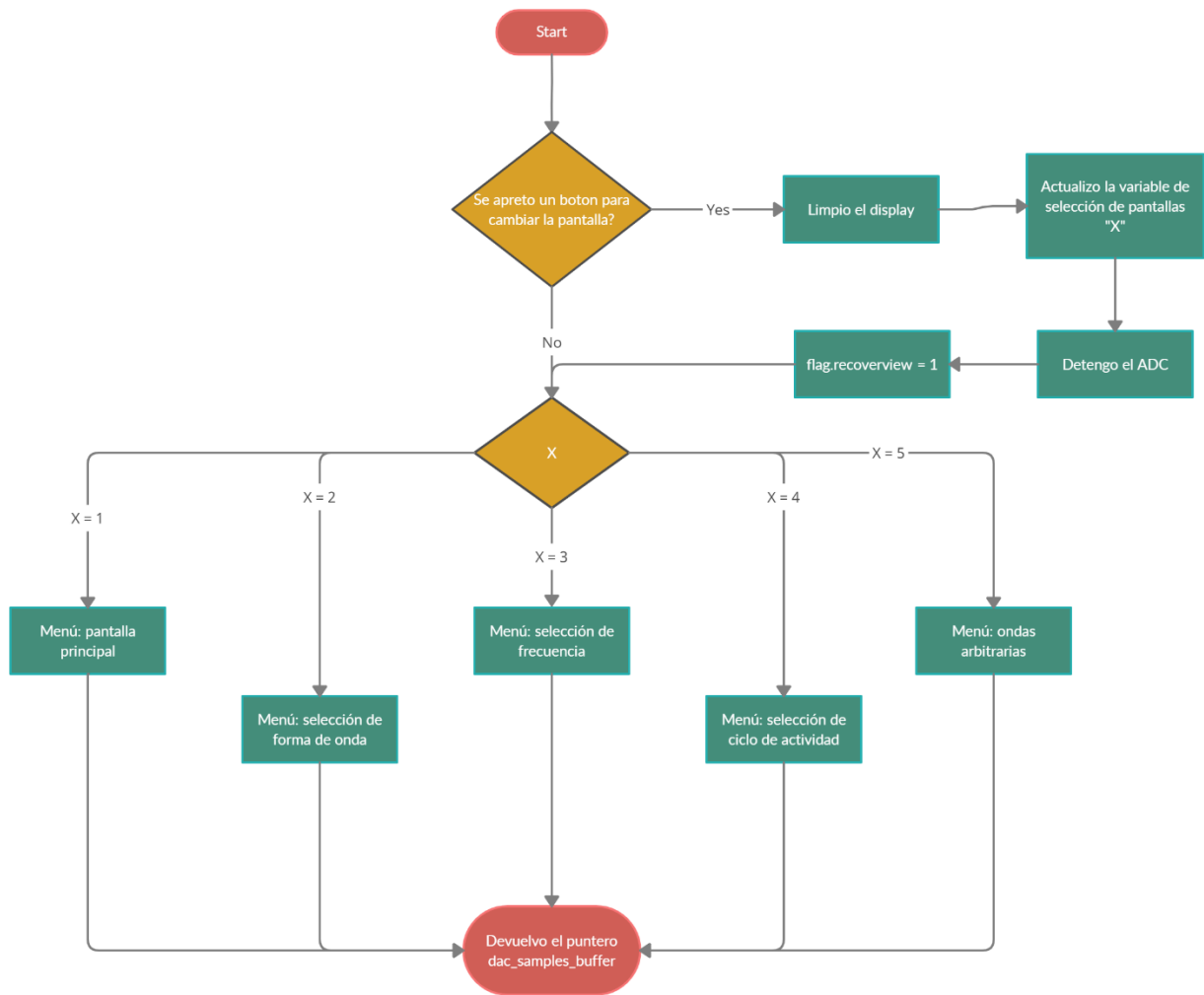


Figura 20 - <Diagrama de flujo de la función menú>

En la función “menu”, se procede a cambiar la pantalla de menú en el caso de presionar uno de los dos pulsadores. En base al pulsador presionado se determina la siguiente pantalla a mostrar, siguiendo un orden “circular”.

### 3.2.2.3 Función: main\_screen

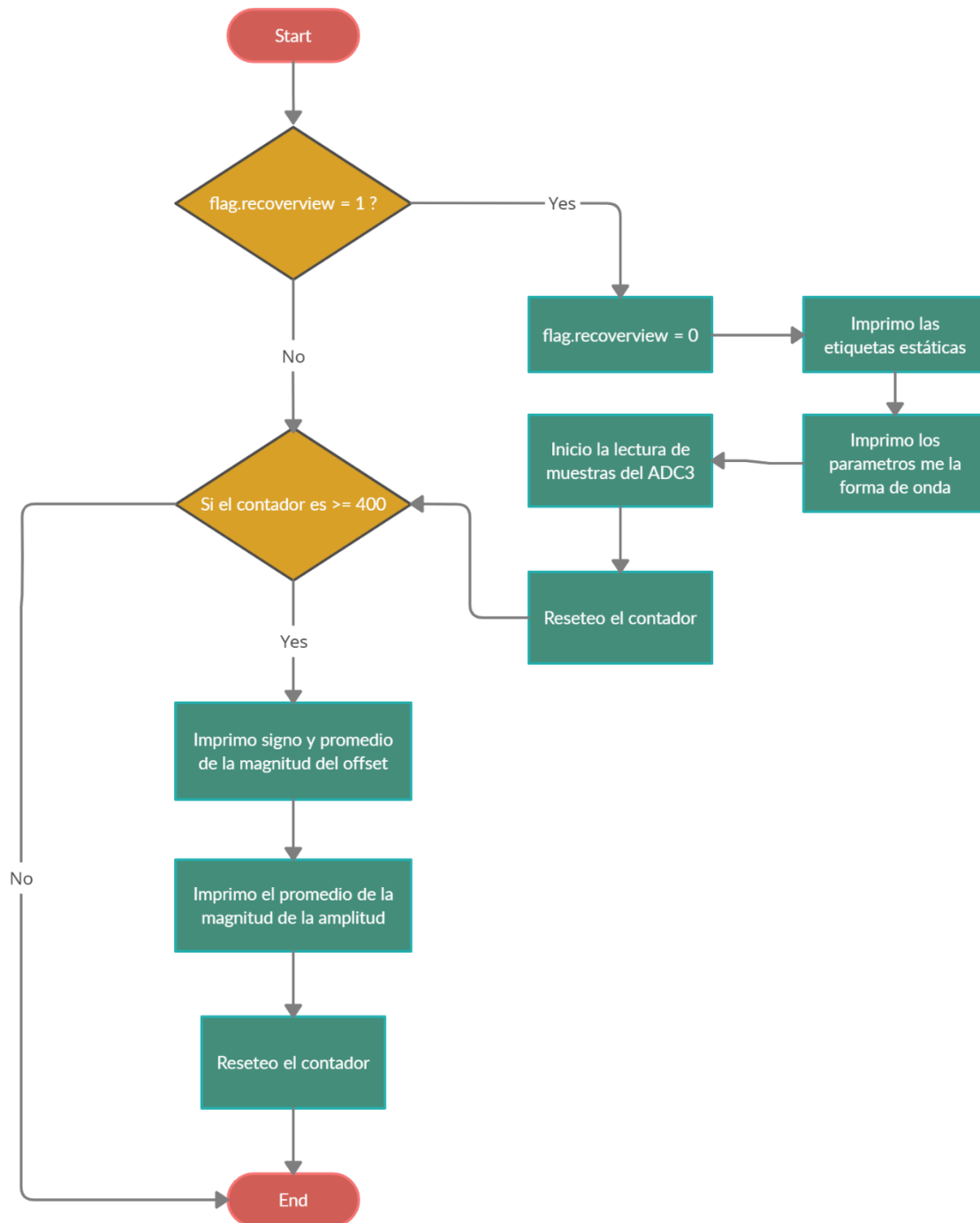


Figura 21 - <Diagrama de flujo de la funcion main\_screen>

El flag de recoverview se setea en 1 cuando se requiere actualizar la información en pantalla y por lo tanto es necesario volver a “recuperar la vista” o actualizar los valores o la forma de onda a generar.

### 3.2.2.4 Función: waveforms\_menu

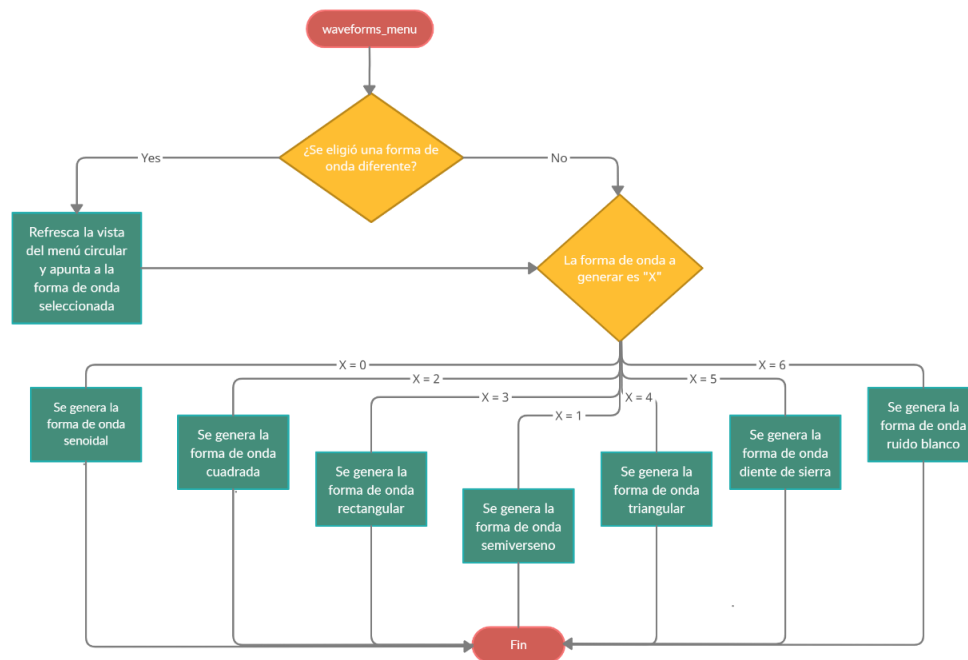


Figura 22 - <Diagrama de flujo de la función waveforms\_menu>

Un flag denominado “reloadwave” se setea en 1 cuando ocurren cambios en el valor de la frecuencia o el duty cycle.

La función SampleRate\_Algorithm se encarga de determinar la cantidad de muestras y el sample rate, para la gran mayoría de las formas de onda y se calcula como:

#### Variables

- frequency: valor de frecuencia deseado.
- samples: cantidad de muestras.
- f\_calc: valor de frecuencia calculado.
- sp\_calc: valor del sample rate calculado.
- arr\_calc: valor del registro de autoreload del timer calculado.
- offset\_calc: valor del offset, se obtiene del módulo de la diferencia entre frequency y f\_calc

#### Consideraciones

- arr max: 65535 cuentas
- samples\_max = 4000 muestras
- samples\_min = 100 muestras
- samplerate\_max = 10500000 Hz
- timer\_fclock: 84000000 Hz
- offset = 5 Hz

#### Pasos

1. Se parte de suponer que se usará la mayor cantidad de muestras para representar la forma de onda
2. Se calcula el tentativo valor del registro de autoreload del timer como:

$$arr\_calc = (timer\_fclock / frequency) * (1 / samples) - 1$$

3. Se calcula la frecuencia y el sample rate con el valor de arr calculado:

$$f\_calc = ((timer\_fclock) / (samples * (arr + 1)))$$

$$sp\_calc = ((timer\_fclock) / ((arr + 1)))$$

4. Condiciones que se deben cumplir
  - a. El  $sp\_calc$  debe ser menor o igual al 80% del  $samplerate\_max$ .
  - b. El  $arr\_calc$  debe ser menor o igual al  $arr\_max$ .
  - c. La  $f\_calc$  debe estar dentro de un rango de  $frequency \pm offset$ .
5. Luego se obtiene el valor de  $offset\_calc$

Se repiten los pasos del 2 al 5, decrementando la variable  $samples$  hasta encontrar el valor de  $offset\_calc$  más pequeño que cumpla con las condiciones a,b y c del punto 4. Cuando  $samples$  sea menor a  $samples\_min$ , en esa instancia, ya habremos obtenido el juego de valores óptimo de  $arr$  y  $sample\_rate$ .

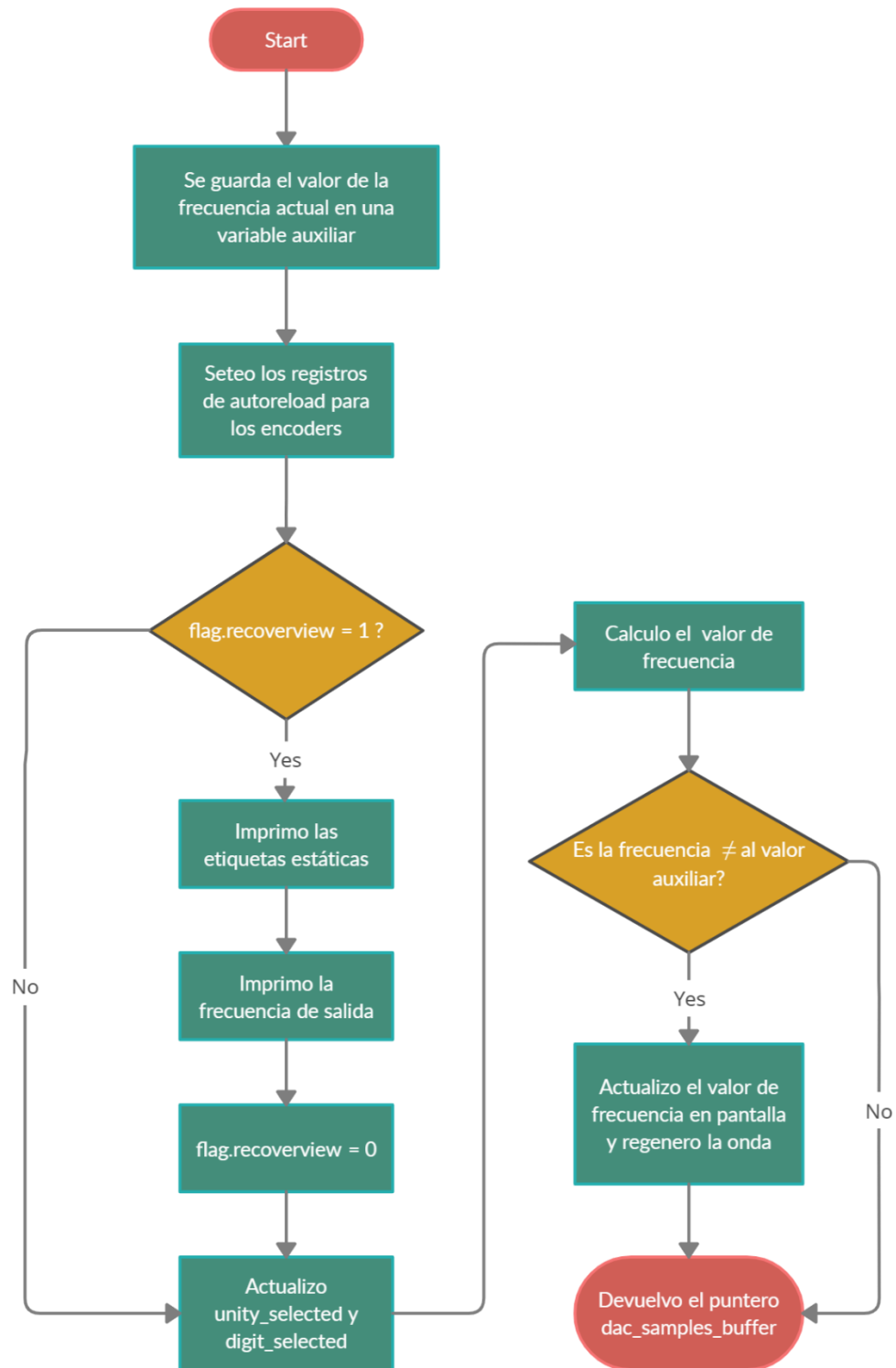
3.2.2.5 Función: *frequency\_menu*

Figura 23 - &lt;Diagrama de flujo de la funcion frequency\_menu&gt;

### 3.2.2.6 Función: *dutycycle\_menu*

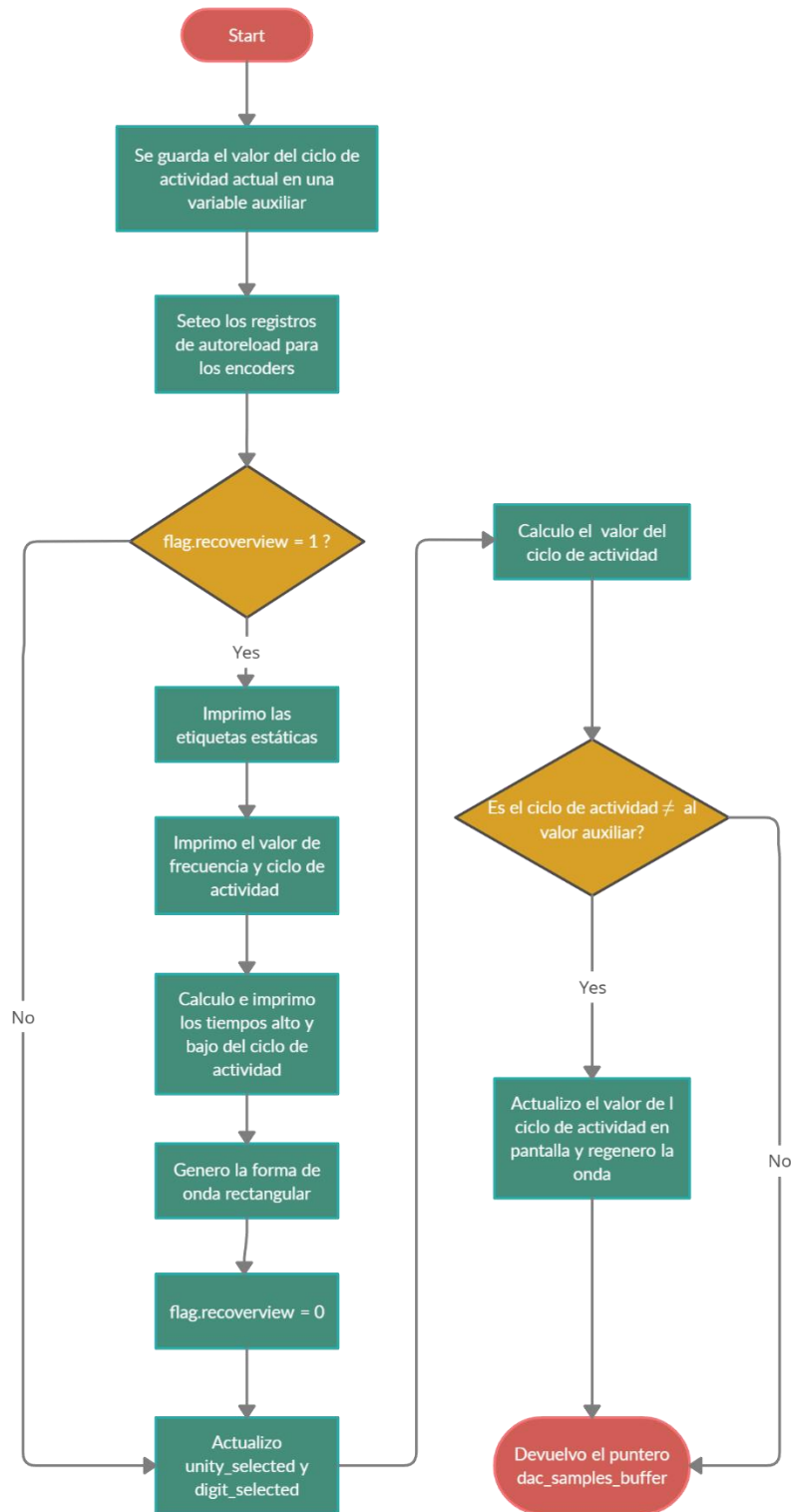


Figura 24 - <Diagrama de flujo de la funcion *dutycycle\_menu*>

### 3.2.2.7 Función: *arbwave\_menu*

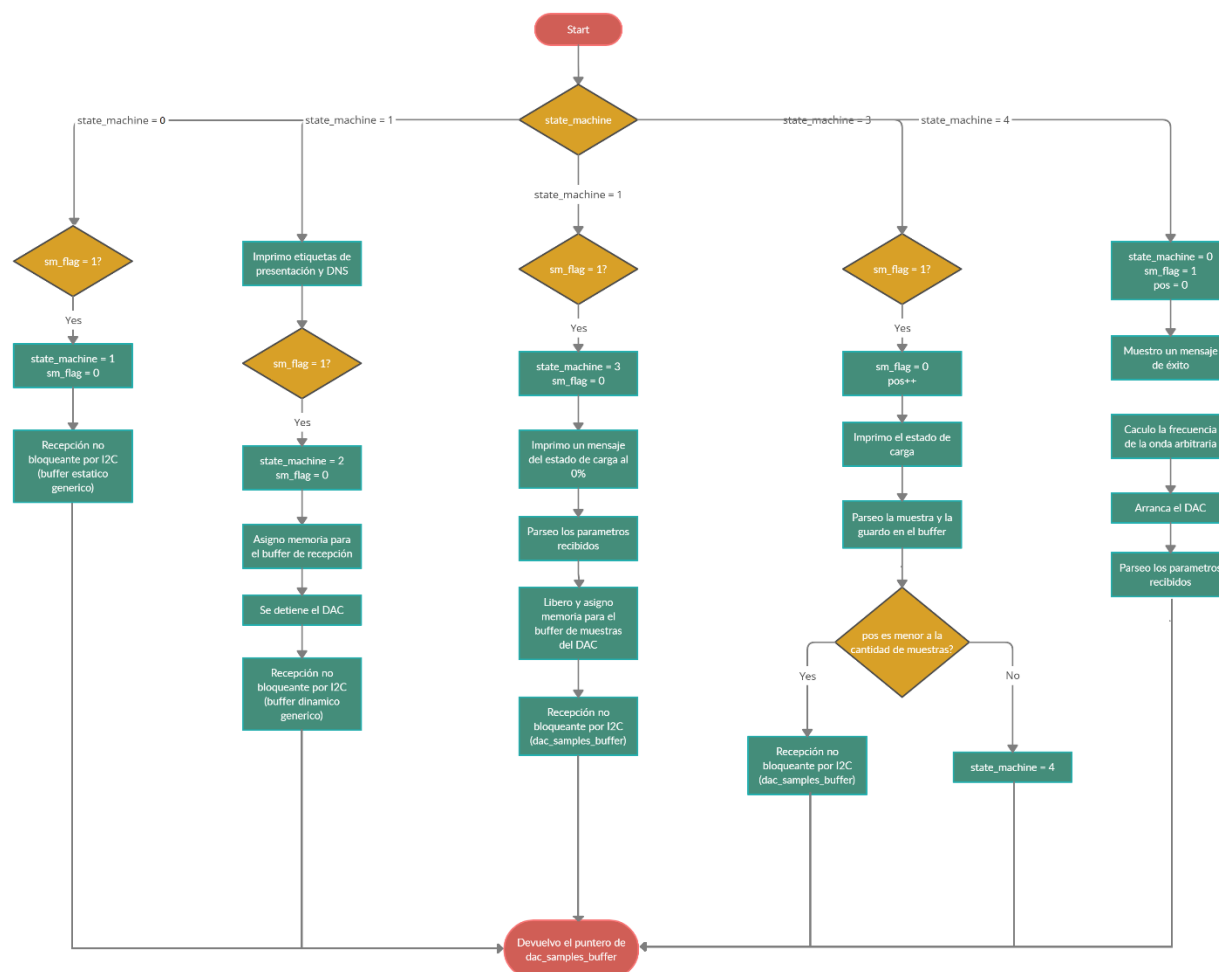


Figura 25 - <Diagrama de flujo de la funcion *arbwave\_menu*>

Cada vez que se ejecuta la función de recepción no bloqueante por I2C y una recepción ocurre, la variable *sm\_flag* se setea en 1 y se guarda en carácter en el buffer asignado en una función de callback. Si un error ocurre durante la recepción una función de callbacks de I2C notifica en el display el error.

## 3.3 Software propietario

Los archivos .csv que contienen los parámetros y muestras de ondas arbitrarias se crean utilizando un software de edición de formas de onda, el AFG Arbitrary Waveform Software de GwInstek.

### 3.3.1 AFG Arbitrary Waveform Software de GwInstek

Cuando se ejecuta el programa, un lienzo para dibujar formas de onda debajo aparecerá por detrás de un cuadro de diálogo de los parámetros iniciales, en donde se solicita la frecuencia de muestreo y el número

de puntos de datos (longitud horizontal) se mostrará de la siguiente manera. Primero ingrese los parámetros para estar listo y editar la forma de onda.

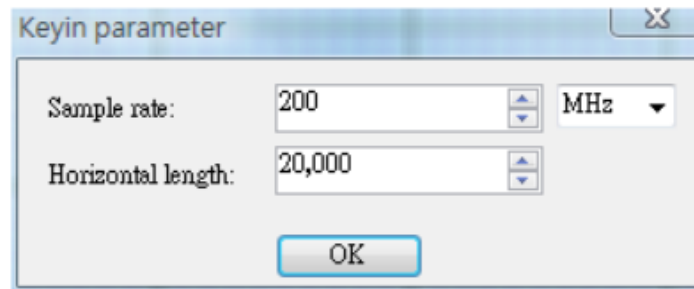


Figura 26 - <Cuadro de parámetros del lienzo>

Después de la entrada de parámetros, el lienzo de forma de onda se muestra como la siguiente imagen. En la parte superior del lienzo, están disponibles todas las formas de ondas disponibles para dibujar.

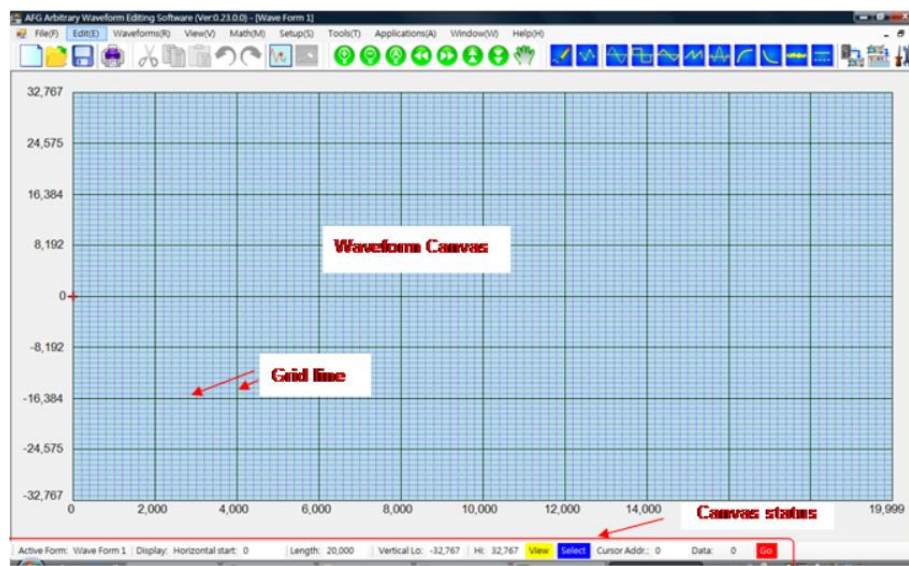


Figura 27 - <Vista del lienzo>

Al seleccionar una forma de onda predeterminada, aparecerá el siguiente cuadro de configuración:



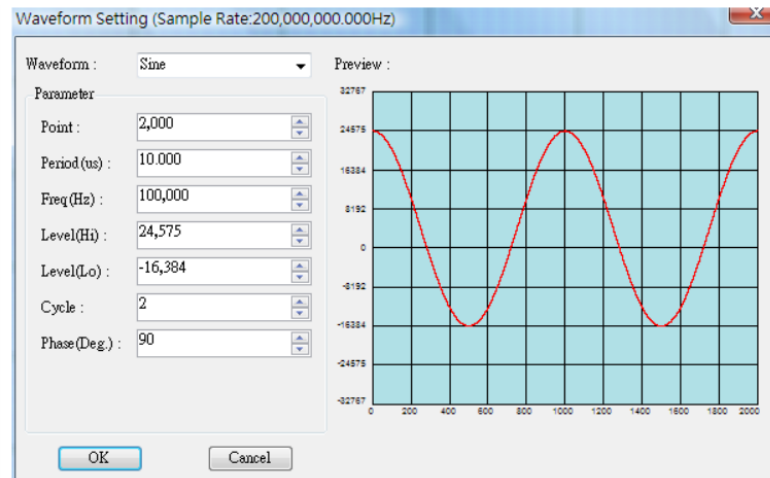


Figura 28 - <Cuadro de parámetros de la forma de onda>

- Punto: el número total de puntos de datos de la forma de onda. El rango es de 2 a la longitud máxima (decidido por la longitud máxima de edición del modelo).
- Periodo: el tiempo que tarda el total de puntos. Su fórmula es la siguiente:  

$$\text{Periodo} = (\text{el número total de puntos de datos} / \text{frecuencia de muestreo})$$
- Frecuencia: la inversa del periodo
- Nivel (Hi), Nivel (Lo): el valor pico positivo y negativo de la amplitud de la forma de onda. El rango corresponde a los bits del DAC (decididos por modelo).
- Ciclo: los tiempos de repetición de la forma de onda seleccionada se producen con los puntos de datos.
- Fase: retardo de fase de la forma de onda. El retraso de 90 grados se muestra en el ejemplo anterior.

Una vez terminada la edición, ir a File->Save as y guardar el archivo como .csv

El archivo de Excel tendrá el siguiente formato

	A	B
1	Start:	0
2	Length:	1000
3	Sample Rate:	200000000
4		0
5		154
6		309
7		463
8		618
9		772

Start:,0,  
 Length:,1000,  
 Sample Rate:.,200000000,  
 0,  
 154,  
 309,  
 463,  
 618,  
 772

Figura 29 - <Output del archivo .csv>

**Para un uso compatible con el dispositivo el nivel (LO) debe ser como mínimo 0 y el nivel (HI), como máximo 4000. La cantidad de muestras menor a 4000 y el sample rate menor a 2MS/s.**

## 4 Modo de operación

### 4.1 Menú

Como se mencionó en ítems anteriores, el equipo posee cinco pantallas con las cuales el usuario puede interactuar.

Al encender el equipo verá un mensaje de bienvenida, seguidamente se cargará la pantalla principal como se ilustra en la siguiente imagen. Aquí los encoders no tienen función alguna y solo es posible pulsar los botones de arriba o abajo para desplazarse a una pantalla diferente. Si gira cualquiera de los dos potenciómetros podrá ver cambios de tensión en amplitud y offset.

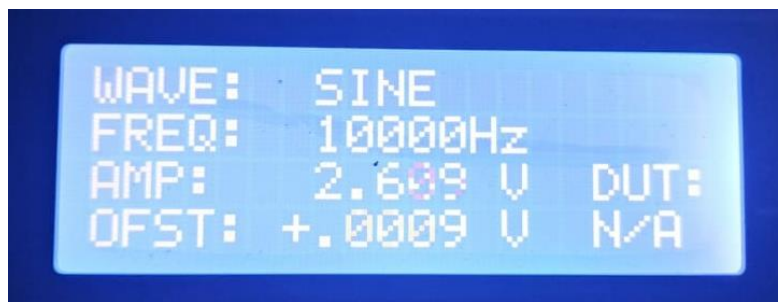


Figura 30 - <Pantalla principal>

Si usted se encontraba en la pantalla principal y pulsa el botón “ABAJO”, se cargará la pantalla de selección de formas de onda. Donde uno de los encoders permanecerá inhabilitado y el otro le permitirá desplazarse “en un loop circular” por todas las formas de onda disponibles y se generaran automáticamente ni bien sea indicada por una flecha.



Figura 31 - <Pantalla de formas de onda>

Si usted se encontraba en la pantalla de selección de formas de onda y pulsa el botón “ABAJO”, se cargará la pantalla de selección de frecuencia. Aquí ambos encoders están habilitados para el uso del usuario. Uno de ellos permitirá desplazarse unidad por unidad y el otro, elegir un dígito de 0 a 9 mientras no se superen los límites de 1Hz mínimo y 20kHz máximo.



Figura 32 - &lt;Pantalla de selección de frecuencia&gt;

Si usted se encontraba en la pantalla de selección frecuencia, pulsa el botón “ABAJO” y la onda seleccionada es la forma de onda rectangular, se cargará la pantalla de duty cycle. Aquí ambos encoders están habilitados para el uso del usuario. Uno de ellos permitirá desplazarse unidad por unidad y el otro, elegir un dígito de 0 a 9 mientras no se superen los límites de 1% mínimo y 99% máximo.

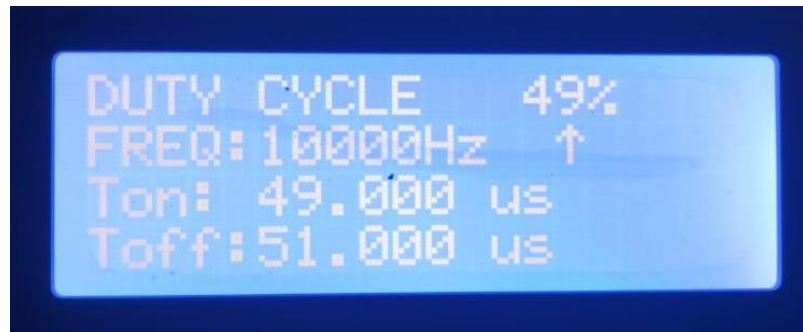


Figura 33 - &lt;Pantalla de selección de duty cycle&gt;

Si usted se encontraba en la pantalla de selección frecuencia, pulsa el botón “ABAJO” y la onda seleccionada es la forma de onda arbitraria, se cargará la pantalla de obtención de datos de ondas arbitrarias.

En la parte de inferior de la pantalla verá la reseña “Getting parameters”. Una vez que usted “seleccione” un archivo en el sitio web, podrá ver que la obtención de muestras está en curso ya que la reseña ahora será “Getting data values”. Cuando la operación termine volverá a observar el primer mensaje.

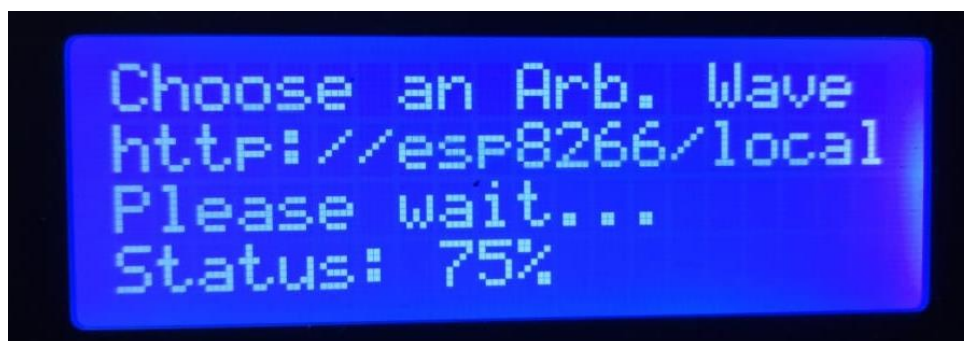


Figura 34 - &lt;Pantalla de recepción de forma de onda arbitraria&gt;

## 4.2 Sitio Web

Se montó un servidor web que se inicia al energizar la placa de desarrollo ESP8266 NodeMCU 1.0. Debe accederse al sitio web desde `http://esp8266.local/`. No se necesitan credenciales.

Debajo de Permitted Files List se generarán los nombres de todos los archivos .csv que se encuentran alojados en la memoria flash del ESP8266 y que están disponibles para ser transmitidos por I2C al microcontrolador principal. Para ello, debe copiar y pegar el nombre del archivo incluyendo el carácter “/” y la extensión “.csv” en el edit o cuadro de texto.

Luego el usuario puede elegir entre enviar el archivo o eliminarlo de la memoria del módulo. Para ello tiene presentes dos botones auto-explicativos.

Si desea enviar una forma de onda que no está listada debe hacer click en “Seleccionar archivo” y elegir el archivo .csv, posteriormente hacer click en Upload. Si la carga ha sido efectiva será redirigido a una página de éxito y luego redirigido a la página principal nuevamente.

La operación de carga puede demorar hasta 40 segundos. Según la cantidad de muestras que contenga el archivo.

Para generar formas de ondas arbitrarias consulte el apartado “3.3 Software propietario”.

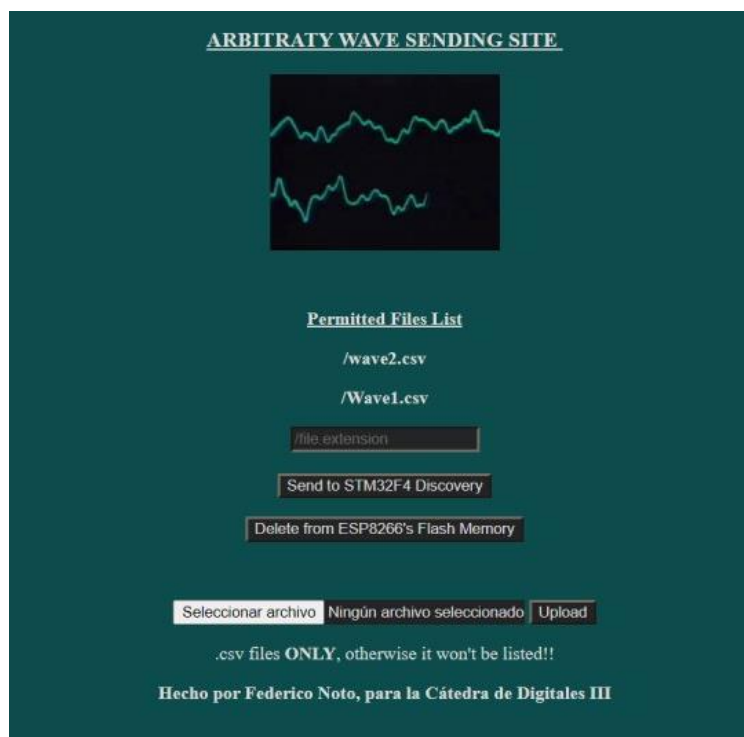


Figura 35 - <Sitio web de gestión de formas de onda arbitrarias>

## 5 Ensayos

### 5.1 Ensayo de frecuencias

#### 5.1.1 Ensayo de frecuencia a 1Hz y 20kHz

En los siguientes ensayos se generó funciones a 1Hz y 20kHz a la amplitud máxima de 20Vpp.

	Valores medidos de frecuencia [Hz]*								
	1	50	150	550	1050	5050	10050	15050	20000
Funciones generadas a partir del DAC	1	49,9021	149,706	549,902	1049,99	5050,88	10050,8	15045,7	20000,9
Funciones generadas a partir del PWM	1	49.9021	150,684	549,902	1049,88	5049,99	10051,8	15052,8	20001,9

\*La frecuencia fue medida con un osciloscopio Siglent SDS 1072CNL+

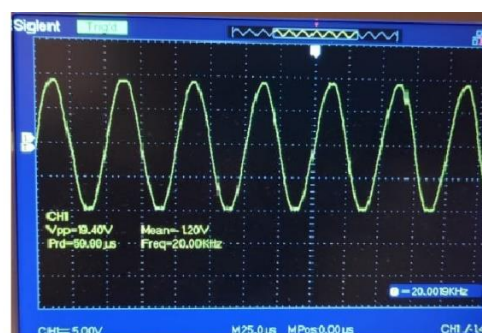
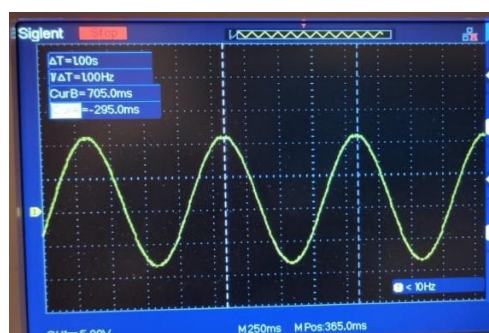


Figura 36 - <Forma de onda: seno, 1 Hz (izquierda) y 20 kHz(dererecha)>

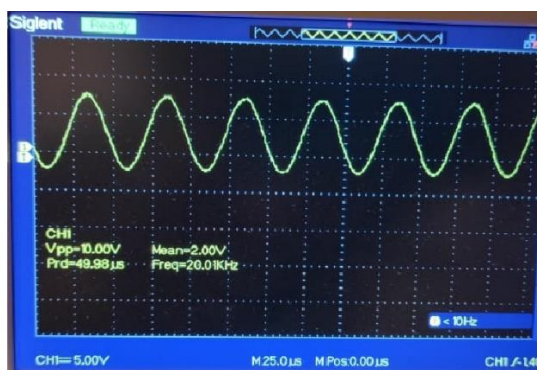
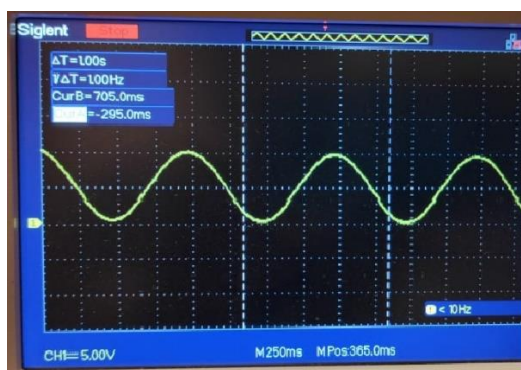


Figura 37 - < Forma de onda: semiverseno, 1 Hz (izquierda) y 20 kHz (dererecha)>



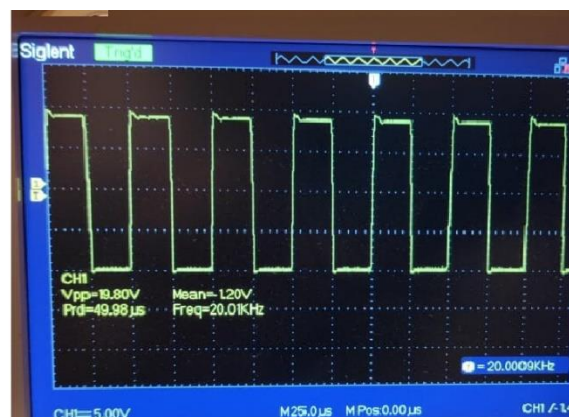
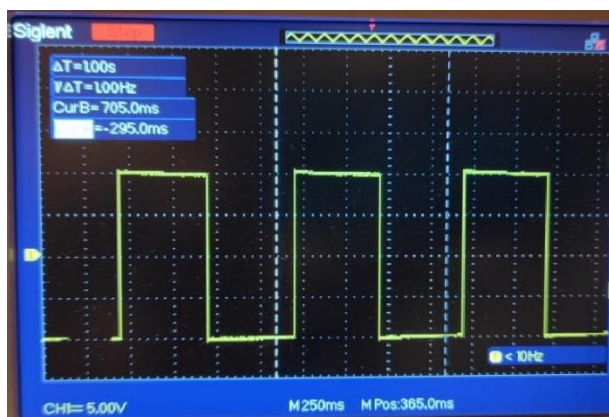


Figura 38 - < Forma de onda: cuadrada, 1 Hz (izquierda) y 20 kHz (derecha)>

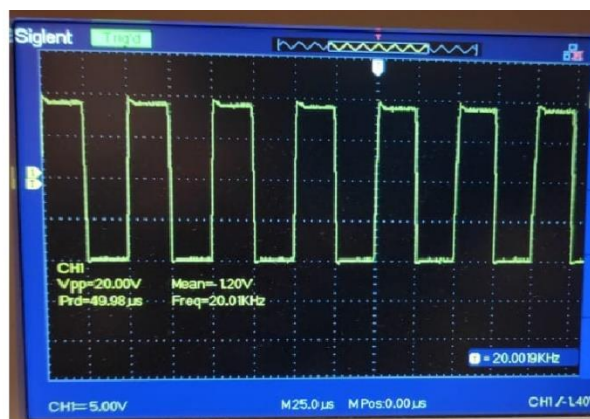
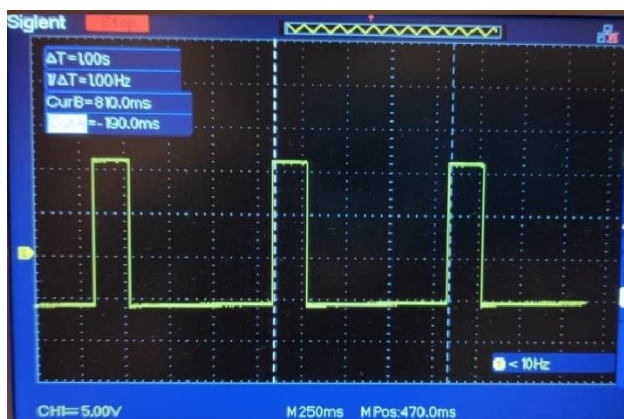


Figura 39 - < Forma de onda: rectangular, 1 Hz;DUT:20% (izquierda) y 20 kHz;DUT:50% (derecha)>

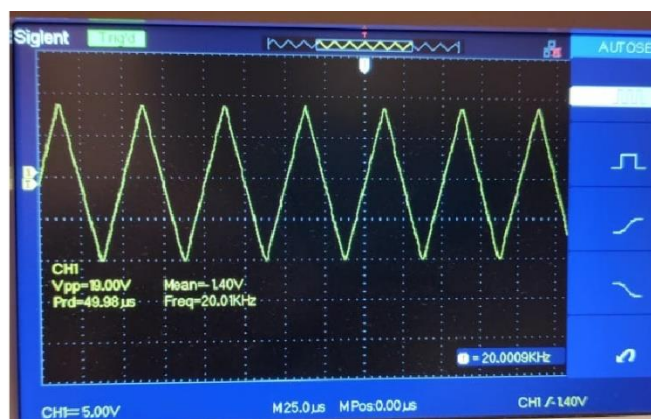


Figura 40 - < Forma de onda: triangular, 1 Hz (izquierda) y 20 kHz (derecha)>

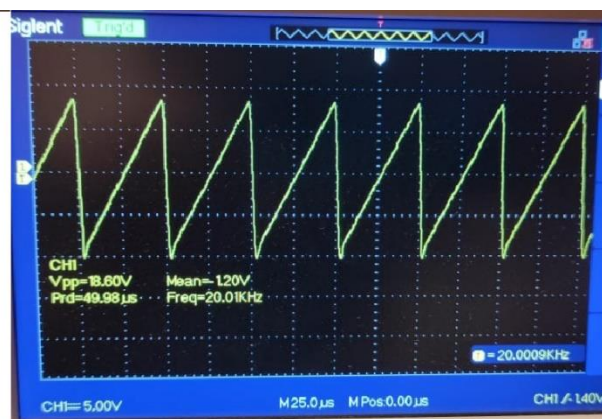
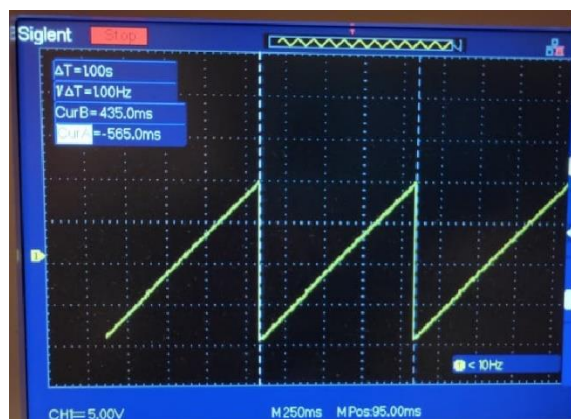


Figura 41 - <Forma de onda: diente de sierra, 1 Hz (izquierda) y 20 kHz (derecha)>

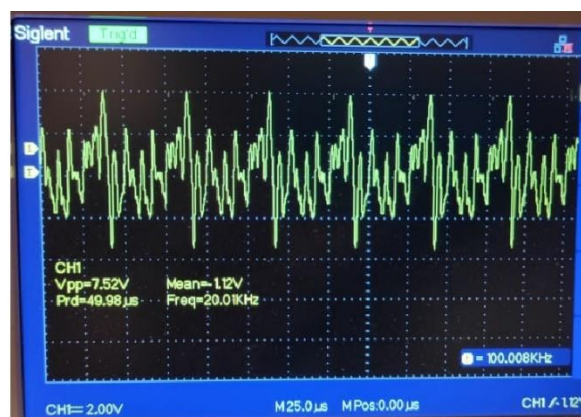
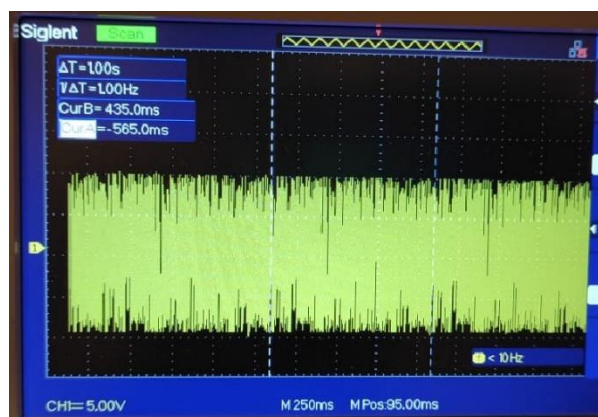


Figura 42 - <Forma de onda: ruido blanco>

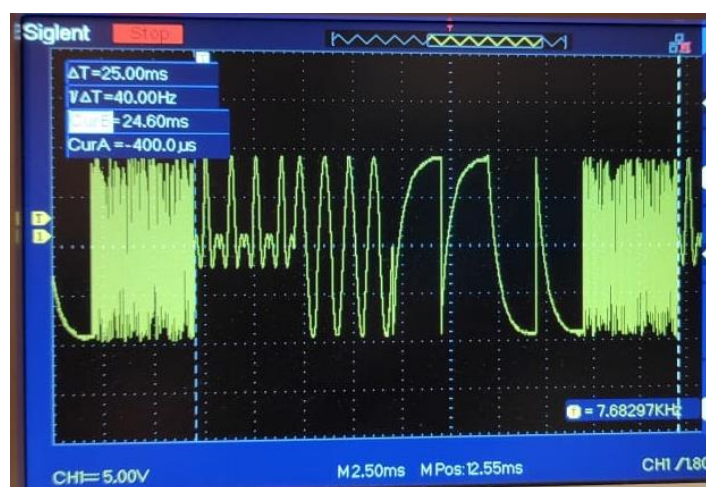


Figura 43 - <Forma de onda: arbitraria, 40Hz>

## 5.2 Ensayo de amplitudes

La señal del pin PA4 [DAC] tiene una amplitud de 2.92V

La señal del pin PA5 [PWM] tiene una amplitud de 3.14V

	Amplitud de señal	Amplitud de offset	AmpDac	OffsetDac	PolarityDac
Teórica mínima	0.19mVpp	-5V	0V	0V	0V
Teórica máxima	19.85Vpp	+5V	3V	3V	3V
Medida mínima	50mV	-5.2V	0.8mV	0V/1.58V	-40mV
Medida máxima	19.8Vpp	5.26V	3.04V	3.2V	3.2V

## 6 Conclusiones

Se ha desarrollado un equipo generador de funciones y ondas arbitrarias WiFi que obedece en gran mayoría con las especificaciones entregadas en el preinforme, incluso se han agregado más formas de onda de las acordadas en un primer momento. En contraste, a lo largo del proyecto, nos hemos encontrado con ciertas cuestiones que evitan que el proyecto cumpla con todos los requerimientos.

Ha sido un gran desafío en cuanto a software desde varios puntos de vista. El desarrollo del menú llevó mucho tiempo e incluso sufrió grandes modificaciones en cuanto a la estructura del código, con el pasar de los meses, se buscó realizar un código limpio, corto y eficiente.

El algoritmo para determinar la cantidad de muestras y el sample rate necesario según la frecuencia deseada es otro de los puntos en los que se incurrió en demoras.

Además del cambio de IDE, de KEIL a STM32CubeIDE, como así también la incorporación de porciones de código en C++ implementando clases y la optimización del envío de un gran volumen de cadenas de caracteres por I2C, dado que al querer asignar/liberar memoria para almacenar todos los caracteres que pueden encontrarse en un archivo de muestras, de alrededor de 30k caracteres, ocurrían hardfaults. La solución fue enviar un carácter por vez hasta completar la muestra y parsearla y repetir este proceso hasta el fin del archivo.

También ha sido un desafío el diseño de la electrónica analógica, donde el problema principal es el desacople de la señal. El desacople no es perfecto, es decir, la señal no se centra en 0V como lo esperado, la variación puede ser entre 200 mV y 1V. Para la señal de onda rectangular el desacople es también es deficiente al modificar el ciclo de actividad. Además, creemos que la amplificación y la medición son puntos mejorables en cuanto al ruido, precisión de las ganancias, la tecnología del potenciómetro, el diseño de los PCB, entre otros.



## 7 Referencias

1. Link: Signal Generator Fundamentals-  
[https://engineering.case.edu/lab/circuitlab/sites/engineering.case.edu/lab/circuitlab/files/docs/Signal\\_Generator\\_Fundamentals-Tektronix.pdf](https://engineering.case.edu/lab/circuitlab/sites/engineering.case.edu/lab/circuitlab/files/docs/Signal_Generator_Fundamentals-Tektronix.pdf)
2. Link: High Speed, Digital to Analog Converters Basics -  
<https://www.ti.com/lit/an/slaa523a/slaa523a.pdf>
3. Link: A Technical Tutorial on Digital Signal Synthesis - <https://www.ieee.li/pdf/essay/dds.pdf>
4. Link: Fundamentals of Direct Digital Synthesis (DDS) -  
<https://www.analog.com/media/en/training-seminars/tutorials/MT-085.pdf>

## 8 ANEXO

### 8.1.1 Esquemáticos

#### 8.1.1.1 Alimentación

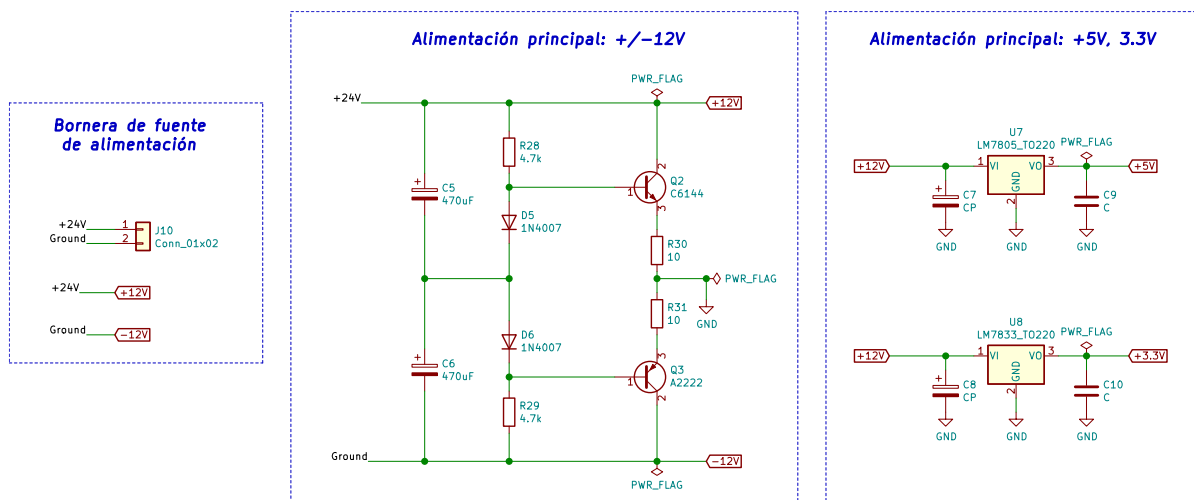


Figura 44 - <Esquemático de alimentación>

#### 8.1.1.2 Generación de formas de onda

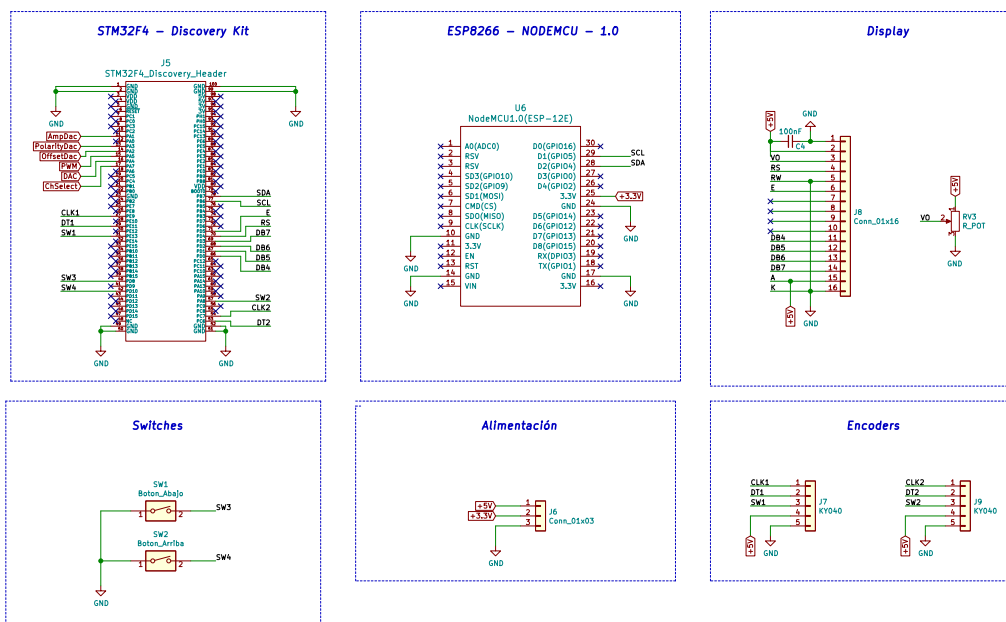


Figura 45 - <Esquemático de generación de formas de onda>

### 8.1.1.3 Electrónica analógica

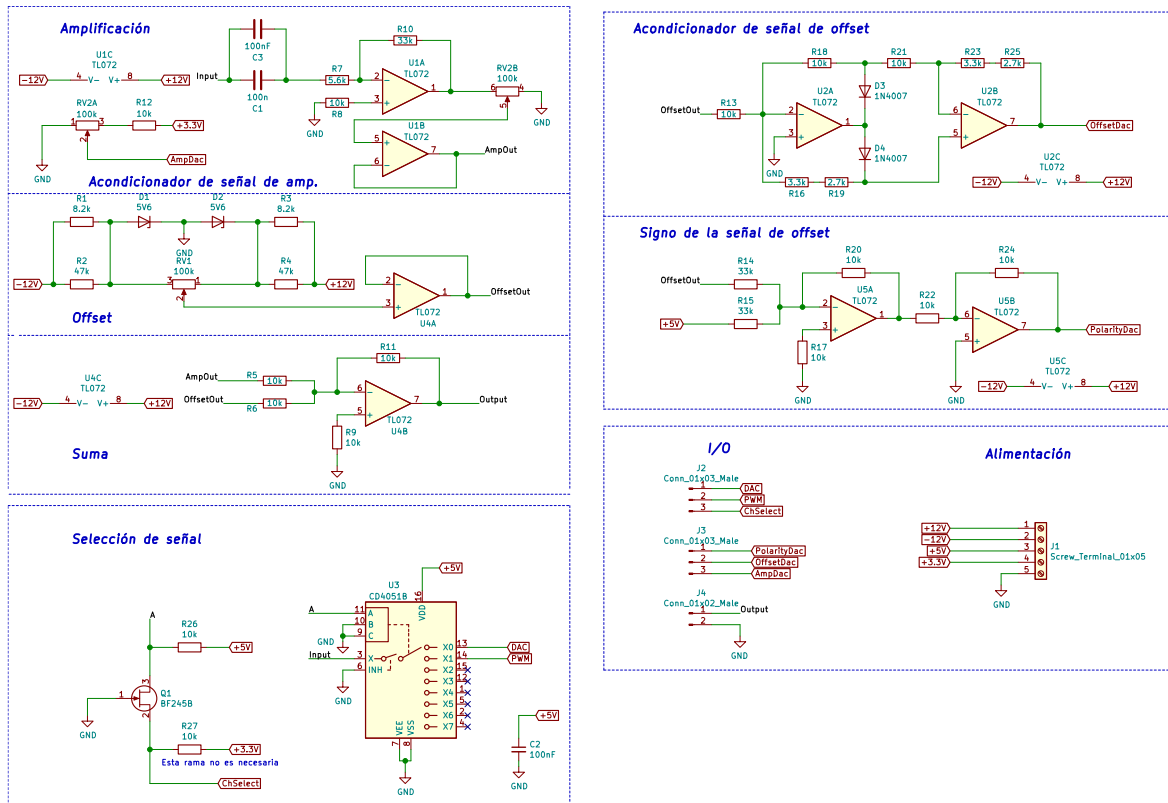


Figura 46 - <Esquemático de electrónica analógica>

## 8.1.2 Circuitos impresos

### 8.1.2.1 Generación de formas de onda

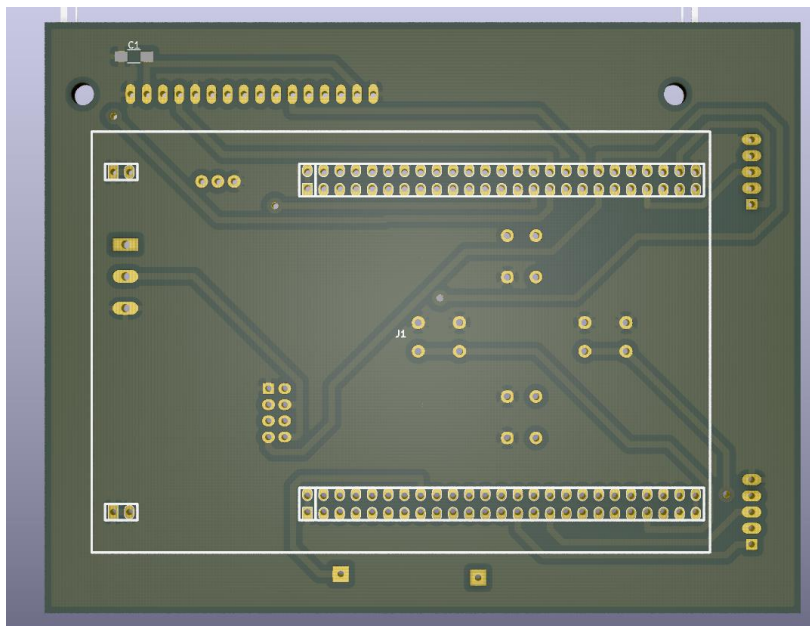


Figura 47 - <PCB de placa generadora de formas de onda>

### 8.1.2.2 Electrónica analógica

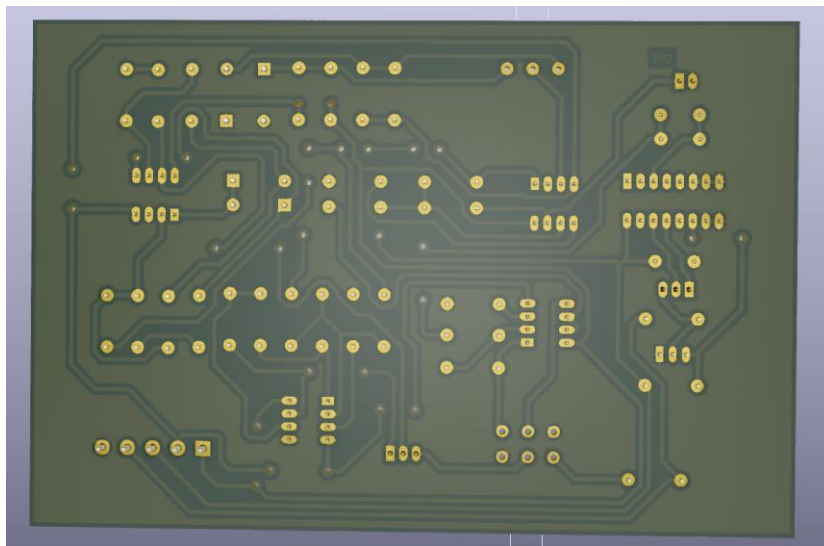


Figura 48 - <PCB de placa de electrónica analógica>