

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA MATANZA

Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas

**Ingeniería en Electrónica**

**Técnicas digitales III**

Pedal Multiefecto para Guitarra Eléctrica

**Integrante:** Rosmirez, Jorge

**Profesores:** Lic. Carlos Maidana

Ing. Guillermo Buranits

Ing. Mauro Cipollone

2020

[1 Descripción general 1](#_Toc44967024)

[2 Introducción teórica 1](#_Toc44967025)

[2.1 Que es el Sonido 1](#_Toc44967026)

[2.2 conceptos básicos del sonido 2](#_Toc44967027)

[2.3 Los parámetros del sonido 3](#_Toc44967028)

[2.1.1 Tono o frecuencia 3](#_Toc44967029)

[2.1.2 Sonoridad 3](#_Toc44967030)

[2.1.3 Timbre 3](#_Toc44967031)

[2.1.4 Percepción de duración 3](#_Toc44967032)

[2.1.5 Envolvente o articulación 4](#_Toc44967033)

[2.1.6 Difusión 4](#_Toc44967034)

[3 Estado del Arte 4](#_Toc44967035)

[3.1 Clasificación de los efectos 5](#_Toc44967036)

[3.1.1 Efectos de rango dinámico 5](#_Toc44967037)

[3.1.2 Distorsiones 5](#_Toc44967038)

[3.1.3 Ecualizadores 5](#_Toc44967039)

[3.1.4 Efectos de modulación 6](#_Toc44967040)

[3.1.5 Efectos de transposición de tono 6](#_Toc44967041)

[3.1.6 Efectos basados en retardos 6](#_Toc44967042)

[3.1.7 Efectos simuladores 7](#_Toc44967043)

[3.1.8 Reductores de ruido 7](#_Toc44967044)

[4 Análisis y desarrollo de los efectos 7](#_Toc44967045)

[2.1.1 Estructura básica de un Delay 8](#_Toc44967046)

[2.2 Fuzz 9](#_Toc44967047)

[2.2.1 Procesamiento de la señal 9](#_Toc44967048)

[2.3 Wah-Wah 11](#_Toc44967049)

[5 Descripción técnica del proyecto. 12](#_Toc44967050)

[3.1 Hardware 12](#_Toc44967051)

[3.1.1 Protocolo I2S 12](#_Toc44967052)

[3.1.2 Driver CS43L22 13](#_Toc44967053)

[3.1.3 ADC 15](#_Toc44967054)

[3.1.3.1 Configuración con el Códec de DAC 15](#_Toc44967055)

[3.1.3.2 Transmisión de audio al códec del DAC 15](#_Toc44967056)

[3.1.4 Diagrama en bloques 16](#_Toc44967057)

[3.1.5 Esquemático 16](#_Toc44967058)

[3.1.5.1 Jack 16](#_Toc44967059)

[3.1.5.2 Divisor resistivo 17](#_Toc44967060)

[3.1.5.3 Potenciómetro 17](#_Toc44967061)

[3.1.5.4 Filtro Pasa Banda 17](#_Toc44967062)

[3.1.6 Circuito impreso 18](#_Toc44967063)

[3.1.7 Fotos 19](#_Toc44967064)

[3.2 Software 19](#_Toc44967065)

[3.2.1 Enumeración de rutinas 20](#_Toc44967066)

[3.2.2 Descripción del funcionamiento de cada rutina 20](#_Toc44967067)

[6 Modo de operación 26](#_Toc44967068)

[7 Ensayos 27](#_Toc44967069)

[8 Conclusiones 27](#_Toc44967070)

[6.1 Audio Weaver 28](#_Toc44967071)

[9 Proyecto finalizado 29](#_Toc44967072)

[10 Referencias 30](#_Toc44967073)

# Descripción general

El proyecto consiste en la implementación de un pedal multiefecto para guitarra eléctrica. El sistema será puesto en funcionamiento en una placa donde el usuario pueda interactuar con un potenciómetro simulando un pedal de expresión, y a través de un botón el cambio de los efectos. Además, se informará el efecto seteado a partir de un color de una luz led.

El proyecto implementará 3 efectos de audio: *Delay*, *Fuzz* y *Wah-Wah*. Pudiendo cambiar entre cada uno de ellos mediante un botón de forma secuencial, mientras que con un potenciómetro se variarán los parámetros característicos del efecto previamente elegido. El sistema será capaz de procesar en tiempo real la señal, aplicando un efecto.

El proyecto no implementará display para informar el efecto, el efecto seleccionado se informará mediante leds (los leds integrados en el board), un color por efecto.

El footswitch permitirá al usuario el efecto conocido como loopback que interconecta la entrada de señal con la salida de manera pasiva, cuando el pulsador este apagado.

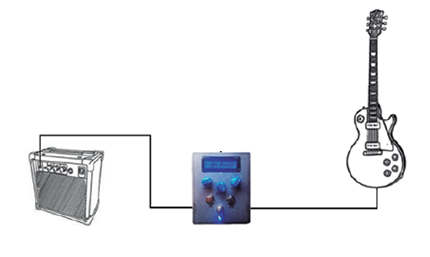


Figura 1

# Introducción teórica

## 2.1 Que es el Sonido

Una definición que describe la naturaleza senoidal del sonido es la siguiente: “Vibración transmitida a través de un material elástico, con frecuencias en el rango aproximado de 20 a 20000 Hercios” [1]. Gracias a esta definición los físicos y los ingenieros utilizan el “sonido” para referirse a una onda de presión que se propaga por el aire, algo que puede ser fácilmente medido, digitalizado y analizado. Por otra parte, desde un punto de vista perceptual del sonido puede referirse como: “Sensación producida en el órgano del oído por el movimiento vibratorio de los cuerpos, transmitido por un medio elástico, como el aire” [2]. A diferencia de la primera, esta definición se refiere a la percepción o sensación que ocurre dentro del oído, algo que es mucho más difícil de cuantificar. Basándonos entonces en la primera definición, las ondas sonoras se pueden representar como se muestra en la Figura 1, donde las zonas de altas presiones aparecen por encima de la “presión nominal” y las zonas de bajas presiones se muestran debajo. Esta forma de onda particular (onda senoidal) se puede caracterizar por tres términos matemáticos:

frecuencia, amplitud y fase. La frecuencia de una sinusoide es el número de oscilaciones completas que suceden en un segundo. Así si una onda con frecuencia de 100 Hz oscila

100 veces cada segundo. En lo correspondiente a una onda sonora las moléculas de aire se comprimen y estiran 100 veces en cada segundo [16].

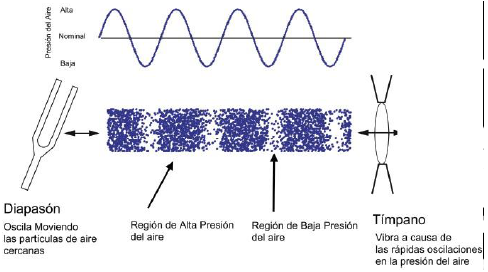


Figura 2: El sonido como una onda de presión

## 2.2 conceptos básicos del sonido

Como onda, el sonido responde a las siguientes características:

1. Es una onda mecánica: Las ondas mecánicas no pueden desplazarse en el vacío, necesitan hacerlo a través de un medio material (aire, agua, cuerpo sólido). Además, de que exista un medio material, se requiere que éste sea elástico. Un medio rígido no permite la transmisión del sonido, porque no permite las vibraciones. La propagación de la perturbación se produce por la compresión y expansión del medio por el que se propagan. La elasticidad del medio permite que cada partícula transmita la perturbación a la partícula adyacente, dando origen a un movimiento en cadena.
2. Es una onda longitudinal: El movimiento de las partículas que transporta la onda se desplaza en la misma dirección de propagación de la onda.
3. Es una onda esférica Las ondas sonoras son ondas tridimensionales, es decir, se desplazan en tres direcciones y sus frentes de ondas son esferas radiales que salen de la fuente de perturbación en todas las direcciones. El principio de Huygens afirma que cada uno de los puntos de un frente de ondas esféricas puede ser considerado como un nuevo foco emisor de ondas secundarias también esféricas, que como la originaria, avanzarán en el sentido de la perturbación con la misma velocidad y frecuencia que la onda primaria [19].

## 2.3 Los parámetros del sonido

Existen 6 propiedades o atributos que pueden describir lo que un ser humano experimenta al escuchar un sonido:

### Tono o frecuencia

Se refiere a la rapidez de ocurrencia de las vibraciones que componen un tono. Cuando la frecuencia aumenta, también lo hace el tono.

### Sonoridad

Indica cuan fuerte o suave se escucha un sonido, y se refiere a la amplitud de la onda vibratoria. La cantidad de compresión que sucede en las moléculas de aire, cuando el sonido viaje a través de ellas, no implica la rapidez a la que se desplazan, sino cuanta energía está almacenada en ellas.

### Timbre

Se refiere a la calidad del sonido. Tanto como los instrumentos musicales y la voz humana producen sonidos que son ricos en vibraciones de diferente frecuencia y que son percibidos al mismo tiempo. La combinación de todas esas vibraciones, con diferentes amplitudes también, es lo que se percibe como timbre. Una forma sencilla de comprender este concepto es imaginar una flauta y la voz de una persona emitiendo un tono de la misma frecuencia. Fácilmente puede notarse la diferencia entre ambos sonidos. Colectivamente, el cerebro escucha lo anterior como un cambio en el color del sonido. El timbre es uno de los atributos del sonido más interesantes y complejos de comprender. Pero es en el timbre donde radica la naturaleza del diseño digital del sonido, pues tiene una gran facilidad para cambiar el color y el timbre del sonido rápidamente. Para hacer lo anterior en el mundo acústico, se tendría que cambiar algo del instrumento para cambiar el timbre. Gracias al diseño digital del sonido, la mayor parte de la música que actualmente escuchamos ha pasado por un proceso digital de refinación.

### Percepción de duración

La duración no es un elemento fijo, sino algo que se percibe. Un ser humano puede escuchar un sonido, proveniente de cualquier lado, que dura unas pocas milésimas de segundo, o bien, varios minutos. Cuando se habla de lo que se está experimentando, cualquiera puede decir que percibió un tiempo lento o un tiempo rápido. Si se escucha una canción, ¿cómo se determina si la canción tiene un ritmo lento o rápido? Para ello, existe un punto estándar relativo, como referencia del tiempo, basado en los latidos del corazón. Los latidos del corazón rondan entre los 60, 70, y a veces hasta 80 latidos por minuto si es nervioso. Un sonido se percibirá como de tiempo rápido si va más rápido que los latidos y de tiempo lento, si va más lento. Así que cuando se habla de tiempo rápido y de tiempo lento, el reloj interno del cuerpo es el encargado de proveer la información.

### Envolvente o articulación

Muestra la forma del sonido en el dominio del tiempo basada en la forma en que se interpreta un instrumento musical, incluyendo a la voz humana. La articulación se refiere a lo que sucede en los primeros milisegundos de un sonido, y a la cantidad de energía que se aplica a la nota. Por ejemplo, con un violín se puede aplicar una gran cantidad de energía al tocar una nota, si se ejerce una presión inicial mayor con el arco sobre la cuerda. Luego, se libera la mayor parte de la presión haciendo que el sonido se estabilice hasta que suavemente desaparece. Con un piano, la articulación es diferente, pues inicialmente se escucha un martillazo, y luego, la nota que suavemente desaparece. Así, el piano tiene una articulación percusiva, que gráficamente, representa un impulso inmediato. La envolvente es importante para el diseño digital del sonido. Pues conociendo las envolventes de cada instrumento, se pueden imitar los mismos. Y entonces, por medio de una computadora, se puede tener todos los instrumentos musicales.

### Difusión

Se refiere a capacidad del cerebro para localizar espacialmente la fuente de un sonido. El cerebro tiene la capacidad de procesar simultáneamente múltiples sonidos de diferentes fuentes y, ubicar espacialmente los mismos consciente o inconscientemente.

Por ejemplo, si se está en la calle hablando con un amigo, uno le pone mayor atención a la conversación. Cuando se llega a una intersección, inconscientemente se procesan sonidos de ciertos automóviles provenientes de ciertas direcciones. Y en ése momento, se está teniendo la conversación, se están ubicando las fuentes de sonido de los coches, y se está determinando si los mismos se están acercando o alejando. La difusión es un atributo importante en el diseño digital del sonido, por ejemplo, cuando se está escuchando una película en el cine. La experiencia auditiva resulta ser más real en el cine por que el sonido proviene de diferentes fuentes. Esto hace que una persona sienta que forma parte de la acción, y que sienta que forma parte de la película. Aquí, el sonido es representado por una configuración de canales (2.1, 5.1, 7.1). Una configuración 5.1 implica la existencia de 6 fuentes de sonido; ; y una de 2.1, sólo 3 fuentes. Ésta última configuración es mejor conocida como sonido estéreo (altavoces izquierdo, derecho y subwoofer). [18]

# Estado del Arte

En este apartado se definirán de forma teórica los la basta cantidad de efectos de un pedal y la manipulación matemática que sufre una señal de información para modificarla y obtener la señal esperada. Por otro lado, también se pretende que el usuario empiece a familiarizarse con los efectos antes de empezar a leer más sobre ellos. De tal manera que con una breve descripción pueda ser capaz de clasificarlos y ver sus diferencias características respecto a otros efectos. También se detallarán en este apartado algunos conceptos que van ligados a la implementación de los efectos ya que algunos efectos para poder quedar terminados como tal necesitan alguna pequeña ayuda, modulación, filtrado etc. Para poder obtener el efecto deseado.

## Clasificación de los efectos

Un efecto de guitarra es un circuito analógico o digital que audiblemente modifica una señal de entrada producida por un instrumento para producir una salida deseada [16].

Los efectos en general se pueden clasificar en categorías específicas [13]:

* Efectos basados en el rango dinámico
* Distorsiones
* Ecualizadores
* Efectos de Modulación
* Efectos de Transposición de tono
* Efectos de retrasos
* Simuladores
* Reductores de ruido

### Efectos de rango dinámico

El rango dinámico de un equipo de sonido, es la diferencia existente entre los sonidos más potentes y menos potentes que el equipo es capaz de reproducir. Los efectos tales como compresor y expansor son efectos basados en el rango dinámico [6, 7].

### Distorsiones

Cuando hablamos de la distorsión de un amplificador o una pedalera nos referimos a la distorsión armónica. La “distorsión armónica” es un parámetro técnico utilizado para definir la señal de audio que sale de un sistema. Dicha distorsión se produce cuando la señal de salida no equivale a la señal que entro en él. Esta falta de linealidad afecta a la forma de onda, porque el equipo introduce armónicos que no estaban en la señal de entrada. Puesto que son armónicos, es decir múltiplos de la señal de entrada esta distorsión no es tan disonante y a veces es más difícil de detectar. Efectos como distorsiones pueden ser tales como el Fuzz, Bitcrusher, PhaserDistorsión, distorsión, así como otros tipos de distorsiones derivados es una distorsión simple, aunque este tipo de distorsiones suelen ser más específicas para el tipo de sonido que se quiera buscar [16].

### Ecualizadores

Dentro de los ecualizadores tenemos dos tipos, ecualizadores activos y pasivos.

Los ecualizadores pasivos son los que se pueden encontrar en los amplificadores. Donde con pocos parámetros son capaces de tratar la señal. Los graves dan cuerpo a la señal, es decir dan peso, para una guitarra los graves nos es una frecuencia que nos deba preocupar excepto si tenemos ausencia de una señal de bajo [11]. Los agudos nos dan brillo a la señal, es decir, cuanta más distorsión tengamos más destacaran los agudos. Por el contrario, cuanta menos distorsión tengamos menos debemos de preocuparnos por los agudos [10]. Los medios es la frecuencia que más afecta al sonido de una guitarra. Para el sonido de una guitarra cuantos menos medios tengamos obtendremos un sonido más suave, más redondo, menos ruidoso, aunque se necesitaran más vatios en un equipo de sonido para poder oírlos con claridad. Por el contrario, si contamos con más medios el sonido sonará como más “duro” y algo más ronco a la vez que nos facilitara la mezcla de ese sonido con otros. Efectos basados en ecualización los más conocidos son el “wha-­wha” y su derivado el “auto-­wha” [16].

### Efectos de modulación

Modulación es un efecto no lineal en el cual varias señales interactúan unas con otras para producir nuevas señales con frecuencias que no estaban presentes en las señales originales. Hay muchas formas de modulación, pero para este caso solo utilizaremos dos de ellas, la modulación de frecuencia y de amplitud. La modulación de frecuencia (FM) es la variación en frecuencia de una señal, debido a la influencia de otra señal, generalmente de frecuencia más baja. La modulación de amplitud (AM) es un tipo de modulación lineal que consiste en hacer variar la amplitud de la señal portadora de forma que esta cambie de acuerdo con las variaciones de nivel de la señal que contiene la información que se desea transmitir, llamada señal moduladora o modulante. [7] También hay que indicar que los efectos de modulaciones hacen uso de un LFO, Low Frecuency Oscilator (Oscilador de baja frecuencia). Los LFO's son primariamente usados como moduladores para otras señales, y no para generar audio en sí [13]. En el mundo de los osciladores se considera "*baja frecuencia*" cualquier frecuencia por debajo de los 20 Hz, que es la frecuencia más baja que puede escuchar un humano. Aunque los LFO's no están destinados para ser usados como fuente de sonido, en algunos sintetizadores pueden operar a frecuencias más allá de los 20 Hz.

Efectos basados en modulación nos encontramos con efectos como el Chorus, el Flanger, el Phaser, el Tremolo o el Vibrato [9].

### Efectos de transposición de tono

Para transponer el tono, la señal que entra en un equipo se muestrea y posteriormente se reproduce más deprisa para subir el tono o más despacio para bajarlo. Efectos basados en la transposición tenemos el Octavador que lo que hace es añadir a la señal octavas por arriba o por abajo. El Armonizador el cual añade a la señal su copia transpuesta o el Detuner el cual desafina la señal y la añade a la señal original [10].

Hay que indicar que estos efectos no son de los más utilizados debido a que se necesitan grandes niveles de composición y armonización para poder usarlos correctamente.

### Efectos basados en retardos

Este tipo de efectos están basados en el uso de muestras y/o salidas pasadas para generar la salida en el momento actual. Hay que señalar que muchos efectos, aunque no se encuentre dentro de esta clasificación también usan retardos como puede ser el Chorus. Los efectos más puros basados en retardos son el Delay, el Eco, el Flanger y el Reverb o Reverberación [10].

### Efectos simuladores

Los efectos basados en simuladores no son de gran interés, ya que simplemente emulan tipos de amplificadores, altavoces, tipos de guitarras o de pastillas. Son especialmente utilizados en pedaleras digitales. Estos efectos carecen de gran interés de ahí su poca utilización y venta de este tipo de pedaleras [13].

### Reductores de ruido

Los efectos de reducción de ruido “cierran” el paso de toda señal que no supere un determinado umbral fijado por el usuario. Son muy útiles en situaciones de “directo” en las que hay multitud de micrófonos que pueden captar lo mismo que el principal, y tratamos de que la señal sólo entre por el principal. También nos ayudan a “recortar” todos aquellos ruidos no deseados que se han colado en una grabación (toses, respiraciones, rozamientos de ropas, ruidos de ambiente), siempre que no se mezclen con la señal principal. El efecto más conocido de este tipo es el Noise Gate o puerta de ruido, el cual es muy utilizado para tocar en directos [13].

En el cuadro comparativo dela figura 3, se pueden ver los efectos según su clasificación de efecto.



Figura 3

# Análisis y desarrollo de los efectos

En este apartado vamos a concentrarnos en el análisis de los efectos que nos competen para el desarrollo de nuestro pedal multiefecto de guitarra eléctrica, cabe remarcar que los mismos son: Delay, Fuzz y Wah-Wah.

## Delay

### Introducción

El delay es el efecto más básico y simple de los efectos basados en retardos, siendo uno de los efectos más clásicos y comunes en muchas aplicaciones de audio, estando presenta hasta en la producción musical.

Se utiliza en todo tipo de música desde música electrónica hasta electroacústica, así como en los sistemas de refuerzo de sonido. Pudiendo ofrecer gran variedad de aplicaciones que van desde fines puramente artísticos hasta otras aplicaciones de mejora del sonido [6].

A pesar de ser un efecto muy simple es un efecto muy importante, no solo como efecto sino como elemento potencial para otros efectos como el chorus o el flanger como se vio anteriormente, así como para la reverberación [7].

### Implementación

Para la implementación del delay no tiene mayor complicación, ya que básicamente se trata de coger una muestra se la señal original desplazada y escalada y sumada a la señal original. La figura 4 muestra el diagrama de bloques de un efecto Delay.

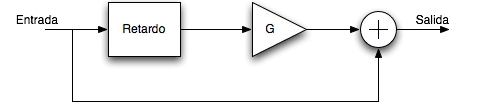


Figura 4

Como puede apreciarse en el diagrama de bloques a la señal retrasada se le aplica una amplificación, normalmente suele ser para atenuar un poco el sonido de la señal haciéndose notar más o menos la intensidad de las muestras repetidas. El tiempo de delay para retrasar nuestra señal puede variar desde unos pocos milisegundos hasta varios segundos. Dependiendo del tiempo de retraso elegido el efecto delay sonara de una manera u otra, esto es con un tiempo de retraso de unos 40-­80 ms el efecto delay

sonara como un efecto de coro poco elaborado. Es con un tiempo de retraso entre 100 y 120 ms cuando sonara como un efecto delay. También indicar que para tiempos mayores a 1 segundo permite al músico tocar melodías sobre sí mismo.

Tras esto podemos decir que el efecto delay toma una señal de audio y la reproduce de nuevo después de un tiempo de delay, escalada y mezclada con la señal actual. Siendo las ecuaciones que definen al delay [16]:

*señal\_de\_salida(n) = señal\_de\_entrada(n) + amplitud\* señal\_de\_entrada(n-­retraso)*

Los retrasos se pueden experimentar en espacios acústicos. Una onda de sonido reflejada por una pared se superpondrá a la onda de sonido en la fuente. Si la pared está lejos, tal como un acantilado, oiremos un eco. Si la pared está cerca de nosotros, notaremos los reflejos a través de una modificación del color del sonido.

Pueden aparecer reflejos repetidos entre límites paralelos. En una habitación, tales reflexiones serán un eco más plano. La distancia entre los límites determina el retraso que se impone a cada una de la onda de sonido reflejada. En un cilindro, se desarrollarán reflexiones sucesivas en ambos extremos. Si el cilindro es largo, escucharemos un patrón iterativo, mientras que, si el cilindro es corto, oiremos un tono agudo.

Los equivalentes de estos fenómenos acústicos se han implementado como unidades de procesamiento de señales. La variación del tono se debe al hecho de que la distancia entre la fuente y nuestros oídos está siendo variada al variar la distancia, para nuestra aplicación, sería el equivalente a variar el retraso del tiempo. Si seguimos variando periódicamente el tiempo de retraso produciremos una variación periódica del tono. Esto es sencillamente un efecto de vibrato.

### Estructura básica de un Delay

La red que simula un solo retraso se llama Comb Filter[[1]](#footnote-1) (filtro de peine FIR). La entrada

la señal se retrasa por una duración de tiempo dada. El efecto será audible solo cuando

la señal procesada se combina (agrega) a la señal de entrada, que actúa aquí como

una referencia. Este efecto tiene 2 parámetros de ajuste: la cantidad de tiempo de retraso “T” y la amplitud relativa de la señal retrasada a la de la señal de referencia.

La ecuación de diferencia y la función de transferencia están dadas por:

Figura 5

Con:

Figura 6

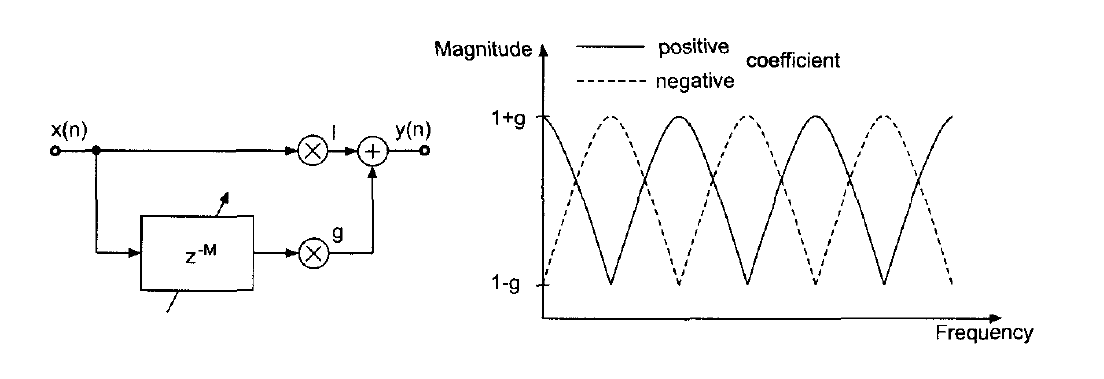


Figura 7

## Fuzz

El efecto fuzz básicamente aplica sobre la señal un recorte (clipping) como el que haría un amplificador extremadamente saturado. Los picos de la señal de entrada quedan recortados, y los valles aplanados, generando el característico sonido distorsionado.

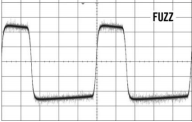
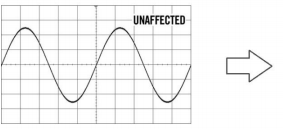


Figura 8

El fuzz es un overdrive[[2]](#footnote-2) exagerado, en la figura 7 se puede ver como es la forma de onda de un overdrive, con una mayor distorsión de la onda que hace que existan más picos en los armónicos. Esto genera un sonido más grueso y denso que se focaliza en las frecuencias bajas y medias, pero no tanto en las más agudas (un fuzz es más grave y menos chillón que una distorsión). Sin duda es un sonido menos nítido y más sobrecargado. De hecho, muchos guitarristas, con tendencia a un sonido más definido, huyen de este efecto, mientras que otros lo prefieren.

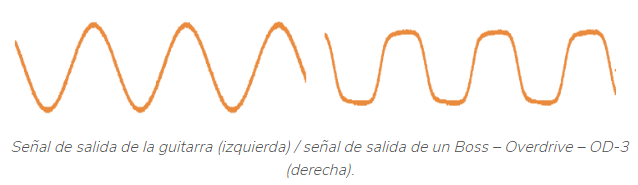
[[3]](#footnote-3)

Figura 9

### 2.2.1 Procesamiento de la señal

**Symmetrical Soft Clipping** (Recorte suave simétrico): para simulaciones de overdrive, se debe realizar un recorte suave asimétrico de los valores de entrada. Un posible enfoque para una saturación suave no lineal viene dado por:

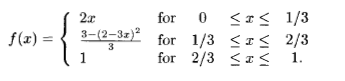


Figura 10

La relación entrada / salida estática se muestra en la figura 8 hasta el umbral de 1/3, la entrada se multiplica por dos y la curva característica se encuentra en su región lineal. entre valores de entrada de 1/3 hasta 2/3, la curva característica produce una compresión suave descrita en el término medio de la ecuación. Por encima de los valores de entrada de 2/3, el valor de salida se establece en uno.

La figura 9 muestra la forma de onda de una simulación con la curva característica descrita anteriormente y una sinusoide de 1Khz.

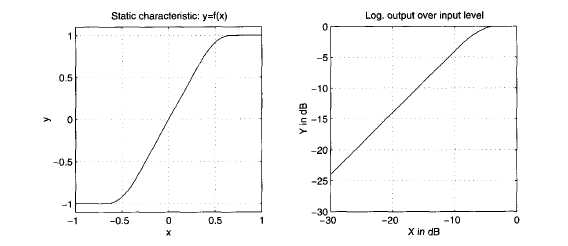


Figura 11

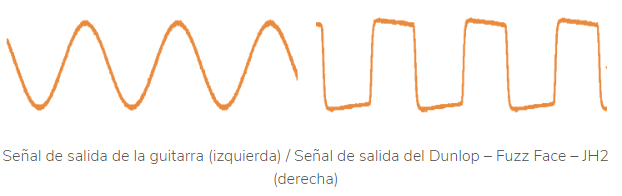
[[4]](#footnote-4)

Figura 12

## Wah-Wah

Un procesador de señales con control de pie que contiene un paso de banda. Filtro con frecuencia central variable. Moviendo el pedal hacia adelante y hacia atrás cambia la frecuencia central del paso de banda.

El efecto wah-wah es producido principalmente por procesadores de señal controlados por el pie que contienen un filtro de banda ancha con frecuencia de resonancia central variable y un ancho de banda pequeño. Al mover el pedal hacia adelante y hacia atrás cambia la frecuencia de corte del centro de paso de banda. El efecto "wah-wah" se mezcla con la señal directa como se muestra en la figura 10.

Este efecto conduce a una formación del espectro similar al habla y produce un discurso como el sonido "wah-wah".

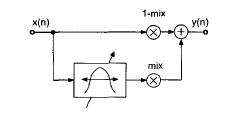


Figura 13 WahWah: Filtro pasa banda variable en el tiempo

Si la variación de la frecuencia central es controlada por la señal de entrada, se usa un oscilador de baja frecuencia para cambiar la frecuencia central. Tal efecto se llama filtro auto-wah. Si el efecto se combina con una variación de amplitud de baja frecuencia, que produce un trémolo, el efecto se denomina filtro de tremolo-wah. Reemplazar el retardo de la unidad en el filtro de paso de banda por un M tap delay lleva al filtro M-fold wah-wah, que se muestra en la figura 8. Los filtros de paso de banda M son

se extienden por todo el espectro y cambian simultáneamente su frecuencia central.

Cuando se aplica una señal de entrada de ruido blanco a un filtro wah-wah M-fold, un espectrograma de la señal de salida que se muestra en la figura 2.26 ilustra la mejora periódica del espectro de salida. La Tabla 2.5 contiene varias configuraciones de parámetros para diferentes efectos.

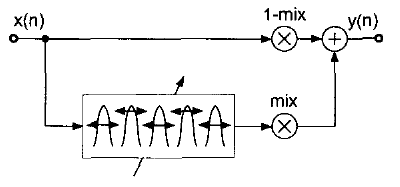


Figura 14: Filtro Wah-Wah

# Descripción técnica del proyecto.

## 3.1 Hardware

En esta sección se detallará el funcionamiento interno de los protocolos y drivers implementados para el proyecto, dado que no fue necesario la inclusión de hardware adicional, ya que con la placa STM32F411 se ha podido cubrir todas las necesidades asociadas al proyecto. Con la salvedad de un filtro pasa bajo pasivo de orden 2.

### 3.1.1 Protocolo I2S

Multimedia -> I2s3 -> GPIO settings

Para que se escuche un sonido libre de glitches, es necesario que el I2S (para el DAC) y el ADC trabajen a frecuencias lo más cercanas posible.

A continuación, se describirán los pines que necesita la comunicación I2S

**MCK:** (main clock) es el clock principal que contiene la mayor frecuencia, este es enviado por el master y recibido por el/los esclavos, en este caso el master es el micro STM32F411 y el esclavo es el CS43L22 (driver), su frecuencia es N\*WS; siendo N un numero estandarizado (ej 128, 256, 512) *Ver sección 7.4.2, página 39 manual*.

**SCK**: (system clock) es el BitClock (menor frecuencia que el primero) frecuencia de C/Bit, su frecuencia es Fs\*(#de bits por canal) \*2.

**WS:** también se lo llama LRCK (left right clock) este sería el Fs que se menciona en el "SCK", cuando está en estado alto se realiza la conversión del canal izquierdo y cuando está en estado bajo en el canal derecho.

**SD:** (Serial Control Data) Son los datos.

Para comunicarse con el DAC "CS43L22", debe generarle el Master Clock para que pueda filtrar correctamente ya que se trata de un DAC delta-sigma.

Según la hoja de datos, cuando el Master Clock del I2S es generado, La Fs se calcula con la siguiente fórmula:

FS = I2SxCLK / ((32\*2) \*((2\*DIV) +ODD) \*4)

Por otro lado, I2SxCLK se calcula como:

I2SxCLK = 1MHz \* PLLI2SN / PLLI2SR

Para una Fs=32KHz recomienda:

- I2SxCLK=106.5MHz (PLLI2SN=213 PLLI2SR=2)

- DIV=6

- ODD=1

Este seteo genera una Fs=32001.20117Hz (con un error del 0.0038% respecto a los 32KHz)

### 3.1.2 Driver CS43L22

Connectivity -> I2C1

Necesita primero de I2C para configurar frecuencia, canales, volumen, mute, etc (está en el manual), luego se comunica por I2S para enviar los datos.

* **I2S**

- El clock del periférico I2S es 66.666667 MHz.

- Ese clock es dividido x 8 en un divisor interno dando 8.333333 MHz que es utilizada como el MCK.

- La velocidad (MCLK/LRCK Ratio) está seteada a 256, lo que quiere decir que MCLK/LRCK = 256 => LRCK = 32.552 KHz (para adaptarse al estándar de 32KHz).

(LRCK = WS)

- como el I2S está configurado para 16 bits, SCK = WS\*16 => SCK = 520.833 KHz

* **ADC**

- El ADC utiliza PCLK como fuente de clock. El PLCK está seteado a 12.5MHz

- Divisor interno = PCLK2/2

- 12 bits

- 2 canales (para el audio y el pote)

- Sampling time = 84 ciclos.

- Todo eso da una Frecuencia de sampling de:

fs = (CLK/(divisor\*canales)) / (bits+SamplingTime) = 32.552KHz

De esta manera ambos trabajan a la misma frecuencia

La hoja de datos define el periodo de sampleo como:

Tconv = (Sampling\_time + resolution) [ADCCLK cycles]

siendo ADCCLK configurable mediante el STM32CubeMX

Teniendo en cuenta que se dispone de 1 solo ADC y se requieren medir 2 entradas (ADC y potenciómetro), se deben configurar 2 canales para medir secuencialmente.

La configuración más cercana al Fs del I2S es la siguiente:

- ADCCLK = 1,34375 [MHz] (PLCK2 = 8.0625 [MHz], Prescaler\_ADC = 6)

- Resolución = 12 [bits]

- Sampling\_time (ADC) = 15 [ciclos]

- Sampling\_time (potenciómetro) = 3 [ciclos]

Tconv (ADC) = 15 + 12 = 27 [cycles]

Tconv (potenciómetro) = 3 + 12 = 15 [cycles]

Fs = ADCCLK / (Sampling\_time (ADC) + Sampling\_time (potenciómetro))

Fs = 1,34375 [MHz] / (27 + 15)

Fs = 31.994,04761

Error = 0,0224% (respecto a la Fs del I2S)

Después como el error no era aceptable lo dispara a través de un timer de 96 MHz y periodo de 1500 cuentas

96Mhz/1500= 64khz (porque son 2 canales. izquierda y derecha, es decir, no es de potenciómetro y audio, porque se miden juntos)

error=Fs=1.20117Hz /32k= 0,0037% (una décima parte de error de lo que tenía antes)

**Clock Configurado:**

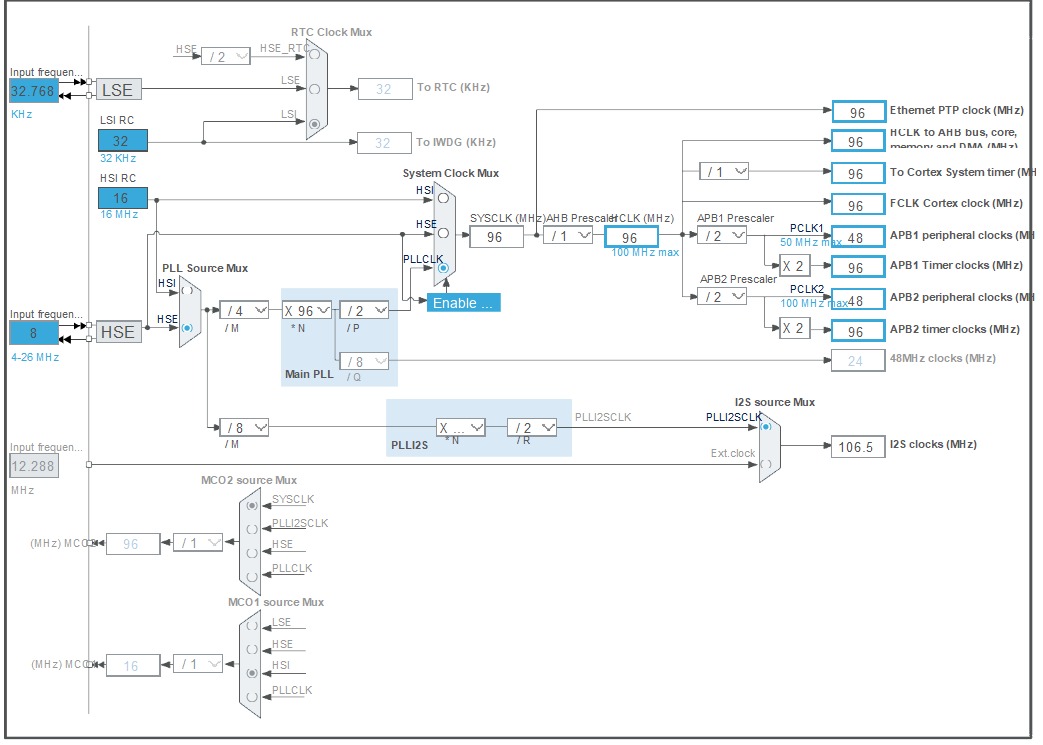
****

Figura 15

**Pulsadores para el usuario:**

*PA0:* (Pulsador interno para modificar efecto)

*PD9:*(Pulsador Interno para hacer un reset)

### 3.1.3 ADC

*PA1*: (Entrada de Audio)

*PA3*: (Control de expresión de efectos)

#### 3.1.3.1 Configuración con el Códec de DAC

*I2C1\_SCL:* PB6

*I2C1\_SDA:* PB9

#### 3.1.3.2 Transmisión de audio al códec del DAC

*I2S3\_WS***:** PA4

I2S3\_*MCK***:** PC7

I2S3\_SCK**:** PC10

I2S3\_SD: PC12

### 3.1.4 Diagrama en bloques

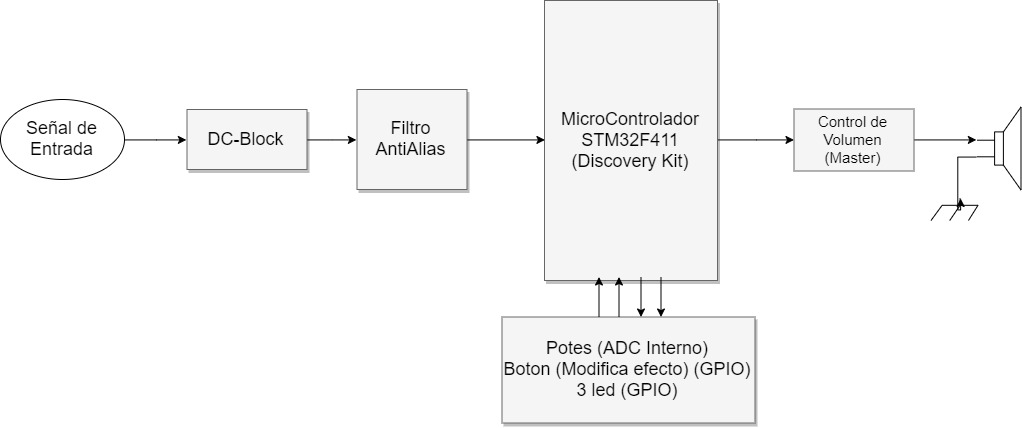


Figura 16

El conjunto de este diagrama en bloques, explica el funcionamiento de un pedal multiefecto. El mismo tiene una adaptación en la señal de entrada para poder ingresar al ADC del microcontrolador, seguido de un filtro AntiAlias, para eliminar el contenido armónico no deseado. El microcontrolador es el encargado de realizar el procesamiento digital de la señal, agregando los efectos (LoopBack, Delay, Fuzz y Wah-wah).

### 3.1.5 Esquemático

En esta sección se hará la descripción de forma separada de cada uno de los bloques que conforman el sistema.

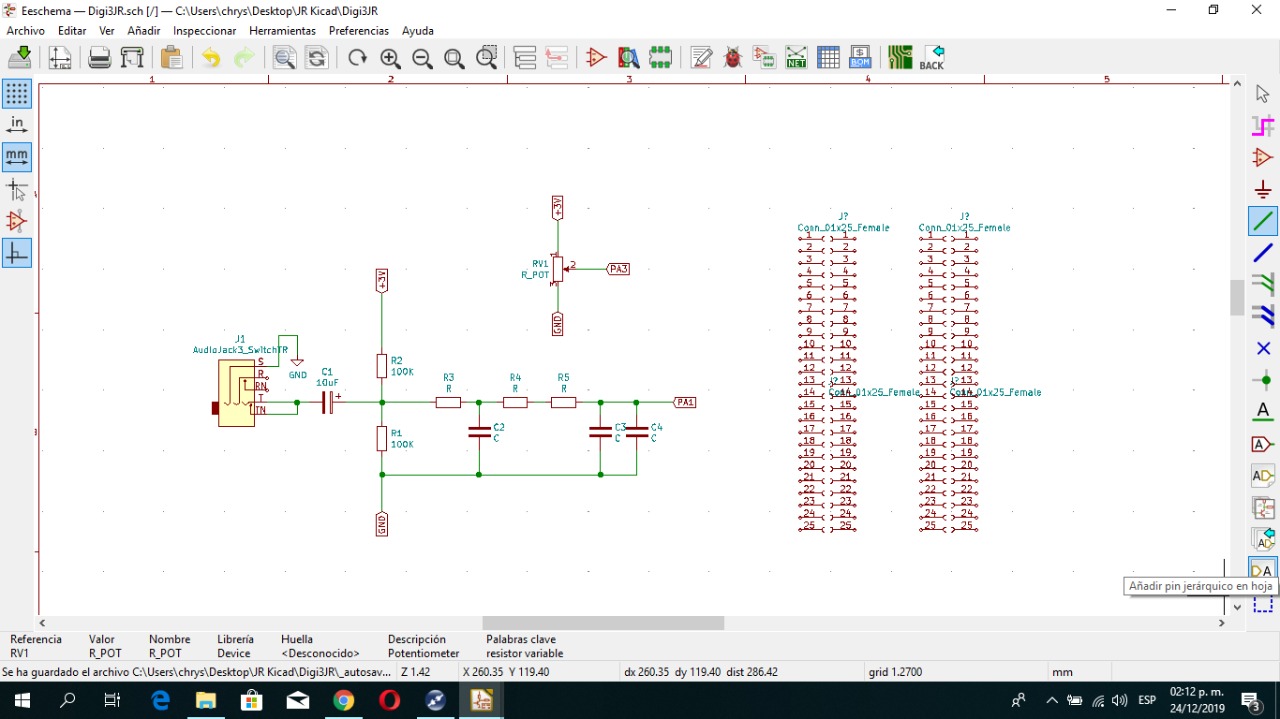


Figura 17

#### 3.1.5.1 Jack

Comenzaremos con la descripción de este conector, es el conector de audio​ de señales analógicas, que se utiliza para Inyectar la señal de entrada. La misma es un conector monocanal dado que la aplicación es para instrumentos.

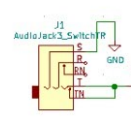


Figura 18

#### 3.1.5.2 Divisor resistivo

Este divisor se implementó para que el punto medio de la señal inyectada esté en 0 (en el centro), además se incluyó un capacitor para bloquear la componente continua de la señal.

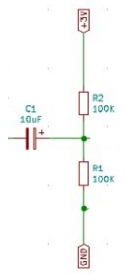


Figura 19

#### **3.1.5.3** Potenciómetro

Este potenciómetro se implementó para realizar las expresiones de los efectos.

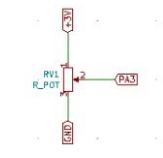


Figura 20

#### 3.1.5.4 Filtro Pasa Banda

Se experimentó la necesidad de incluir un filtro pasa bajo de orden 2, con frecuencia de corte en 8khz, dado que el ADC interno esta seteado a 32Khz, al tener este valor la performance del audio no es buena, incluyendo un nivel de ruido notable.

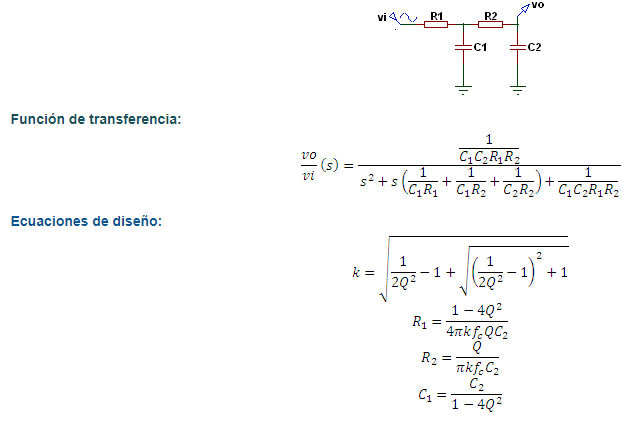


Figura 21

**Calculo del Filtro pasa bajos Pasivo:**

Frecuencia de corte Fc= 8 Khz  
Factor de calidad Q= 0.33

**Componentes del filtro Pasa bajos:**

R1= 6288 [Ω]  
R2=4853 [Ω]  
C1= 1.77 [nF]  
C2= 1 [nF]

### 3.1.6 Circuito impreso

Este proyecto incluye un hardware adicional muy sencillo ya que solo integra el Jack para inyectar la señal de entrada, un filtro pasa bajos y un potenciómetro oficiando como pedal de expresión.

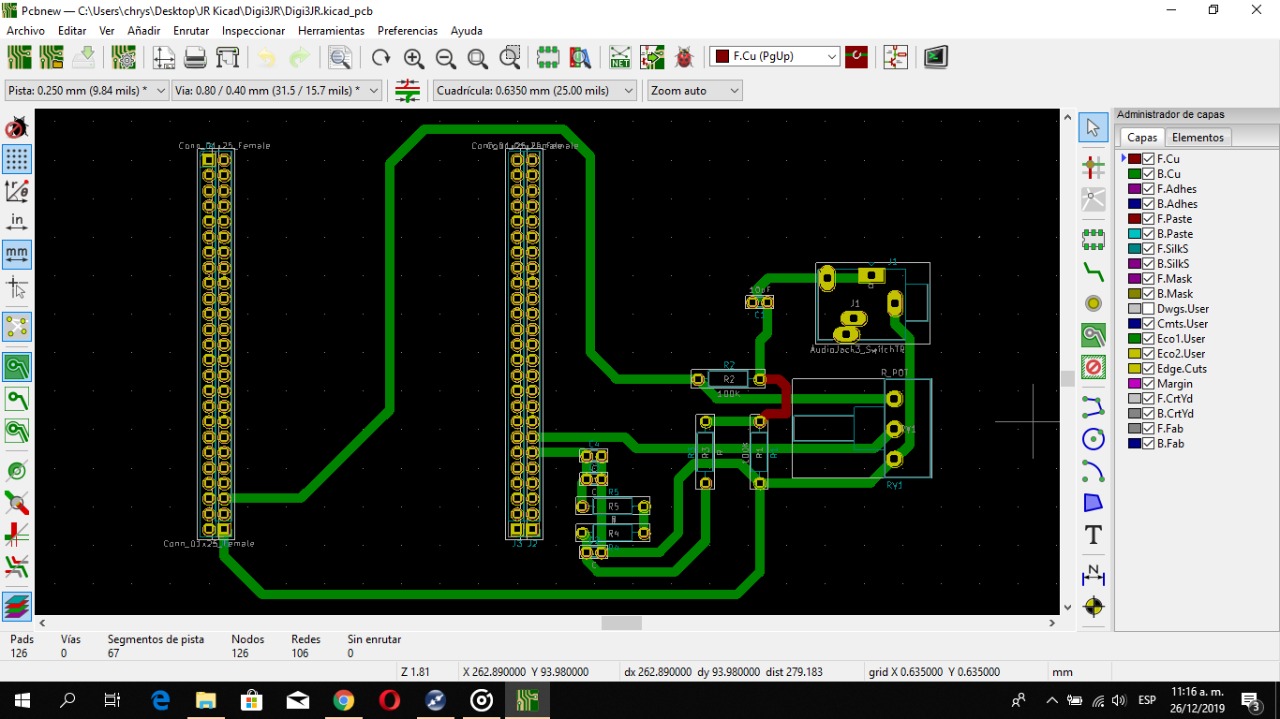


Figura 22

### 3.1.7 Fotos

Modelo 3D:

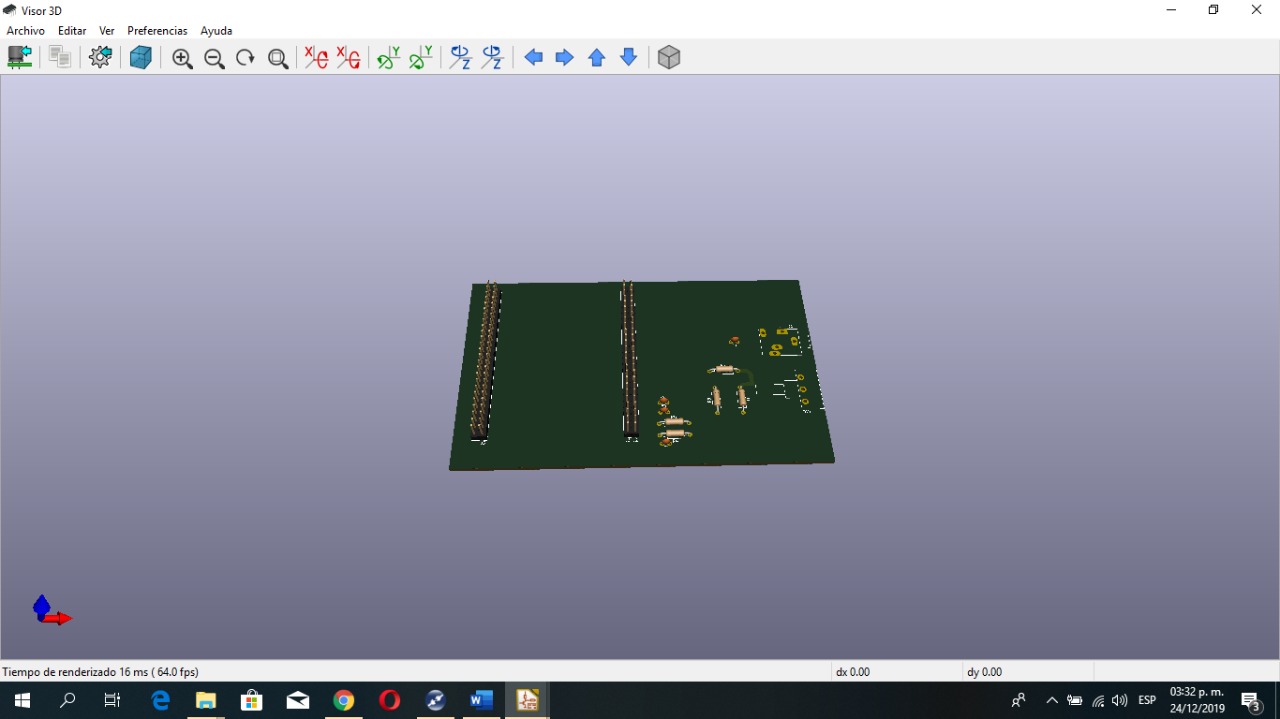
****

Figura 23

## 3.2 Software

En esta sección se deberá realizar la descripción del funcionamiento del software corriendo en el microcontrolador. Téngase presente que esta es la sección más importante del informe, es por esto que se desea una descripción lo más detallada posible.

No se deben pegar tramos de código en este informe, la descripción de las distintas funciones del código se debe realizar a través de diagramas de estados finitos y/o diagramas de flujo. El código propiamente dicho debe adjuntarse en el anexo y debe encontrarse comentado en forma prolija y detallada para facilitar la corrección del mismo. A continuación, se observan los subtítulos a incluir en este desarrollo.

### 3.2.1 Enumeración de rutinas

En esta sección simplemente se desea que se enumeren todas las rutinas incluidas en el programa y la función que cumplen en el mismo en forma resumida. Por ejemplo:

* Rutina “main”:
* Subrutina “HAL\_Init ();”
* Subrutina “MX\_GPIO\_Init();”
* Subrutina “MX\_DMA\_Init();”
* Subrutina “MX\_I2C1\_Init();”
* Subrutina “MX\_I2S3\_Init();”
* Subrutina “MX\_TIM2\_Init();”
* Subrutina “MX\_ADC1\_Init();”
* Subrutina “MX\_TIM2\_Init();”
* Subrutina “main\_loop ();
* Subrutina “FSM ();”
* Subrutina “main\_loop\_start ();”
* Subrutina “main\_loop\_end ();”
* Subrutina “void main\_loopback ()”
* Subrutina “void main\_eco ()”
* Subrutina “float fuzz(float, float)”
* Subrutina “void wahwah (float, float, int)”

### 3.2.2 Descripción del funcionamiento de cada rutina

En esta sección se debe realizar la descripción del funcionamiento de las distintas rutinas a través de diagramas de estados finitos y/o diagramas de flujo (siendo de preferencia la primera forma). No es necesaria en esta sección la presentación de un diagrama para cada rutina, para aquellas rutinas que sean triviales (por ejemplo: la inicialización de un periférico o una subrutina de interrupción que solo actualice contadores o flags, etc.) pueden explicarse sus acciones resumidamente en forma escrita.

* Rutina “main”: < Descripción >.

En el main\_init inicializo y disparo los periféricos necesarios para este proyecto (timer2, timer3, DAC CS43L22, DMA para I2S y ADC, inicializo Buffers y filtros)

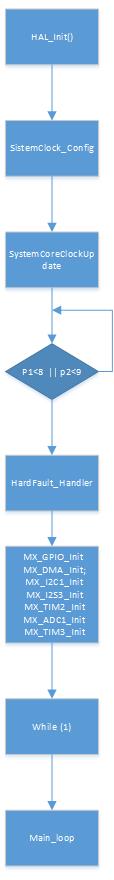


Figura 24

* Subrutina “HAL\_Init();”

Esta subrutina restablece todos los periféricos, inicializa la interfaz de Flash y el Systick. (Systick se utilizará para generar retrasos).

* Subrutina “MX\_GPIO \_Init();”

Inicializa las entradas digitales de entrada y salida de propósito general (boton y leds)

* Subrutina “MX\_DMA\_Init();”:

inicializa DMA para comunicar con ADC y I2S

* Subrutina “MX\_I2C1\_Init();”

Inicializa I2C para configurar DAC

* Subrutina “MX\_I2S3\_Init();”

Inicializa I2S para enviar audio al DAC

* Subrutina “MX\_TIM2\_Init();”

Inicializa timer para el blink del led “I'm alive”

* Subrutina “MX\_ADC1\_Init();”

Inicializa ADC

* Subrutina “main\_loop ();”

Dentro de main Loop esta Finite State Machine (FSM) con los 4 efectos 2 estados por efecto, uno para cuando se pulsa el botón y el otro cuando se suelta

* Subrutina “FSM ();”:

Reemplaza tener que copiar toda la máquina de estado

* Subrutina “main\_loop\_start ();”
* Subrutina “main\_loop\_end ();”

Realizo cálculos con el valor del potenciómetro para obtener el número de “paso” necesario para el efecto Delay.

Estados del DMA, se usa para cuando ocurre la colisión de los clock.

* DMA\_INIT: es el estado inicial
* DMA\_ADC\_READY: cambia este estado cada vez que termina de convertir el ADC
* DMA\_LOGIC\_BUSY: Cambia este estado cuando comienza la lógica del programa, este estado permite detectar cuando el tiempo de procesamiento sea insuficiente
* DMA\_DAC\_READY: Cuando termina de enviar los datos por I2S

El tiempo de procesamiento queda confinado entre DMA\_ADC\_READY y DMA\_DAC\_READY

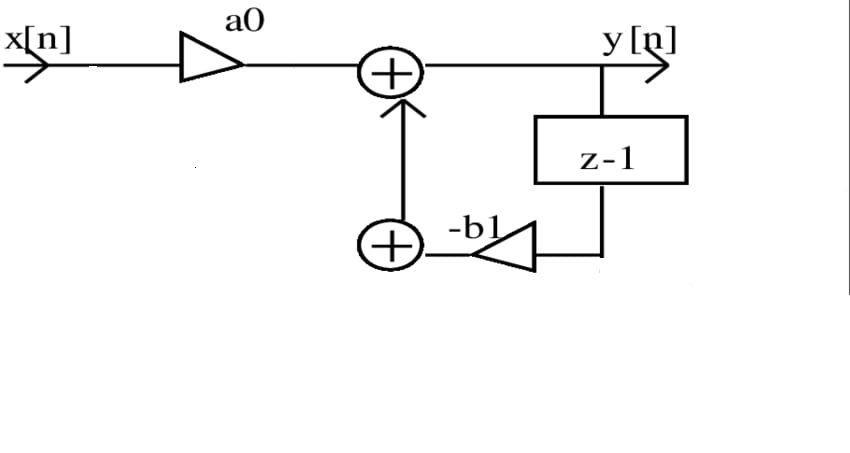
Si el tiempo de procesamiento (tiempo entre LOGIC\_BUSY y LOGIC\_READY) es mayor, en ese momento, se produjo la colisión entre las dos frecuencias de sampling la del ADC y la del I2S. En ese caso se debe omitir la transmisión de bloques para ADC y el I2S hasta que el tiempo de procesamiento vuelva a la normalidad.

* Subrutina “void main\_loopback ()”

Ya que el ADC convierte 2 canales en el buffer del DMA van a llegar las muestras de ambos canales intercalados por los tanto hay que hacer un procesamiento para separarlos y poder procesarlos y enviarlos al i2s. el loopback solo se encarga de realizar este manejo

* Subrutina “void main\_eco ()”

Figura 25



Partiendo de un vector llamado all\_in de N muestras. Voy llenando las posiciones de ese vector según van llegando las muestras, entonces tengo un puntero a la posición actual.

Ejemplo:

all\_in:

[1]

[2]

[3]

[4] <- actual

[5]

...

[N]

El puntero "actual" va a ir avanzando hacia abajo conforme vayan llegando nuevas muestras.

Luego tengo otro puntero que apunta al mismo vector pero unas posiciones más atrasadas.

Ej:

all\_in:

[1]

[2] <-atrasado

[3]

[4] <- actual

[5]

...

[N]

Luego yo voy a ir sacando las muestras al DAC sumando "actual"+"atrasado" que es lo que le da el efecto de delay (eco). El puntero "actual" y "atrasado" se van a ir moviendo a la misma velocidad para q la frecuencia del eco no se vea afectada, y la distancia entre el puntero "actual" y "atrasado" es lo que le da el tiempo de retardo. El máximo retardo se da cuando "atrasado" está en la posición más atrasada en el vector;

all\_in:

[1]

[2]

[3]

[4] <- actual

[5] <- atrasado

...

[N]

En ese caso, el retraso es de (N-1)/fs segundos

Retraso= Tam Vector/Fs

* Subrutina “float fuzz(float, float)”

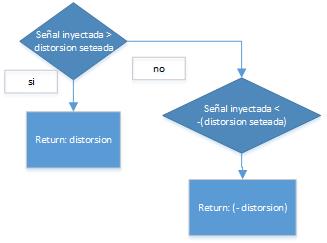


Figura 26

Cuando el nivel de la señal inyectada es mayor al nivel seteado en el potenciómetro (distorsión seteada) devuelve el valor del nivel seteado con el potenciómetro, en caso contrario, si el nivel de la señal inyectada es menor al nivel de la distorsión seteada por el potenciómetro negada, devuelve el valor de la distorsión negada. En este proyecto omitió el comportamiento de la curva alineal (mostrado en la introducción teoría) por la dificultad de implementación. La característica del efecto mencionado se implementó como un fuzz con distorsión por recorte.

* Subrutina “void wahwah (float, float, int)”:



Figura 27

En este proyecto el efecto citado se ha implementado utilizando 20 filtros pasa banda, cada uno de estos filtros pasa banda tiene una frecuencia central distinta, entonces conforme sucede el tiempo se recorren los filtros (de derecha a izquierda, es decir, cuando dirección=0 y viceversa) se activa y desactivan los filtros en forma secuencial. Con el potenciómetro fijo la velocidad de variación de activación y desactivación de los filtros, percibiendo de esta forma el efecto deseado.

# Modo de operación

El modo de operación es muy sencillo, en este producto podemos encontrar tres efectos para el usuario (Delay, Fuzz y WahWah) como mencionamos al principio. El usuario se informará del efecto que esta seteado a partir de los Leds que incluye el board de la placa con la siguiente estructura.

* LoopBack -> **Verde**
* Delay (eco) -> **Naranja**
* Fuzz -> **Azul**
* Wah-Wah -> **Rojo**

Podemos navegar por estos efectos a través del botón incluido en el board de la placa (de color azul) para elegirlos de forma secuencial, con el botón de color negro que también está incluido el board, reseteamos y volvemos al By Pass.

El desarrollo incluye un potenciómetro, para manejar la expresión de los efectos.

# Ensayos

Para este proyecto no se realizaron ensayos de mediciones ni de ningún tipo.

# Conclusiones

Entre las experiencias relevadas en el desarrollo del proyecto puedo mencionar, la intención de implementar el Audio Weaver (software de desarrollo que permite de forma más rápida agregar funciones de audio con una modalidad de diagrama en bloques).

## 6.1 Audio Weaver

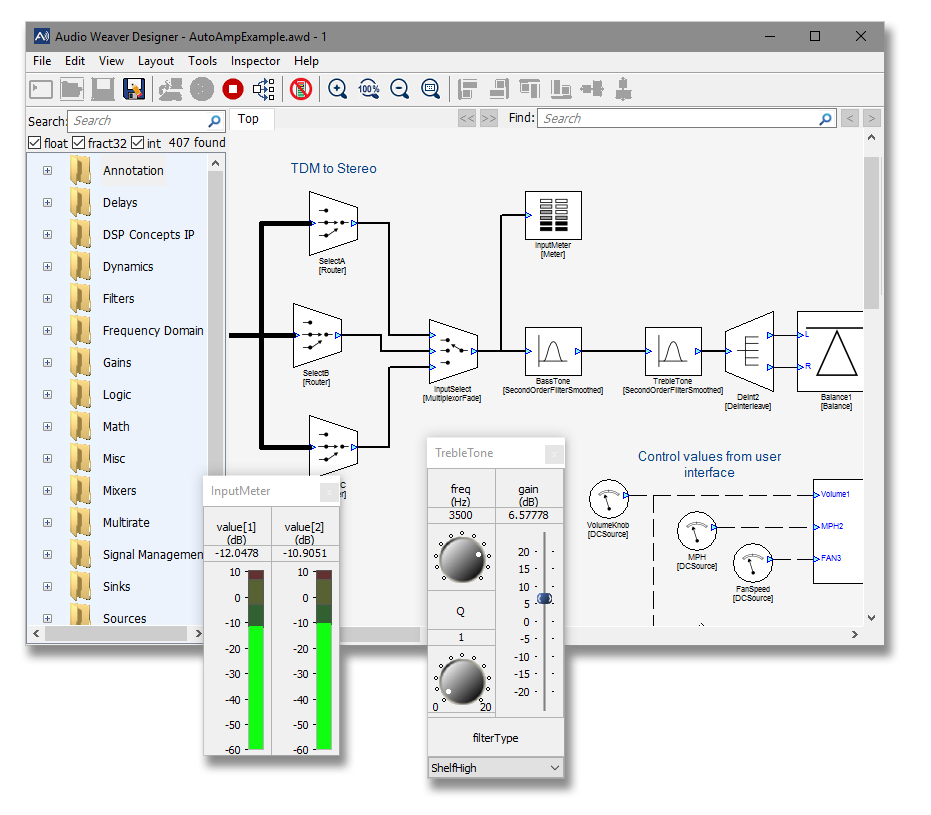


Figura 28

Software de desarrollo que permite de forma más rápida agregar funciones de audio con una modalidad de diagrama en bloques.

Tras haber investigado sobre el software por recomendación de la cátedra. A modo de comienzo para la familiarización de la herramienta, pude realizar a través de una conexión USB, la implementación de algunos efectos, como, por ejemplo, delay, el limitante que me encontré con esta herramienta fue la imposibilidad de “bajar” el código que genera el Audio Weaver a la placa, para poder implementar un Pedal multiefecto completamente autónomo como requiere la catedra, a causa de la dependencia de la conexión USB.

Por este motivo me vi obligado a desistir en la implementación de la herramienta sugerida, Adicionalmente, en página oficial del proveedor (que se puede visitar a través de este [LINK](https://dspconcepts.com/solutions/audio-weaver)), no explica ni provee información adicional para la implementación que requiero.

Además, me vi imposibilitado de implementar un Control de Master Volumen entre el DAC y el Jack de la Placa, dada la limitación física de no poder añadirlo ya que ambos elementos pertenecen al Board de la placa. Por lo tanto, implementé el Footswitch por Software para una simplificación del proyecto.

Otra dificultad sorteada en el proyecto fue la necesidad de incluir un filtro Antialias sobre exigido (Frecuencia de corte: 8[KHz]), para eliminar el contenido armónico no deseado, dado que encontré que la performance del ADC que contiene el board de la placa no es lo suficientemente exigente como para realizar el procesamiento de una señal de audio y percibirla con una fidelidad considerable.

# Proyecto finalizado



Figura 29

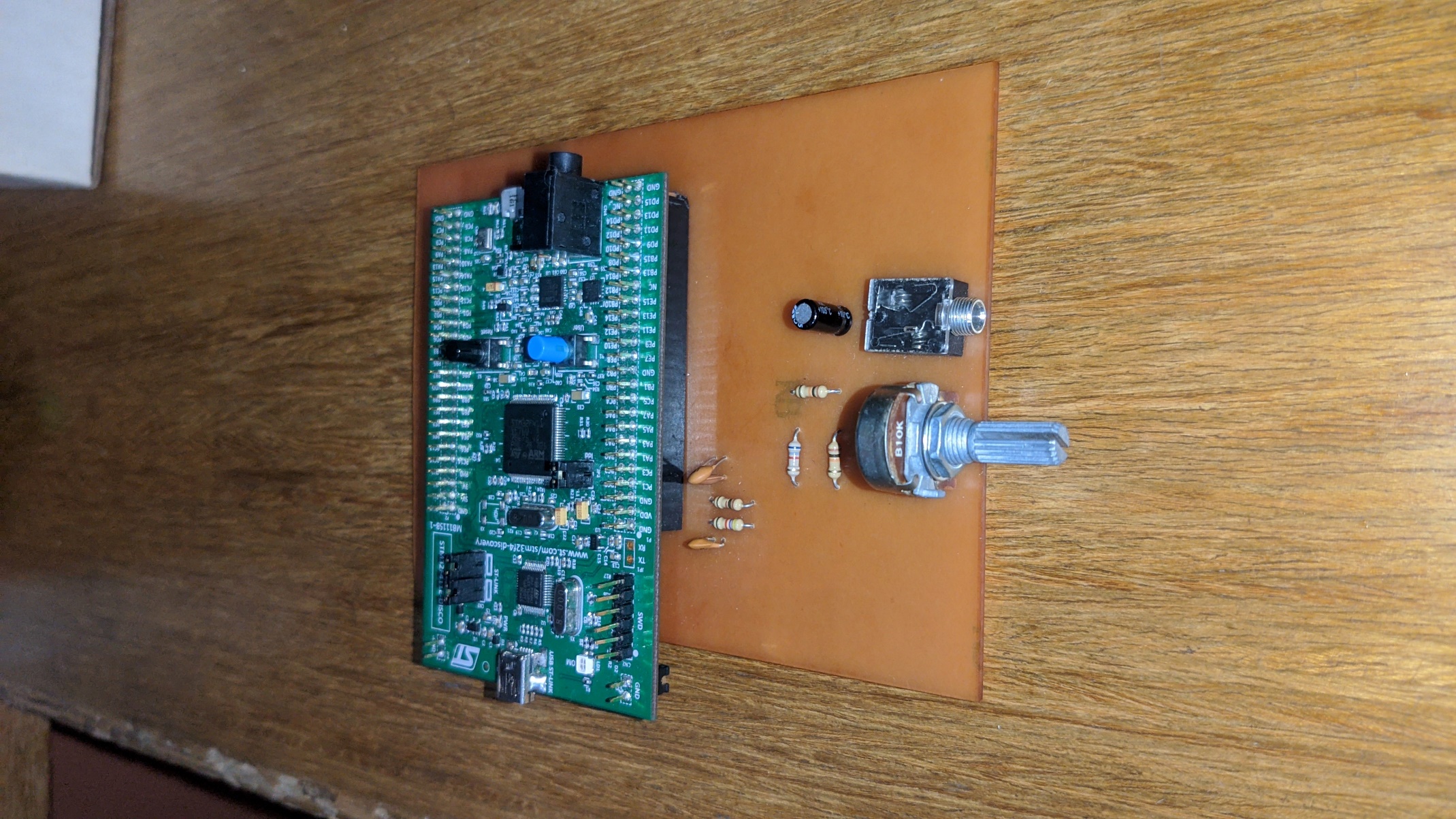


Figura 30

# Referencias

1. Hoja de dato: CS43L22–Low Power, Stereo DAC w/Headphone & Speak Amps– Cirrus Logic.
2. Libro: Digital Audio Effects – Autor: Udo Zolzer – Primera edición - Editorial: John Wiley& Sons.
3. Link: DSP Concepts–Audio Weaver

<https://dspconcepts.com/solutions/audio-weaver>

1. Comb Filter: se produce al sumarle a la señal original una versión retrasada en el tiempo de sí misma, causando así [interferencia](https://es.wikipedia.org/wiki/Interferencia) [constructiva](https://es.wikipedia.org/wiki/Interferencia_constructiva) y [destructiva](https://es.wikipedia.org/wiki/Interferencia_destructiva). [↑](#footnote-ref-1)
2. Overdrive: es un tipo de efecto empleado para guitarra eléctrica (distorsión) [↑](#footnote-ref-2)
3. Boss: Marca reconocida en el mercado de pedal de efectos de guitarra. [↑](#footnote-ref-3)
4. Dunlop: Marca reconocida en el mercado de pedal de efectos de guitarra. [↑](#footnote-ref-4)